



ZÜRCHER HOCHSCHULE FÜR ANGEWANDTE WISSENSCHAFTEN  
DEPARTEMENT LIFE SCIENCES UND FACILITY MANAGEMENT  
INSITUT UNR



## Schutzwirkung gegen Lawinen auf Vaia-Windwurfflächen im Val Tuors

Bachelorarbeit von

**Ott Tobias**

Bachelorstudiengang 2016

Abgabedatum: 24.10.2019

Studienrichtung Umweltingenieurwesen

Betreuung:

**Forsting. ETH Hansueli Bucher**

ibW Bildungszentrum Wald

Bovel, 7304 Maienfeld

**Dr. Peter Bebi**

WSL Institut für Schnee und Lawinenforschung SLF

Forschungsgruppe Gebirgsökosysteme

Flüelastr. 11 7260 Davos Dorf

# Impressum

## Titelbild

Windwurffläche in Blegs da Vo (Val Tuors)

Foto: eigene Aufnahme

## Schlagworte

Windwurfflächen, Lawinenschutzwirkung, Fernerkundung, Schutzwald, Wirkhöhen, Totholz, Vaia

## Zitiervorschlag

Ott, T. (2019). Schutzwirkung gegen Lawinen auf Vaia-Windwurfflächen im Val Tuors. In *Bachelorarbeit ZHAW*, unveröffentlicht

## Adresse

Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften ZHAW  
Life Sciences and Facility Management  
Grüental, Postfach  
8820 Wädenswil

## Autor

Tobias Ott  
Rautistrasse 136  
8048 Zürich

## Zusammenfassung

Windwurf gehört neben Borkenkäferkalamitäten und Waldbrand zu den grössten Gefahren für den Lawinenschutzwald in der Schweiz. Im Oktober 2018 zerstörte der Sturm Vaia grosse Teile des Schutzwaldes im Albulatal und Val Tuors. Die vorliegende Arbeit befasst sich einerseits mit den betroffenen Waldtypen bezüglich Kronenschlussgrad, Bestandesstruktur und Baumarten. Andererseits wurde auf einer kleineren Untersuchungsfläche die Lawinenschutzwirkung analysiert und eine Beurteilung über das Liegenlassen des Totholzes gemacht. Dies erfolgte mit Fernerkundungs- sowie Felddaten.

Die lockeren, stufigen Bestände waren vom Sturm Vaia auf der untersuchten Fläche am meisten beschädigt worden. Zusätzlich war es die Fichte (*Picea abies*), welche mit Abstand den grössten Schaden erlitt. Die gedrängt/normalen, zweischichtigen Bestände konnten dem Wind am besten standhalten. Die Lärche (*Larix decidua*) als Herzwurzler und vor allem die Arve (*Pinus cembra*) mit ihrem Pfahlwurzelsystem hatten eine viel höhere Widerstandskraft als die Fichte mit ihrem Flachwurzelsystem. Jedoch spielen noch zahlreiche andere Faktoren mit, wie anfällig ein Bestand auf Windwurf ist. Es ist eine komplexe Interaktion von meteorologischen Bedingungen, Standorteigenschaften, Bestandesstrukturen und äusseren Einflüssen, wobei dem Sturm selbst die grösste Bedeutung zukommt.

Innerhalb des Perimeters waren fast keine Bäume, welche unbeschädigt blieben, vorhanden gewesen. Zu 80% lagen die liegenden Stämme in der Falllinie des Hanges. Vorverjüngung war auf der Fläche nur sehr spärlich vorhanden. Dies muss für die nachhaltige Lawinenschutzwirkung negativ gewertet werden. Jedoch bietet das liegende Totholz durch die erhöhte Oberflächenrauigkeit derzeit einen erheblichen Schutz gegenüber dem Anreissen von Lawinen. Die meisten Stämme und Wurzelteller erreichten zwar keine Wirkhöhen welche über der Sollhöhe (1.5 x Schneehöhe) lagen, jedoch waren die Maximalhöhen aller Wurzelteller höher als die maximale Schneehöhe eines 30-jährlichen Ereignisses. Flächenmässig waren nur  $\frac{1}{3}$  der Rauigkeitselemente grösser als die Schneehöhe. Diese waren jedoch gut im Perimeter verteilt, sodass nicht viele Lücken vorhanden waren. Da der Wald schon vor dem Windwurf von offener Struktur war, können diese Lücken nicht alle auf den Sturm Vaia zurückgeführt werden. Somit kann gesagt werden, dass die Lawinenschutzwirkung vorerst keine grossen Einbussen durch den Sturm Vaia erlitten hat.

Für eine möglichst nachhaltige Schutzwirkung gegen Lawinenanrisse ist das liegende Totholz von entscheidender Bedeutung. Wie erwähnt, ist einerseits die Oberflächenrauigkeit für die jetzige Schutzwirkung verantwortlich. Andererseits kann das Totholz ab einem gewissen Vermoderungsgrad ein ideales Substrat für die Verjüngung bieten. Die Regeneration des Waldbestandes auf der Fläche ist für eine möglichst lückenlose Schutzwirkung von entscheidender Bedeutung. Daher wird vom Räumen des Totholzes dringend abgeraten und eine gezielte Bepflanzung vorgeschlagen.

## Abstract

Besides bark beetle calamities and forest fires, windthrow is one of the biggest threats of an avalanche protection forest in Switzerland. In October 2018, a large part of the protection forest in Albulatal and Val Tuors was destroyed by a storm called Vaia. This paper focuses on two aspects. Firstly, on the affected forest types, more specifically on their canopy cover, forest structure and tree types. Secondly, on the remaining avalanche protection of this forest was analyzed on a defined study area including the effects of the deadwood left behind. This assessment was done based on remote sensing and field data.

The loose, multilayered stands on the study area suffered the most damage by the storm Vaia. More specifically, the largest damage was observed among Norway spruce (*Picea abies*). On the other hand, dense/normal, two-layered stands were least affected. The larch (*Larix decidua*) with a heart-root system and the swiss stone pine (*Pinus cembra*) with its taproot system were more resistant to the storm than the Norway spruce with its sinker root system. However, many other factors should also be considered to assess how susceptible a forest stand is to windthrow. It is a complex interaction of meteorological conditions, site properties, forest structures and external influences, but it is primarily the characteristics of the storm itself.

After Vaia, there were almost no trees in the perimeter which remained undamaged. Approximately 80% of the fallen stems were directed towards the hillside. Pre-rejuvenation was rarely observed in the study area, which negatively influenced the sustainability of the avalanche protection. Nevertheless, there was improved protection from avalanche releases resulting from the increased roughness of the ground surface through the remaining deadwood. Although most of the stems and rootplates did not reach the targeted effective height (1.5 x snow height), but all rootplates were higher than the maximum height of snow for a 30-year scenario. In terms of area, only  $\frac{1}{3}$  of the elements of roughness were greater than the height of snow. However, as they were widely spread out across the perimeter, they did not leave many gaps. Even before the storm the forest structure included some open spaces and therefore not all gaps were a result of the storm. Consequently, the avalanche protection was not majorly disturbed by the storm Vaia in the short term.

In summary, the remaining deadwood has a major influence on the sustainability of the forests avalanche release protection. The roughness of the ground surface from the deadwood increases the protection effect. In addition, the growth of young trees/seedlings is fostered through their substrate. The revitalization of the forest stand in this area is key for an undisrupted protection. It is therefore suggested to actively plant trees and not clear away any deadwood from the area.

## **Dank**

An dieser Stelle möchte ich mich ganz herzlich bei Hansueli Bucher, Peter Bebi und Natalie Brožová für die super Unterstützung und die fachlichen Inputs bedanken.

Ein weiterer Dank geht an Mirjam Marti, Gregor Schmucki, Alexander Bast und Till Groh für kleinere und grössere Fragen.

Ein grosses Dankeschön gilt auch dem SLF, dass ich meine Arbeit in Davos verfassen konnte.

Zum Schluss möchte ich mich auch bei meiner Frau und meinen Eltern bedanken. Für die grosse Unterstützung, die ich von ihnen erhalten habe, ohne die, diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre.

# Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	8
2	Material & Methode .....	9
2.1	Untersuchungsgebiet.....	9
2.2	GIS-Analyse über die Betroffenheit der Waldteile durch den Sturm Vaia.....	10
2.2.1	Kronenschlussgrad .....	10
2.2.2	Waldstrukturen und Baumarten .....	11
2.3	Feldaufnahmen.....	12
2.3.1	Flächenparameter.....	13
2.3.2	Verjüngung, stehende Bäume .....	13
2.3.3	Wirkhöhen Totholz.....	13
2.4	GIS-Analyse für Lawinenschutzwirkung und deren Veränderung.....	14
2.4.1	Orthophoto und DOM .....	14
2.4.2	Ausrichtung der Stämme .....	14
2.4.3	Wirkhöhen.....	14
2.5	Berechnung der relevanten Höhen.....	15
2.6	Auswertung der Daten .....	16
3	Resultate .....	17
3.1	Betroffenheit der Waldteile durch den Sturm Vaia .....	17
3.1.1	Kronenschlussgrad .....	17
3.1.2	Waldstrukturen.....	18
3.1.3	Baumarten .....	19
3.2	Flächenparameter.....	19
3.2.1	Deckungsgrad.....	19
3.2.2	Lücken .....	22
3.2.3	Vorverjüngung und Bäume .....	23
3.3	Lawinenschutz (Parameter für den Lawinenschutz?) .....	23
3.3.1	Ausrichtung der Stämme .....	23
3.3.2	Wirkhöhen.....	25
3.3.3	Wirkhöhen mit Fernerkundung .....	26
3.4	Veränderung der höchsten Elemente über den Winter .....	28
4	Diskussion .....	29
4.1	Betroffenheit der Waldteile durch den Sturm Vaia .....	29
4.2	Flächenparameter.....	30
4.3	Lawinenschutzwirkung auf der Untersuchungsfläche .....	31
4.4	Veränderung der höchsten Elemente über den Winter .....	35
5	Schlussfolgerung.....	37
5.1	Ausblick .....	37
6	Literaturverzeichnis .....	38

## Abkürzungsverzeichnis

BHD	Brusthöhendurchmesser
BSH-Faktor	Baum-Schneehöhen Faktor
DOM/DSM	digitales Oberflächen-Modell / digital surface model
DTM	digitales Terrain-Modell
E-Modul	Elastizitätsmodul
GIS	geographic information system
GNSS	globales Navigationssatellitensystem
NaiS	Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald, Wegleitung für Pflegemassnahmen in Wäldern mit Schutzfunktion
SLF	WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung
WaG	Waldgesetz
VHM/CHM	Vegetationshöhen-Modell
WSL	Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft

# 1 Einleitung

Die Schweiz ist zu rund einem Drittel von Wald bedeckt. Davon sind 49% (585'000 ha) als Schutzwald ausgeschieden (BAFU, 2018). Vor allem in den Gebirgsregionen übernimmt der Wald, durch die Verhinderung oder Reduktion von Gefahrenprozessen, eine wichtige Schutzfunktion für Menschen und Infrastrukturanlagen gegenüber Naturgefahren (Arge Alp, 2009). Der Schutz gegen Lawinenanrisse zählt dabei zu den wichtigsten Ansprüchen. Die Schneeeinterzeption, der Strahlungshaushalt, der Wind und die Stützwirkung der Stämme zählen zu den wichtigsten Eigenarten für die stabilisierende Wirkung der Schneedecke durch den Wald (Margreth, 2004). Ein intakter Schutzwald, der diese Eigenschaften erfüllen kann, zeichnet sich durch die Erfüllung der Ansprüche an den Deckungsgrad, das Gefüge, die Mischung, die Stabilitätsträger und die Lückengrössen aus (Frehner et al., 2005). Richtet ein Sturm grossen Schaden in einem Schutzwald an, ist die Schutzwirkung zumindest zeitweise fragwürdig.

Es stellt sich die Frage, ob durch die Oberflächenrauigkeit der umgestürzten Bäume die Schutzwirkung noch ausreichend ist und wie lange es dauert, bis die natürliche Regeneration den Schutz wieder gewährleistet. Somit gilt es für die Betroffenen und Verantwortlichen ein Management zu erstellen. Erforderliche Schutzmassnahmen müssen immer aus ökologischer, ökonomischer und sozialer Sicht abgewogen werden (BAFU, 2013). Dies gilt auch auf Windwurfflächen. Somit muss aus objektiver Sichtweise entschieden werden, ob eine Fläche geräumt, teilgeräumt oder belassen und mit Bepflanzung oder technischen Schutzmassnahmen ergänzt wird. Argumente wie die Hauptnaturgefahr, Bodenfruchtbarkeit, Biodiversität, die Sicherheit der Forstleute, Erntekosten oder die Borkenkäferproblematik beeinflussen den Entscheid und können zu emotionalen Diskussionen führen (BAFU, 2008; Schwitter et al., 2015).

Windwurf zählt neben Borkenkäferkalamitäten und Waldbrand in der Schweiz zu den grössten Gefahren für Wälder mit Lawinenschutzwirkung (Bebi et al., 2015). Vor allem im Winter können in der Schweiz starke Stürme entstehen, da zu dieser Zeit die Temperaturunterschiede in der Stratosphäre besonders gross sind (Usbeck, 2015). Im Oktober 2018 zog das Sturmtief Vaia von Süden her über die Schweiz, welches in mehreren Regionen Orkanstärke erreichte (Windgeschwindigkeiten >117km/h). Besonders im Albulatal, dem Oberengadin und dem Valposchiavo kam es zu grösseren Schäden im Wald (Amt für Wald und Naturgefahren, 2018). Auch im Val Tuors, einem Seitental des Albulatals, war ein erheblicher Anteil der Schutzwaldfläche vom Sturm Vaia beschädigt worden. Zahlreiche Einflussgrössen wie die Topografie, der Standort, der Sturm selbst aber auch die Bestandesmerkmale eines Waldes haben einen wesentlichen Einfluss auf das Schadenausmass eines Sturmes (BAFU, 2008-a).

Diese Arbeit ist auf Fernerkundungsdaten und Felddaten der Windwurffläche Blegs da Vo aufgebaut und soll einen Überblick über die Situation im Val Tuors geben.

## Forschungsfragen:

- Welche Waldtypen bezüglich Kronenschlussgrad, Bestandesstruktur und Baumarten waren vom Sturm Vaia im Oktober 2018 betroffen?
- Wie ist die momentane Lawinenschutzwirkung auf der Untersuchungsfläche einzuschätzen und wie wird sie sich entwickeln?
- Soll die Windwurffläche in Blegs da Vo geräumt oder belassen werden?
- Wie kann die Lawinenschutzwirkung am besten erfasst werden und können Fernerkundungsdaten bei einer objektiven Einschätzung der Restschutzwirkung helfen?

## 2 Material & Methode

### 2.1 Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet dieser Arbeit liegt nahe Bergün im Val Tuors in den kontinentalen Hochalpen (Abbildung 1). Innerhalb dieses Gebiets wurden zwei Untersuchungsflächen bestimmt. Einerseits erfolgte die Analyse der vom Sturm Vaia betroffenen Waldtypen grossflächig auf einer Fläche von 290 ha. Andererseits wurden die Feldparameter auf einer Fläche von ca. 1.3 ha innerhalb des zuvor erwähnten Perimeters erhoben.

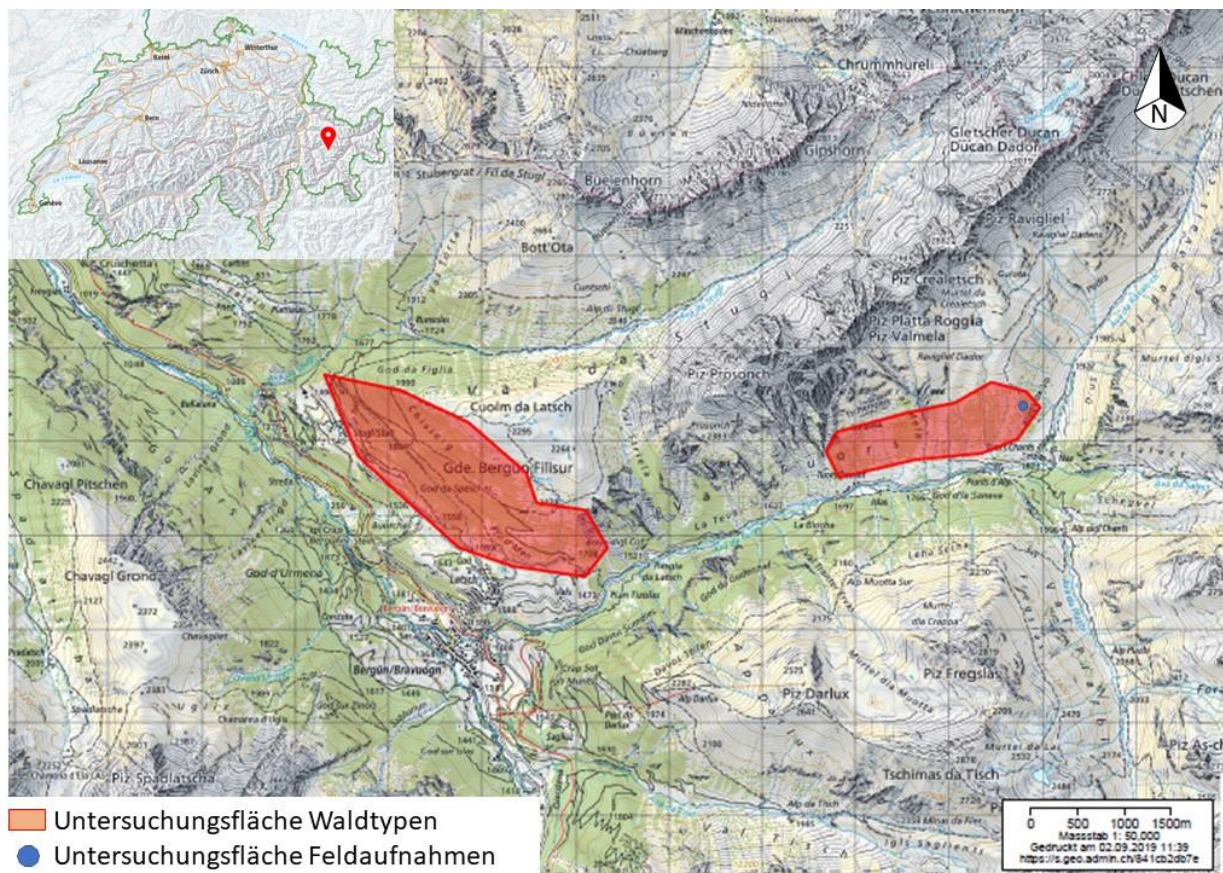


Abbildung 1: Übersichtskarte der Untersuchungsflächen (Swisstopo, ohne Datum; eigene Bearbeitung)

Die 290 ha erstreckten sich von Cuolm da Latsch über das Val Tuors bis nach Blegs da Vo. Die Fläche beinhaltet die gesamte Waldfläche in der Höhenlage von 1500 bis 2300 m ü.M. Die Exposition reichte von Süd-West bis Süd-Ost. Das Untersuchungsgebiet für die Felddaten und die Beurteilung der Lawenschutzwirkung beschränkte sich auf eine kleinere Waldfläche im östlichen Teil der grossen Untersuchungsfläche, welche vom Sturm Vaia stark beschädigt wurde (Abbildung 3).

Die Untersuchungsfläche in Blegs da Vo, auf welcher die Felddaten erhoben wurden, liegt auf einer Höhe von 1900 bis 2100 m ü.M., was der subalpinen und oberalpinen Zone entspricht. Die Fläche befand sich im Bereich der Waldgrenze, die von Arven (*Pinus cembra*), Fichten (*Picea abies*) und Lärchen (*Larix decidua*) dominiert wird. Das ganze Gebiet weist eine Hangneigung von über 30° auf und gilt somit auch als potenzielles Lawinenanrissgebiet. Der Wald ist laut dem Geoportal GR (ohne Datum) als Schutzwald mit kleinem Risiko ausgeschieden. Der durchschnittliche Jahresniederschlag liegt in der Region bei 973 mm (Messstation Bergün/Latsch 1407 m ü.M.; Normperiode 1981-2010) (MeteoSchweiz, 2019-a). Der natürliche Waldstandort der Untersuchungsfläche liegt im Übergangsbereich von einem Lärchen-Arvenwald zu einem subalpinen Fichtenwald (Delarze et al., 2015; Frehner et al., 2005). Das Gebiet rund um die Untersuchungsfläche wird auch als Sömmerungsgebiet für Schafe genutzt (Swisstopo, ohne Datum; eigene Beobachtung).

## 2.2 GIS-Analyse über die Betroffenheit der Waldteile durch den Sturm Vaia

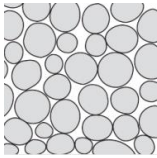
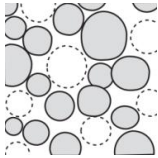
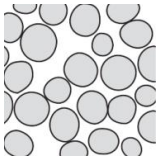
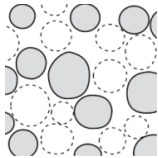
Die Analyse wurde mit dem GIS-Programm ArcGIS Pro (Version 2.3.0) der Firma ESRI durchgeführt.

### 2.2.1 Kronenschlussgrad

Die Beurteilung des Kronenschlussgrades erfolgte anhand des Orthophotos von Swisstopo aus dem Jahre 2017. Die Einteilung erfolgte nach Stierlin et al. (1994) in die vier Klassen gedrängt/normal, locker, räumig und aufgelöst (Tabelle 1). Die Klassen gedrängt und normal wurden in dieser Arbeit zusammengefasst, da es auf einem Luftbild sehr schwierig einzuschätzen ist, ob sich die Kronen überlappen oder nur knapp berühren. Die Abgrenzung erfolgte in Cuolm da Latsch anhand der Exposition. Der südwestlich bis südlich exponierten Wald oberhalb der Dörfer Stugl und Latsch wurde somit ausgeschieden. Im Val Tuors betraf es die südlich bis südöstlich exponierten Wälder auf der nördlichen Talseite, welche für diese Auswertung berücksichtigt wurden (Abbildung 2).

Die Auswertung der Betroffenheit erfolgte nach Kulakowski und Veblen (2002). Es wurde der Flächenanteil der verschiedenen Klassen am gesamten Untersuchungsgebiet vor dem Sturm berechnet. Die Prozentzahl stellte den Erwartungswert dar, da davon ausgegangen wurde, dass alle Kronenschlussgrade während dem Sturmereignis gleich betroffen waren. In einem zweiten Schritt wurde die gleiche Berechnung nur auf den Windwurfflächen durchgeführt, so dass der effektive Anteil der verschiedenen windwurfgeschädigten Klassen berechnet werden konnte. Dieser Wert stellte den effektiv vom Sturm Vaia beschädigten Klassenflächenanteil dar. Somit konnten diese beiden Prozentzahlen miteinander verglichen werden. War der effektive Sturmschadenwert grösser als der Erwartungswert, konnte eine erhöhte Anfälligkeit gegenüber Vaia angenommen werden. War dieser jedoch tiefer, bedeutete es eine erhöhte Resistenz gegenüber Sturmschaden.

Tabelle 1: Übersicht über die Kronenschlussgrade nach Stierlin et al. (1994)

Bezeichnung	Bedeutung	Bespielbild	Bezeichnung	Bedeutung	Bespielbild
gedrängt/ normal	kleine bis starke Berührung der Kronen gegenseitige Beschattung und Berührung bei Wind		räumig	grössere Lücken und Einschieben von Kronen ist möglich, Kronen sind regelmässig verteilt	
locker	kleine Lücken vorhanden aber kein Einschieben von Kronen möglich		aufgelöst	wenig zusammenhängende bestockte Fläche	

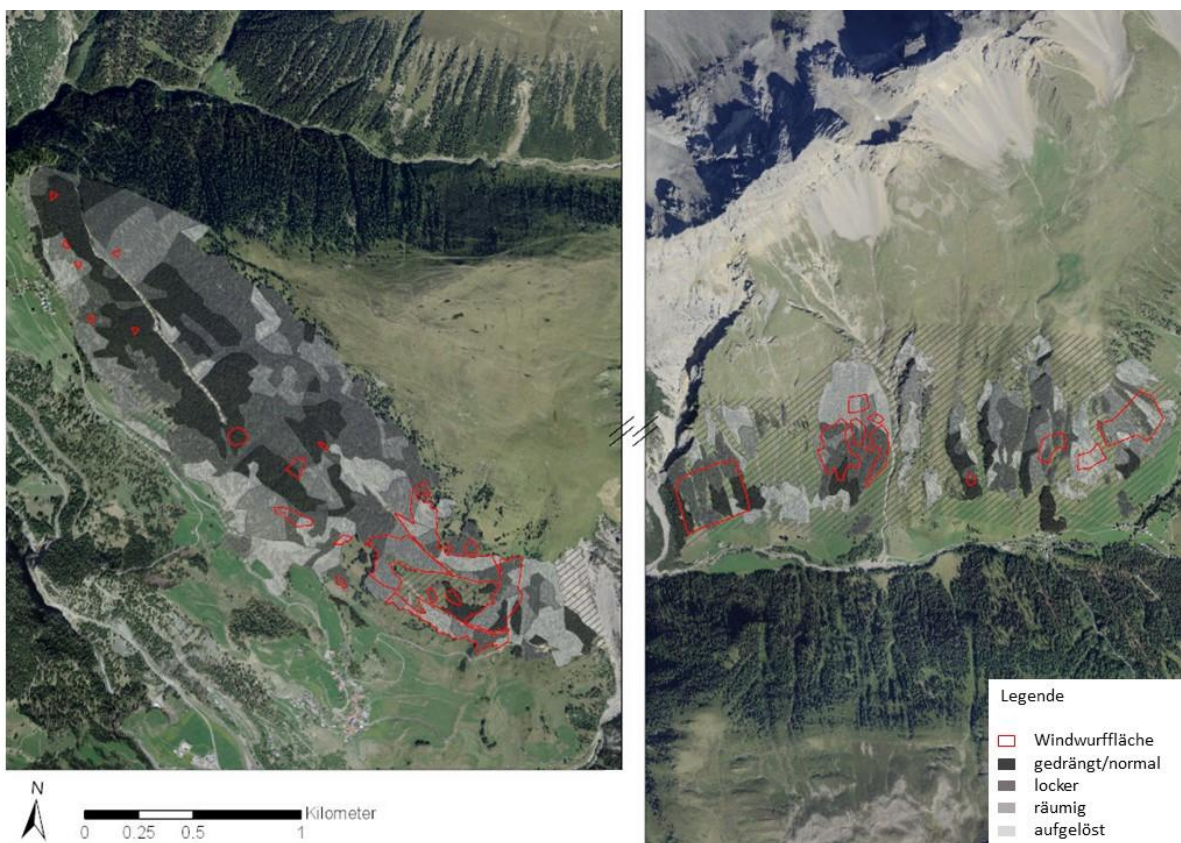


Abbildung 2: Übersichtskarte der Kronenschlussgrade (Grautöne) und der Windwurfflächen (rot umrandete Polygone) in Cuolm da Latsch (links) und dem Val Tuors (rechts)

### 2.2.2 Waldstrukturen und Baumarten

Die Analyse der Betroffenheit der Waldstrukturen und Baumarten erfolgte anhand der Bestandeskarte vom Amt für Wald und Naturgefahren (2010). Die beiden Strukturen «zweischichtig nach unten» und «zweischichtig nach unten und oben» der Bestandeskarte wurden in dieser Arbeit als Klasse «zweischichtig» zusammengefasst. Die übrigen Klassen «einschichtig», «plenterartig» und «stufig» wurden direkt von der Bestandeskarte übernommen (Tabelle 2). Die berücksichtigten Baumarten beschränkten sich auf die Arve, die Fichte und die Lärche, da die restlichen Arten nur einen sehr geringen Anteil ausmachten.

Für diese Beurteilung wurde nicht exakt die gleiche Fläche genommen wie beim Kronenschlussgrad, da die Daten der Bestandeskarte nicht auf der gesamten Fläche vorhanden waren. Somit begrenzte sich die Untersuchungsfläche zu den Waldstrukturen und Baumarten auf die Flächen, auf denen diese Informationen abrufbar waren.

Die Auswertung der Betroffenheit erfolgte analog des Kronenschlussgrades (Kapitel 2.2.1).

Tabelle 2: Übersicht über die verschiedenen Waldstrukturen mit ihren Bedeutungen nach Stierlin et al. (1994)

Bezeichnung	Bedeutung
einschichtig	gleichförmige Bestände mit horizontalem Kronenschluss in der Oberschicht
plenterartig	stufige Struktur, wo Bäume der Mittel-, Unterschicht in die Oberschicht aufwachsen können
stufig	bestandesbildende Bäume in mehreren Schichten, welche nicht voneinander unterschieden werden können
zweischichtig	Oberschicht und eine davon zu unterscheidende Mittel- oder Unterschicht vorhanden

## 2.3 Feldaufnahmen

Die Feldaufnahmen beschränkten sich auf die nicht geräumte Windwurffläche in Blegs da Vo. In dieser wurden 25 Plots mit einem Radius von 3.98 m ( $50 \text{ m}^2$ ) gleichmässig verteilt, sodass sie aber immer innerhalb der Windwurffläche lagen (Abbildung 3). Die Abstände der Plotmittelpunkte waren ca. 20 m. Der Kronendeckungsgrad war der einzige Parameter, welcher mit einem Radius von 10 m aufgenommen wurde. Von den Plotmittelpunkten wurden die Koordinaten aufgenommen (Trimble GeoXH DGNS). Die Plots wurden mit einem Aluminiumpfosten markiert, sodass sie bei möglichen, folgenden Aufnahmen wiedergefunden werden können.

Die Feldaufnahme erfolgte zwischen dem 9. und 11. Juli 2019. Das Wetter war über die drei Tage trocken und sonnig. Die gleichen Parameter wurden zu gleicher Zeit für eine andere Bachelorarbeit in einer Vivian-Windwurffläche in Disentis erhoben (Marty, M., 2019). Die Felddaten beider Arbeiten werden für Auswertungen im Rahmen des Doktorats von Natalie Brožová am SLF in Davos verwendet. Die verwendeten Feldprotokolle, sowie die Legende dazu sind im Anhang zu finden.

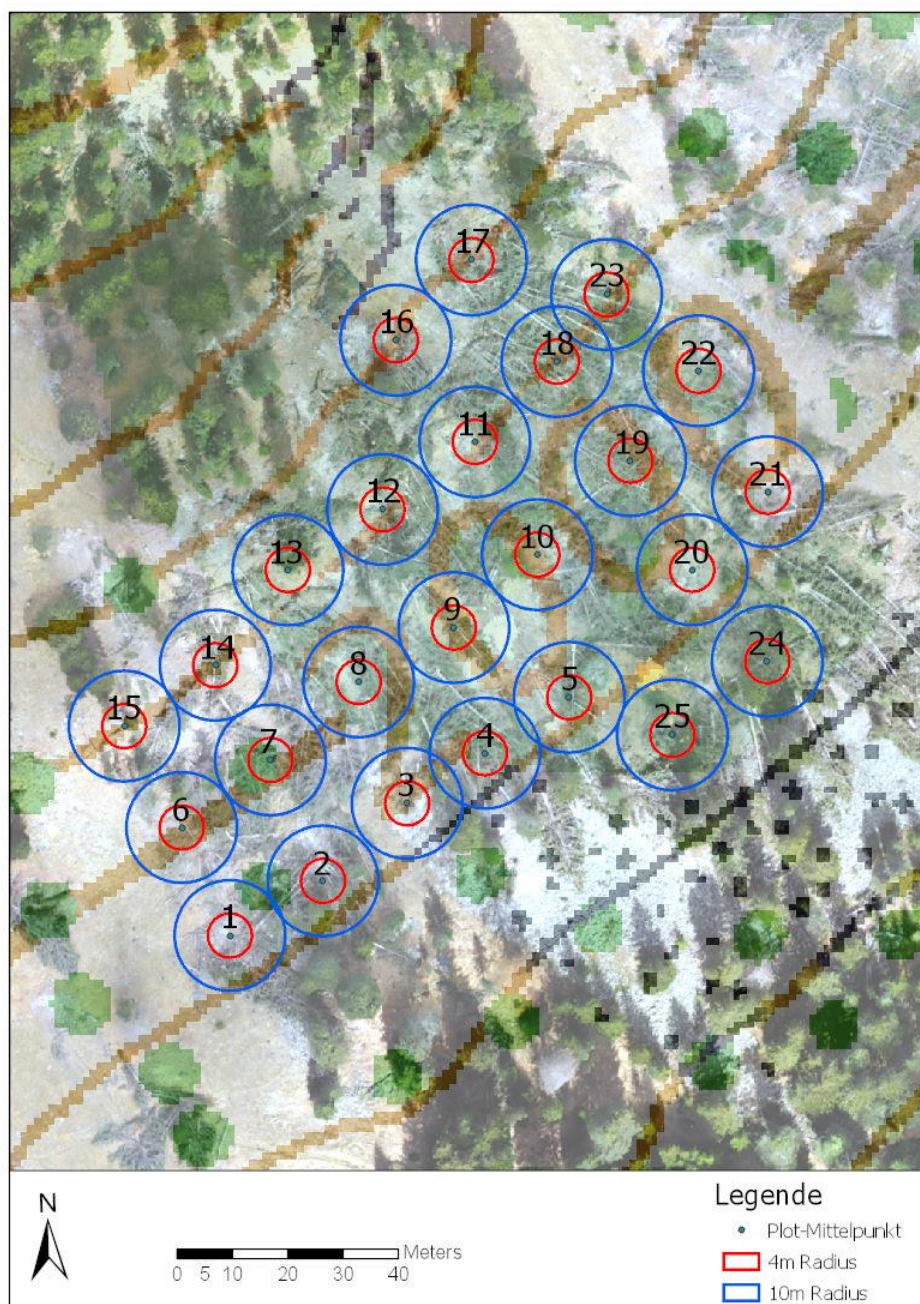


Abbildung 3: Übersichtskarte der Untersuchungsfläche (Blegs da Vo) mit den eingezeichneten Plots

### 2.3.1 Flächenparameter

Es wurden folgende Parameter erhoben:

- Bodenvegetation
- Kronendeckungsgrad
- Totholzdeckungsgrad & Anteil in Höhenkategorien
- Lücken

In jedem Plot wurde der gesamte Deckungsgrad der Bodenvegetation geschätzt und zusätzlich der Anteil der drei am stärksten vertretenen Bodenvegetationstypen aufgenommen. Dies erfolgte ohne Schätzhilfe. Die Vegetationstypen, welche in der Untersuchungsfläche angetroffen und erfasst wurden, sind in Tabelle 3 ersichtlich.

Tabelle 3: Übersicht über die Bodenvegetationstypen gemäss Marty M. (2019)

Abkürzung	Kategorie	Beispiel
G	Gras	Reitgräser ( <i>Calamagrostis sp.</i> )
K	Kräuter	Brennnessel ( <i>Urtica dioica</i> )
M	Moos	
N	nicht bewachsen	
R	Rubus	Himbeere ( <i>Rubus idaeus</i> )
Z	Zwergsträucher	Heidelbeere ( <i>Vaccinium myrtillus</i> )

Zusätzlich wurde der Kronendeckungsgrad und der gesamte Totholzdeckungsgrad im Plot geschätzt und dessen Anteil in die fünf verschiedenen Höhenkategorien (<50 cm, 50-100 cm, 100-150 cm, 150-200 cm und >200 cm) eingeteilt. Die Summe der prozentualen Anteile der verschiedenen Höhenkategorien konnte 100% auch übersteigen, sofern mehrere Kategorien Totholz übereinander lagen.

Zusätzlich wurden auch Lücken in der Untersuchungsfläche erfasst, sofern sie einen Plot beinhalteten oder streiften. Als Lücken galten Flächen, welche hangabwärts eine Mindestlänge von 10 m aufwiesen, auf welchen keine Rauigkeitselemente, welche höher als 50 cm waren, oder Bäume mit einem BHD (Brusthöhendurchmesser) von mehr als 8 cm aufwiesen, vorkamen. Die 10 m wurden gewählt, da dies in Nadelwäldern schon ausreicht, dass eine Lawine anreissen kann (Canadian Avalanche Association, 2016).

### 2.3.2 Verjüngung, stehende Bäume

Es wurden folgende Parameter erhoben:

- Höhe
- BHD
- Verbiss und andere Schäden

Für die Bäume wurde das Azimut mit Hilfe eines Kompasses und die Distanz zum Plotzentrum aufgenommen. Die Bäume wurden in Verjüngung (<130 cm) oder Bäume (>130 cm) eingeteilt. Die Höhe wurde mittels einem Doppelmeter oder dem Lasermessgerät TruPulse 360° Laser Range Finder gemessen. Der BHD wurde mittels einer Kluppe nur bei Bäumen aufgenommen. Zusätzlich wurden Verbiss oder andere Schadenarten gemäss Schönenberger et al. (2005) aufgenommen und mit dem Schadegrad notiert.

### 2.3.3 Wirkhöhen Totholz

Es wurden folgende Parameter erhoben:

- Höhe
- Durchmesser
- Vermoderungsgrad
- Bewegung von Hand
- Verjüngung auf Totholz

Auf jedem Plot wurden vier Totholzelemente aufgenommen. Diese waren zum einen das höchste Element innerhalb des Plots, welches auch ein Wurzelteller oder stehendes Totholz sein konnte, und die

drei am nächsten zum Plotmittelpunkt liegenden Stämme. Diese konnten auch ausserhalb des Plots sein, wenn darin nicht genug Stämme vorhanden waren. Zählte das höchste Element auch zu den drei am nächsten liegenden Stämmen, wurde dieser Stamm doppelt erfasst. Da stehendes Totholz, liegende Stämme und Wurzelteller unterschiedliche Auswirkungen auf die Lawenschutzwirkung haben, wurde die Kategorie vermerkt. Zusätzlich zu den erwähnten Parametern wurde wiederum das Azimut und die Distanz zum Plotzentrum vermerkt. Die Wirkhöhe wurde mittels einem Doppelmeter am nächsten Punkt zum Plotzentrum hangseits (oberhalb des Elements) gemessen. Der Durchmesser wurde bei Stämmen mit einer Kluppe am dickeren Ende des Stammes und bei Wurzeltellern mittels einem Doppelmeter in der mittleren Höhe gemessen. Der Vermoderungsgrad konnte mit Hilfe eines Sackmessers nach Lachat et al. (2019) ermittelt werden. Zusätzlich wurde geprüft ob sich das Totholzelement von Hand bewegen lässt. Ebenfalls wurde jedes Element nach Marty M. (2019) auf Moderholzverjüngung abgesucht. In dieser Untersuchungsfläche konnte jedoch davon ausgegangen werden, dass nicht allzu viel Moderholzverjüngung anzutreffen war, da es sich um eine frische Sturmholzfläche handelt.

## 2.4 GIS-Analyse für Lawenschutzwirkung und deren Veränderung

### 2.4.1 Orthophoto und DOM

Die Auswertung basierte auf einem Orthophoto welches am 07.11.2018 auf der Sturmfläche Blegs da Vo aufgenommen wurde. Dies erfolgte mit einer Drohne des Herstellers senseFly Typ eBee Plus RTK und dem Kameramodell S.O.D.A. (10.6mm). Es wurden insgesamt 133 Bilder von einer durchschnittlichen Höhe von 192 m über Grund aufgenommen. Die Längs- und Querüberlappung der Bilder betrug ca. 70%. Dies führte zu einem Orthophoto mit einer Auflösung von 4 cm. Mittels stereoskopischer Bearbeitung wurde das digitale Oberflächenmodell mit einer Auflösung von 10 cm generiert (Hirt, 2014).

### 2.4.2 Ausrichtung der Stämme

Die während der Feldaufnahme aufgenommenen Stämme, wurden alle im GIS anhand des Orthophotos digitalisiert. Somit konnte das Azimut für jeden Stamm einfach im GIS berechnet werden. Diese Resultate wurden in einem Netzdiagramm dargestellt.

### 2.4.3 Wirkhöhen

Die Analyse bezüglich der Wirkhöhen erfolgte mittels eines Vegetationshöhenmodells (VHM). Dies wurde durch die Subtraktion von DOM (digitales Oberflächenmodell) und DTM (digitales Terrainmodell) generiert. Da die Auflösung des von der Drohnenaufnahme generierten DOM (10 cm) und des von swisstopo benutzten DTM (2 m) nicht gleich war, musste zuerst ein Resampling gemacht werden. Damit die Daten des höher aufgelösten DOM nicht verloren gingen, wurde das DTM einem Resampling mit der bilinearen Methode auf 10 cm unterzogen. Danach wurde mit dem Werkzeug «Raster Kalkulator» das DTM vom DOM abgezogen, was zum Vegetationsmodell führte (Abbildung 4).

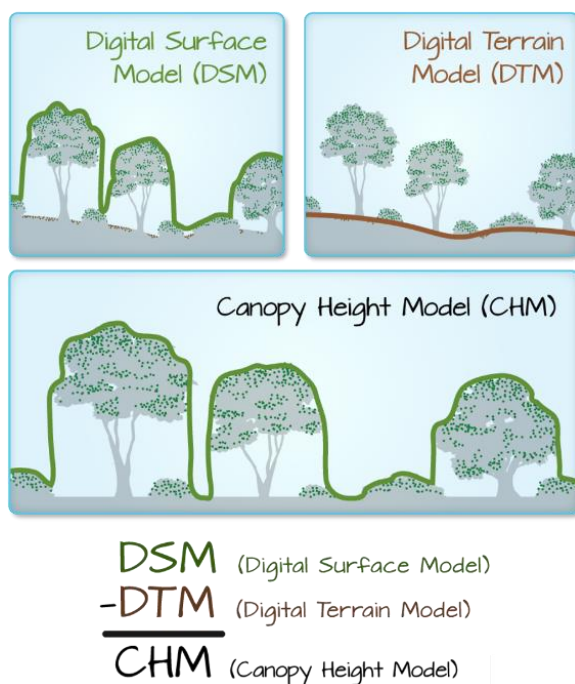


Abbildung 4: Darstellung der verschiedenen Höhenmodelle. Digitales Oberflächenmodell (DOM/ DSM), digitales Terrainmodell (DTM) und das Vegetationshöhenmodell (VHM/CHM) (Wasser, 2019)

Da in der Aufnahme­fläche keine geeigneten Kontroll­flächen wie unbewachsene Strassen oder ein Hausdach vorhanden waren, konnte keine Überprüfung vorgenommen werden. Daher konnte die Genauigkeit des VHM nicht getestet werden und somit ist ein ungewisse Fehlerquelle vorhanden.

Da der Drohnenflug im November 2018 und die Feldaufnahme erst im Juli 2019 stattgefunden hat, konnte auch keine Verifizierung mit den Felddaten gemacht werden. Die berechneten und gemessenen Höhen dienten ausschliesslich zur Analyse der Veränderung über den Winter. Da im Vegetationshöhenmodell nur die höchsten Elemente angezeigt werden konnten, wurden auch nur diese Höhen miteinander verglichen. Für die Lawinenschutz­wirkung wurden drei Klassen ( $< 1.75\text{ m}$ ,  $< 2.62\text{ m}$ ,  $> 2.62\text{ m}$ ) ausgeschieden (Kap. 2.5). Jedoch wurden bei der Fernerkundungs­Analyse nicht nur jeweils vier Elemente pro Plot miteinbezogen, sondern die ganze Fläche der Plots. Da bezüglich dem Anriss von Lawinen auf einer Fläche nicht nur die Höhe von Bedeutung ist, wurde mit diesen drei Kategorien auch eine Übersichtskarte vom Perimeter erstellt, wie sich die Elemente in der Fläche verteilen. Lücken bei einer Hang­neigung von  $>45^\circ$  sollten bei minimaler Anforderung nicht mehr als 30 m lang sein. Falls sie länger sind, sollte die Breite 15 m nicht überschreiten (Frehner et al., 2005). Da die Sollhöhe nicht wie in NaiS 2-mal der Schneehöhe entsprach, sondern nur 1.5-mal (Kapitel 2.5), wurde die Breite auf 10 m festgelegt. Somit wurden Lücken zwischen Elementen, die höher als 2.62 m bzw. 1.75 m waren und mindestens 30 m Länge und 10 m Breite hatten, in der Karte visuell dargestellt.

Mit einer Reklassifizierung des VHM wurde ein Polygon erstellt, welches nur noch die Flächen der Elemente die tiefer waren als 2.62 m bzw. 1.75 m beinhalteten. Da das Hauptkriterium 30 m Länge in Hang­richtung war, wurden manuell Polygone über die ganze Länge der Untersuchungs­fläche mit einer Breite von 5 m gezeichnet. Somit unterteilte sich die Fläche in mehrere kleinere Polygone mit den Attributen Umfang und Fläche, welche sich für das weitere Bearbeiten besser eigneten. Zusätzlich wurde ein neues Attribut «mittlere Länge» ( $(\text{Umfang} - 10) / 2$ ) erstellt. Mittels dieser Attribute konnte eine Selektion der Polygone ( $<50\text{ m}^2$  und  $<24\text{ m}$  Länge) gemacht werden, die nicht weiter berücksichtigt wurden. Da die Polygone nur selten eine gerade Kante aufwiesen und somit die mittlere Länge nur selten der realen Länge entsprach, musste eine manuelle Nachbearbeitung gemacht werden. Sofern zwei Polygone von 5 m Breite mit einer Länge von 24 m nebeneinander lagen, erreichten sie das Kriterium und wurden in der Karte vermerkt. In der Analyse wurde mit 24 m gearbeitet, da die horizontale Länge und nicht die Hanglänge gemessen wurde. Diese 24 m wurden mittels Trigonometrie und der Hang­neigung von  $37.5^\circ$  (ungefähre Hang­neigung über die ganze Fläche) berechnet. ( $\cos(37.5^\circ) \times 30\text{ m} = 24\text{ m}$ ).

## 2.5 Berechnung der relevanten Höhen

Für die Berechnung der relevanten Schneehöhe in der Untersuchungs­fläche, wurden die Messdaten der Extremwertstatistik der SLF-Vergleichsstation «Bergün» auf 1380 m ü.M. verwendet. Diese ist die nahegelegenste Station der Untersuchungs­fläche in Blegs da Vo und weist eine maximale Schneehöhe mit einer 100-jährigen Wiederkehrperiode von 127 cm auf (Marty, C., 2019). Die Berechnung der Schneehöhe mit einer 30-jährlichen Wiederkehrperiode auf der Untersuchungs­fläche erfolgte nach dem Leitfaden «Berücksichtigung der Lawinen- und Schneedruck­gefährdung bei Seilbahnen», Anhang A.4 (Margreth et al., 2015). Das Untersuchungsgebiet Blegs da Vo liegt im Mittel auf 2000 m ü.M. und ist somit um 620 m höher als die Messstation in Bergün. Der Gradient von 17.25 cm pro 100 m Höhen­unterschied konnte mit Hilfe des hydrologischen Atlas der Schweiz (Tafel 3.2) festgelegt werden (Martinec et al., 2019). Für die Anpassung bezüglich der Exposition und Hang­neigung wurde der Mittelwert von 0.8 (Südsektor und Hang­neigung  $> 15^\circ$ ) und 1.0 (Ost- und Westsektor mit Hang­neigung  $> 15^\circ$ ) also 0.9 genommen, da die Untersuchungs­fläche südöstlich ausgerichtet ist. Für Lawinen, welche im Wald entstehen, wird eine mittlere Wiederkehrdauer von 30 Jahren angenommen, da in den meisten Fällen Lücken wieder soweit zuwachsen, dass keine Waldlawinen mehr entstehen können (Frehner et al., 2005). Mit dem Faktor 0.83 konnte die 100-jährliche maximale Schneehöhe auf eine Wiederkehrperiode von 30 Jahren umgerechnet werden. Somit ergab dies in Blegs da Vo eine maximale Schneehöhe mit einer Wiederkehrdauer von 30 Jahren von 1.75 m (Tabelle 4).

Der BSH-Faktor (Baum-Schneehöhen Faktor) ist ein relevantes Kriterium zur Lawinenschutz­wirkung. Laut Frehner et al. (2005) leisten Bäume einen positiven Beitrag gegen das Anreissen von Lawinen, wenn sie die Schneehöhe um mindestens das Doppelte überragen. Da dieser Leitfaden aber hauptsächlich auf die intakten Schutzwälder ausgelegt ist, ist dieser Wert für die Einschätzung von Wind­wurfflächen deutlich zu hoch. Somit wurde in dieser Arbeit mit dem Faktor 1.5-mal der Schneehöhe gerechnet wie Bebi et al. (2015). Dies entsprach einer Sollhöhe von 2.62 m.

Tabelle 4: Berechnung der maximale Schneehöhe mit einer 30-jährlichen Wiederkehrperiode nach Margreth et al., 2015)

<b>Meereshöhen</b>		
Messstation Bergün	1380 m ü.M.	
Untersuchungsfläche Blegs da Vo	2000 m ü.M.	mittlere Höhe der Plots
Differenz	620 m	
<b>Schneehöhe 100-jährlich</b>		
Messstation Bergün	127 cm	+/-18%
Korrekturfaktor	17.25 cm/100 m	nach HADES Tafel 3.2
Untersuchungsfläche Blegs da Vo	234 cm	
<b>Exposition &amp; Hangneigung</b>		
Korrekturfaktor	0.9	SW > 15°
Untersuchungsfläche Blegs da Vo	210.5 cm	
<b>Schneehöhe 30-jährlich</b>		
Korrekturfaktor	0.83	
<b>Untersuchungsfläche Blegs da Vo</b>	<b>175 cm</b>	
<b>Sollhöhe der Elemente</b>		
Faktor	1.5	
<b>Sollhöhe der Elemente</b>	<b>262 cm</b>	

## 2.6 Auswertung der Daten

Die Darstellung der Daten erfolgte mit Microsoft Excel (Version 2016), R Studio (Version 1.2.1335) und ArcGIS Pro (Version 2.3.0) der Firma ESRI. Die statistische Auswertung erfolgte nur mit R Studio. Zuerst wurde mit dem Shapiro-Test geprüft, ob die Werte normalverteilt waren. Als Alpha-Wert wurde 0.05 festgelegt. Lag der Wert über 0.05 konnte die Nullhypothese (Normalverteilung) angenommen werden. War der p-Wert unter dem Alpha-Wert musste diese abgelehnt und die Alternativ-Hypothese (nicht normalverteilt) angenommen werden. In dieser Arbeit waren keine Datensätze normal verteilt. Daher wurde für die Berechnung der Korrelation die Spearman-Methode (rho-Wert) und für die Signifikanz der Wilcoxon-Test (p-Wert) verwendet. Zur Auswertung der Signifikanz wurde der Alpha-Wert ebenfalls auf 0.05 festgelegt (Tabelle 5)

Tabelle 5: Bedeutung der Signifikanz zur Interpretation der statistischen Auswertung

<b><math>\alpha</math>-Wert</b>	<b>Signifikanz</b>
> 0.05	nicht signifikant (ns)
< 0.05	signifikant (*)
< 0.01	hoch signifikant (**)
< 0.001	höchst signifikant (***)

### 3 Resultate

#### 3.1 Betroffenheit der Waldteile durch den Sturm Vaia

##### 3.1.1 Kronenschlussgrad

Es gab eine sehr unterschiedliche Betroffenheit der verschiedenen Kronenschlussgrade. Über das gesamte Untersuchungsgebiet waren die lockeren Bestände am meisten vertreten. Gefolgt von den aufgelösten, gedrängt/normalen und schliesslich den räumigen Schlussgradbeständen, welche den geringsten Anteil vom Gesamtgebiet ausmachten. Von den 290 ha Wald wurde mehr als  $\frac{1}{8}$  (13.4%) durch den Sturm Vaia beschädigt.

Tabelle 6: Übersicht der Kronenschlussgrade mit ihren Anteilen im Untersuchungsgebiet sowie an den Windwurfflächen

Kronenschlussgrad	Fläche (ha) Untersuchungsgebiet	Fläche (ha) Windwurf	Anteil Windwurf in (%)
gedrängt/normal	67.8	4.7	6.9
locker	93.6	14.4	15.4
räumig	59.3	10.5	17.7
aufgelöst	70.1	9.4	13.4
<b>TOTAL</b>	<b>290.8</b>	<b>39</b>	<b>13.4</b>

Je nach Kronenschlussgrad wurden die Wälder unterschiedlich stark vom Sturm Vaia beschädigt (Abbildung 5; Tabelle 6). Der lockere Schlussgrad hatte den grössten Anteil an den Windwurfflächen. Es ist jedoch der räumige Kronenschlussgrad welcher gegenüber dem Wind am anfälligsten war. Die aufgelösten Bestände entsprachen genau dem erwarteten Wert, wobei sich die gedrängten/normalen Schlussgradbestände gegenüber dem Sturm Vaia sehr widerstandsfähig zeigten. Von diesen wurde nur etwas über die Hälfte der zu erwartenden Fläche betroffen. Die lockeren Schlussgrade wiesen hingegen ebenfalls eine erhöhte Anfälligkeit gegenüber dem Sturm auf.

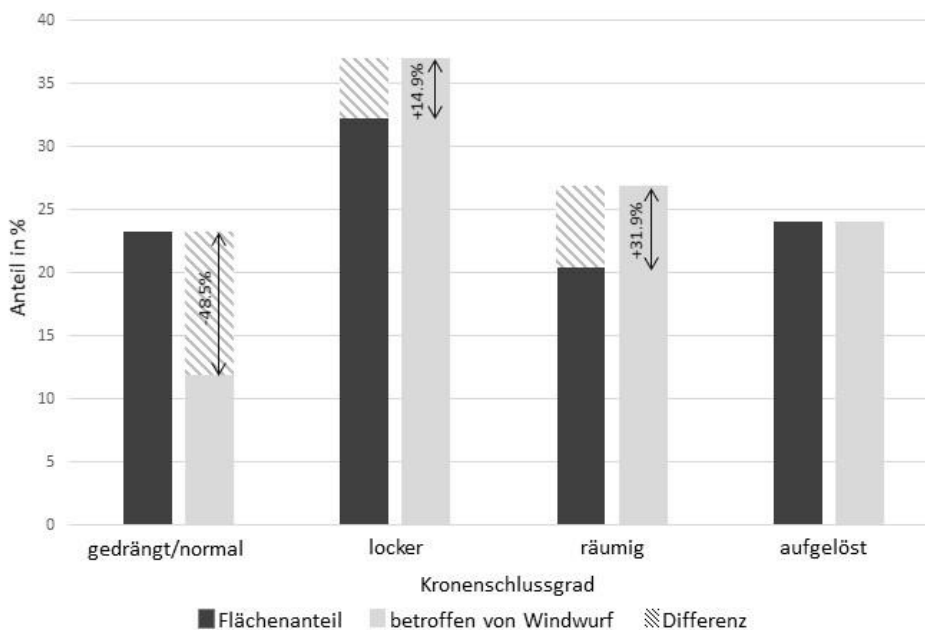


Abbildung 5: Betroffenheit der verschiedenen Kronenschlussgrade; dunkelgrau ist die Säule des Flächenanteils an der Gesamtfläche. Dies entspricht ebenfalls dem Erwartungswert für die Windwurfflächen. Als Prozentzahl wird die Abweichung der eingetroffenen Werte gegenüber diesem Erwartungswert beschrieben. Ein positiver Wert beschreibt eine höhere Anfälligkeit gegenüber dem Sturmtief Vaia, wobei ein negativer Wert eine erhöhte Resistenz gegenüber dem Windwurf entspricht.

### 3.1.2 Waldstrukturen

Bei den Bestandesstrukturen konnte ebenfalls ein Unterschied bezüglich der Anfälligkeit gegenüber Vaia beobachtet werden. Die stufigen Strukturen waren mit Abstand am häufigsten vertreten. Danach folgten die ein- und zweischichtigen Bestände. Den geringsten Anteil hatten die plenterartigen Strukturen (Tabelle 7).

Tabelle 7: Übersicht der Waldstrukturen mit ihren Anteilen im Untersuchungsgebiet sowie an den Windwurfflächen

Struktur	Fläche (ha) Untersuchungsgebiet	Fläche (ha) Windwurf	Anteil in %
einschichtig	54.7	4.8	8.8
plenterartig	10.3	0.7	6.8
stufig	108.1	13.3	12.3
zweischichtig	38.9	2.3	6
<b>TOTAL</b>	<b>212</b>	<b>21.1</b>	<b>10</b>

Den mit Abstand grössten Anteil an den Windwurfflächen besaßen die stufigen Bestände. Sie wiesen auch den grössten Anteil am Wald auf und waren dazu noch die einzige Struktur, welche gegenüber Vaia mehr betroffen waren als der Erwartungswert (Abbildung 6). Die zweischichtigen und die plenterartigen Waldstrukturen waren gegenüber Windschaden ziemlich widerstandsfähig. Die einschichtigen Strukturen entsprachen bezüglich Sturmresistenz gegenüber Vaia beinahe dem Erwartungswert, lagen aber auch noch leicht darunter.

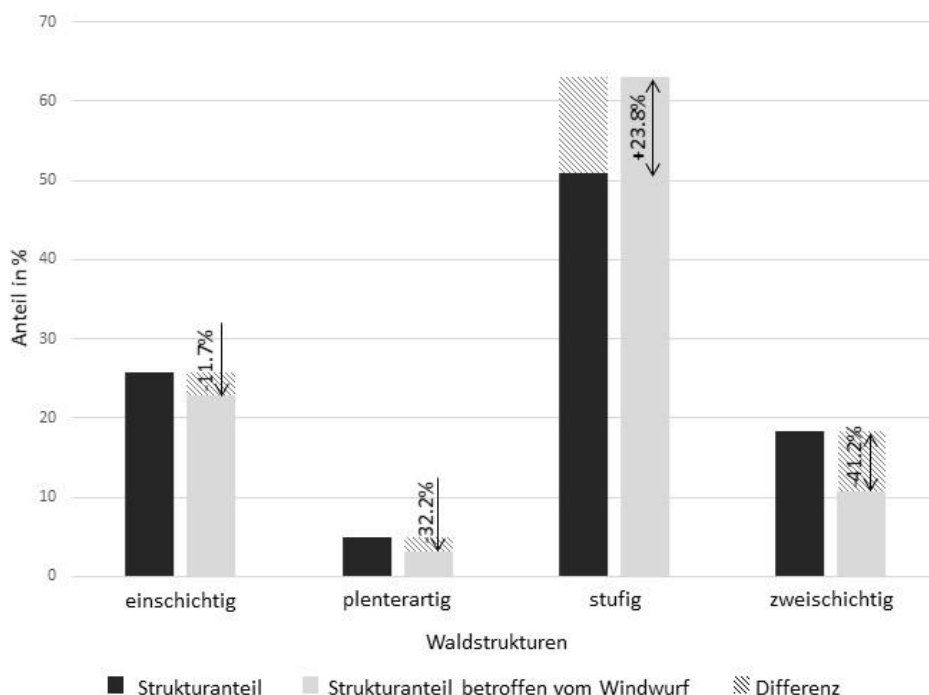


Abbildung 6: Betroffenheit der verschiedenen Waldstrukturen; dunkelgrau ist die Säule des Flächenanteils an der Gesamtfläche. Dies entspricht ebenfalls dem Erwartungswert für die Windwurfflächen. Als Prozentzahl wird die Abweichung der eingetroffenen Werte gegenüber diesem Erwartungswert beschrieben. Ein positiver Wert beschreibt eine höhere Anfälligkeit gegenüber dem Sturmtief Vaia, wobei ein negativer Wert eine erhöhte Resistenz gegenüber dem Windwurf entspricht.

### 3.1.3 Baumarten

Mit 80% Anteil war die Fichte mit Abstand am meisten vertreten. Darauf folgte die Arve mit ca. 16% und die Lärche mit 3%. Der Rest teilte sich auf verschiedene Baumarten wie Berg-, Waldföhre und Vogelbeere auf. Diese restlichen Baumarten, welche zusammen rund 1% ausmachten, wurden wegen ihrem geringen Anteil nicht in der Auswertung berücksichtigt.

Mit einem Anteil von 97% war die Fichte die Baumart im Untersuchungsgebiet, welche mit Abstand am meisten vom Sturm Vaia beschädigt wurde (Abbildung 7). Die restlichen 3% des Sturmholzes teilen sich die Arve und die Lärche. Die 93% welche die Arve vom Erwartungswert abweicht zeigt, dass diese noch resistenter gegenüber dem Windwurf war als die Lärche.

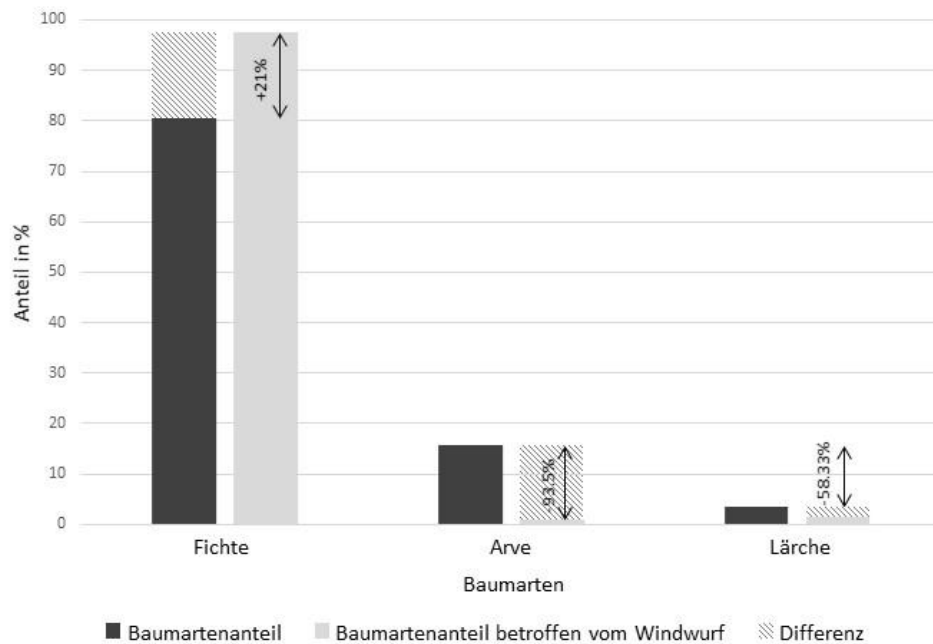


Abbildung 7: Betroffenheit der verschiedenen Baumarten; dunkelgrau ist die Säule des Flächenanteils an der Gesamtfläche. Dies entspricht ebenfalls dem Erwartungswert für die Windwurfflächen. Als Prozentzahl wird die Abweichung der eingetroffenen Werte gegenüber diesem Erwartungswert beschrieben. Ein positiver Wert beschreibt eine höhere Anfälligkeit gegenüber dem Sturmtief Vaia, wobei ein negativer Wert eine erhöhte Resistenz gegenüber dem Windwurf entspricht.

## 3.2 Flächenparameter

### 3.2.1 Deckungsgrad

Der Deckungsgrad der Bodenvegetation war über alle 25 Plots gesehen sehr unterschiedlich (Abbildung 8). Von Plots mit einem hohen Anteil an Blockschutt (Plot 3) bis hin zu dicht bewachsenen Wiesenflächen (Plot 21) war alles vorhanden. Auch beim Totholz war die Variabilität mit 5 - 80% sehr gross. Beim Kronendeckungsgrad zeigte sich jedoch ein anderes Bild. Über die gesamte Untersuchungsfläche hatte es nach dem Sturm nur noch einen geringen Anteil von stehenden Bäumen. Auf insgesamt 19 Plots wurde ein Deckungsgrad von weniger als 5% bestimmt. Der maximale Kronendeckungsgrad wurde bei Plot 25 mit 20% angegeben.

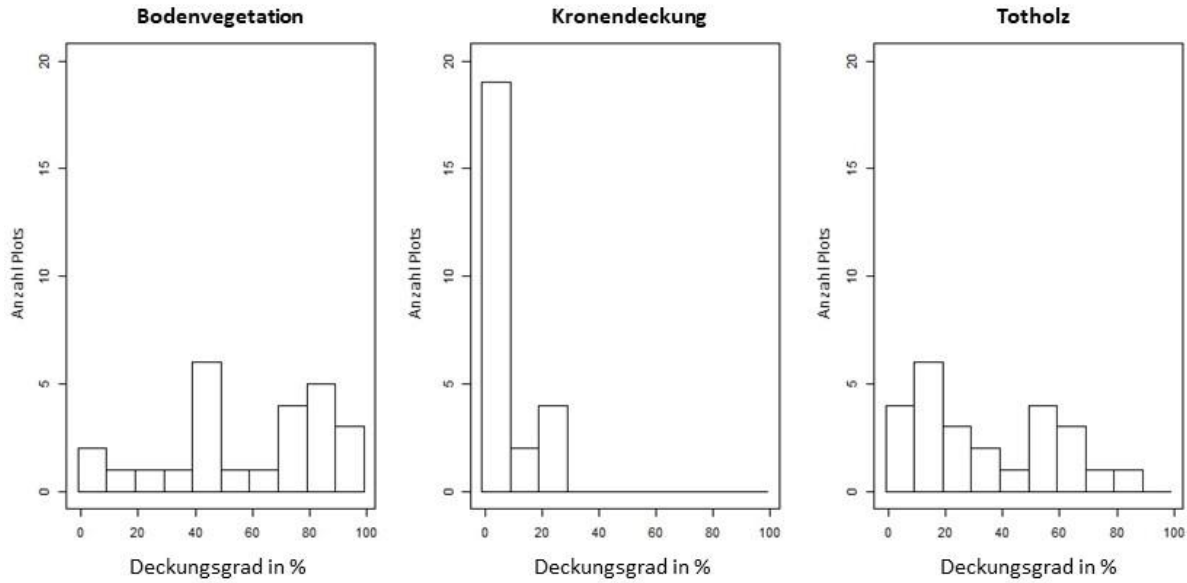


Abbildung 8: Häufigkeitsverteilung der Deckungsgrade aller 25 Plots aufgeteilt in Bodenvegetation, Baumkronen und Totholz.

### Bodenvegetation

Der Typ Vegetationsfrei war am häufigsten vertreten (Abbildung 9). Im Durchschnitt war 44% der Plotfläche nicht bewachsen. In allen Plots zählte aber auch das Gras zu den drei häufigsten Vegetationstypen. In 11 Plots machte das Gras den höchsten Anteil der Bodenvegetation aus. Im Durchschnitt war es mit einem Deckungsgrad von 43% vertreten und somit nur geringfügig weniger vertreten als die vegetationsfreien Flächen. Die Kräuter waren in 17 Plots unter den drei am stärksten vertretenen Typen. Jedoch waren sie nie sehr dominant und erreichten nur einen durchschnittlichen Deckungsgrad von 20% über die 17 Plots. Die Zwergsträucher waren über 5 Plots mit einem durchschnittlichen Deckungsgrad von 17% vorzufinden. Moose wurde in 3 Plots mit einem Durchschnittswert von 37% und Himbeeren in 2 Plots mit durchschnittlich 10% Deckungsgrad nachgewiesen.

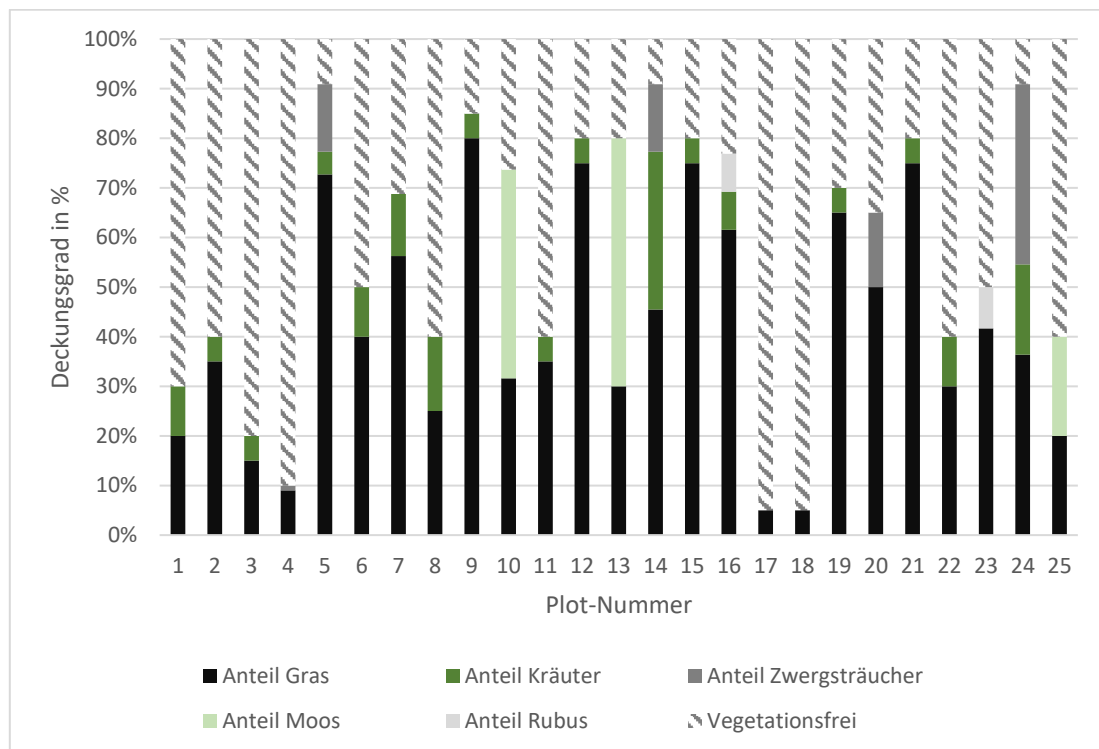


Abbildung 9: Übersicht über den Deckungsgrad der Bodenvegetation aller Plots. Zusätzlich wurden pro Plot die drei häufigsten Bodenvegetationstypen erfasst.

### Totholzdeckungsgrad

Totholz konnte in allen Plots ausser in Nummer 20 gefunden werden. Der durchschnittliche Deckungsgrad über alle Plots gesehen lag bei 31%. Mit einer ganz schwachen negativen Korrelation (rho-Wert: -0.151) zeigt Abbildung 11 auf, dass der Deckungsgrad des Totholzes in flacherem Gelände zunimmt. Wird die Hangneigung steiler, nimmt der Deckungsgrad ab. Zusätzlich wurde das Totholz in 5 Höhenklassen aufgeteilt (Abbildung 10). Da die verschiedenen Schichten alle einzeln beurteilt wurden, konnte die Summe der verschiedenen Höhenklassen 100% übersteigen, wenn viel Totholz übereinander lag. Mit einem durchschnittlichen Anteil von 31% war die Höhenklasse 50-100 cm vertreten. Mit 26% folgte die tiefste Stufe (<50 cm). Die Höhenklasse 100 - 150 cm war im Schnitt mit 21% vertreten. Die beiden höchsten Klassen machten mit durchschnittlich je 12% einen kleineren Anteil vom gesamten Totholz aus. Auf sieben Plots lag so viel Totholz aufeinander, dass der Deckungsgrad der verschiedenen Schichten addiert über 100% ergab.

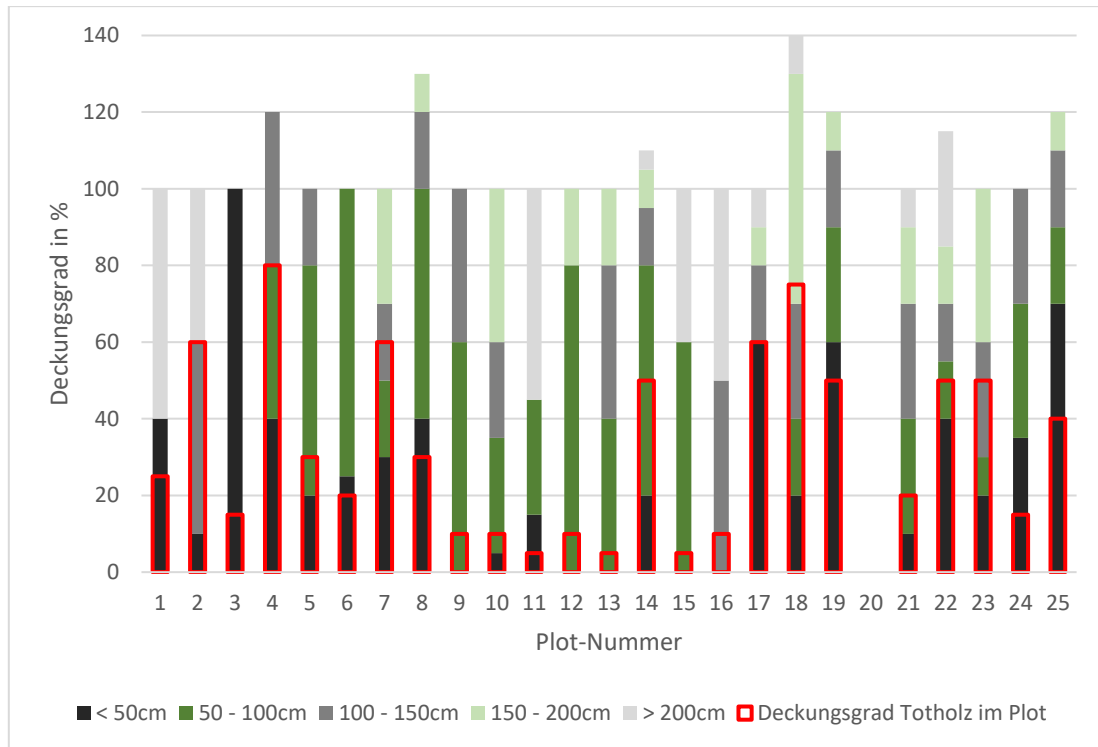


Abbildung 10: Übersicht über den Deckungsgrad des Totholzes aller Plots. Die rot umrandete Säule stellt den Deckungsgrad des Totholzes im Plot dar, wobei die 50 m<sup>2</sup> als 100% angenommen wurden. Die graue Säule zeigt die addierten Deckungsgrade der verschiedenen Höhenklassen, welche zusammen über 100% ergeben konnten, sofern genügend Totholz übereinander lag.

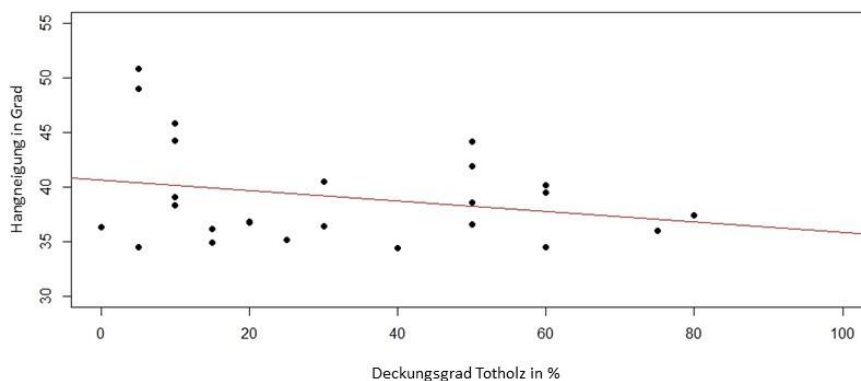


Abbildung 11: Zusammenhang zwischen Hangneigung und dem Totholzdeckungsgrad. (rho-Wert: -0.151)

### 3.2.2 Lücken

In 9 von 25 Plots konnten Lücken (Kriterium siehe Methode 2.3.1) nachgewiesen werden. Jedoch gab es keinen signifikanten Unterschied ob Lücken in steileren oder flacheren Hängen vermehrt vorkamen ( $p$ -Wert: 0.452; Abbildung 12).

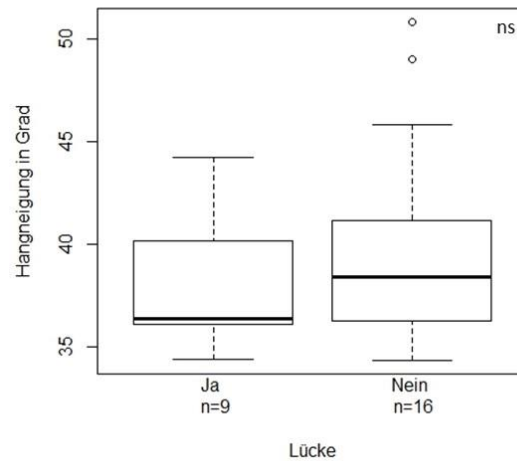


Abbildung 12: Boxplot der Hangneigung und Lücken. Der Unterschied ist jedoch nicht signifikant ( $p$ -Wert: 0.452)

Von den neun Plots die Lücken aufwiesen, war die durchschnittliche Länge 24 m und die Breite 11 m. Die längste Lücke lag im Plot 3 mit 50 m, Plot 16 wies eine Lücke von 41 m auf. Die restlichen Längen lagen alle im Bereich zwischen 10 und 20 Meter. Die breiteste Lücke stellte Plot 1 mit 22 m, wobei die längste Lücke eine Breite von 20 m aufwies. Die weiteren Lückenbreiten reichten von 3 – 13 m. Zwischen der Lückenlänge und -breite konnte eine hohe Korrelation ( $\rho$ -Wert: 0.985) nachgewiesen werden (Abbildung 13). Das heisst, umso länger eine Lücke, desto breiter war diese auch.

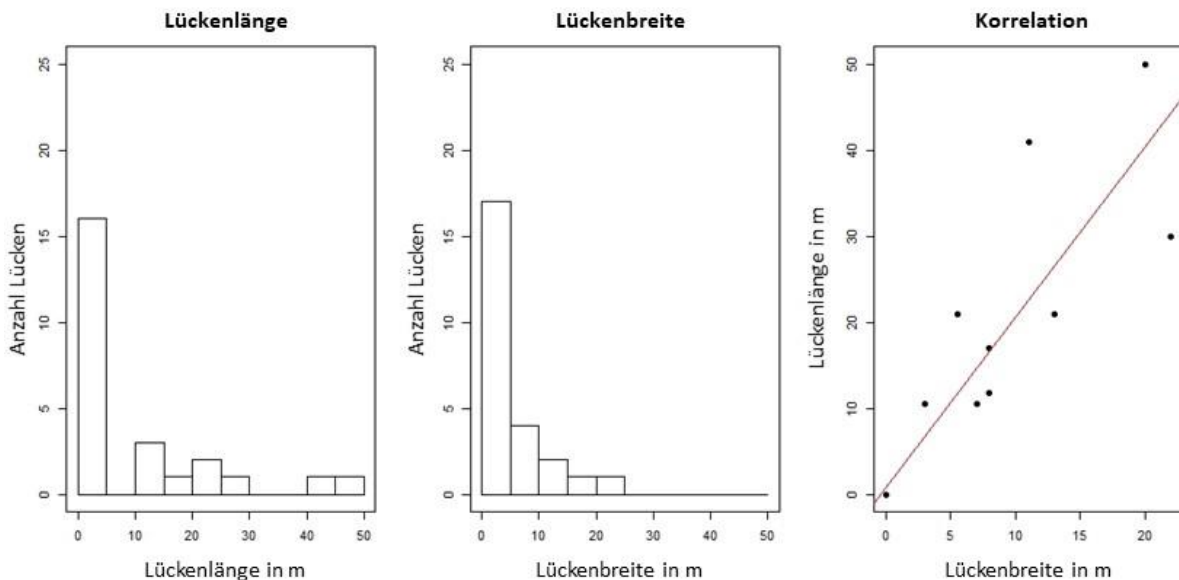


Abbildung 13: Links und in der Mitte ist die Häufigkeitsverteilung der Lückenlängen, bzw. -breiten zu sehen. In der rechten Box ist der Zusammenhang zwischen der Lückenlänge und -breite zusehen. Es gibt eine positive Korrelation, dass längere Lücken auch eine grössere Breite aufweisen ( $\rho$ -Wert: 0.985).

### 3.2.3 Vorverjüngung und Bäume

Insgesamt waren auf der Sturmfläche sehr wenig Bäume stehen geblieben. Auch Vorverjüngung konnte nur selten gefunden werden. Auf den 25 Plots konnten lediglich eine Fichte, eine Vogelbeere und zwei Arven die kleiner als 1.3 m waren aufgenommen werden (Tabelle 8). Von diesen vier Jungbäumen waren drei im selben Plot anzutreffen. Der durchschnittliche BHD über die elf Bäume betrug 12 cm bei einer Höhe von 4.4 m. Es wurden sieben Arven und vier Fichten als Baum protokolliert. Bei den Bäumen wurden Verbissspuren ausschliesslich bei den Fichten nachgewiesen. Bei der Vorverjüngung waren die Fichte und die Vogelbeere beide verbissen. Insgesamt wurden bei  $\frac{1}{3}$  der aufgenommenen Bäume/Vorverjüngung Verbissspuren nachgewiesen. Es konnten auch andere Schadenarten wie Steinschlag, aber vor allem auch Schaden durch andere umgefallene Bäume, welche sehr wahrscheinlich vom Sturm Vaia herrührten, beobachtet werden. Bei 80% aller aufgenommenen Individuen wurden Schadensspuren wie Verbiss oder andere Schadenarten nachgewiesen.

Tabelle 8: Übersicht über die Vorverjüngung und die Bäume welche in den Plots (4 m Radius) vorhanden waren. V.beere ist die Abkürzung für Vogelbeere (*Sorbus aucuparia*)

Plot Nr.	Baumart	Höhe (m)	BHD (cm)	Verbiss	Verbiss Grad	andere Schäden	andere Schäden Grad	Bezeichnung
5	Arve	6.2	49	Nein	0	Ja	3	Baum
9	Fichte	2.3	3	Ja	3	Nein	0	Baum
9	Arve	5.8	9	Nein	0	Nein	0	Baum
10	Fichte	1.25	-	Ja	3	Nein	0	Vorverjüngung
10	Fichte	4.4	5	Ja	4	Nein	0	Baum
10	Fichte	5.5	13	Ja	1	Nein	0	Baum
12	V.beere	0.55	-	Ja	2	Nein	0	Vorverjüngung
12	Arve	1.2	-	Nein	0	Ja	3	Vorverjüngung
12	Arve	0.4	-	Nein	0	Nein	0	Vorverjüngung
12	Arve	1.6	2	Nein	0	Ja	3	Baum
12	Arve	1.9	3	Nein	0	Ja	1	Baum
15	Arve	1.8	3	Nein	0	Ja	3	Baum
15	Arve	6.1	12	Nein	0	Ja	1	Baum
24	Arve	9.6	24	Nein	0	Nein	0	Baum
24	Fichte	4	7	Nein	0	ja	1	Baum

### 3.3 Lawinenschutz (Parameter für den Lawinenschutz?)

#### 3.3.1 Ausrichtung der Stämme

Es lagen 80% der Stämme hangabwärts innerhalb von 90 Grad zur Falllinie (Abbildung 14 & 15). Das heisst, innerhalb eines Azimuts von 90°-180° (Abbildung 14 & 15). Von den restlichen 20%, was 15 Stämme ausmachte, lagen zwei auch in Hangrichtung, zeigten aber hangaufwärts. Die restlichen 13 Stämme (18%) lagen quer zur Hangrichtung im Bereich von 0 - 90 bzw. 180 - 270 Grad.

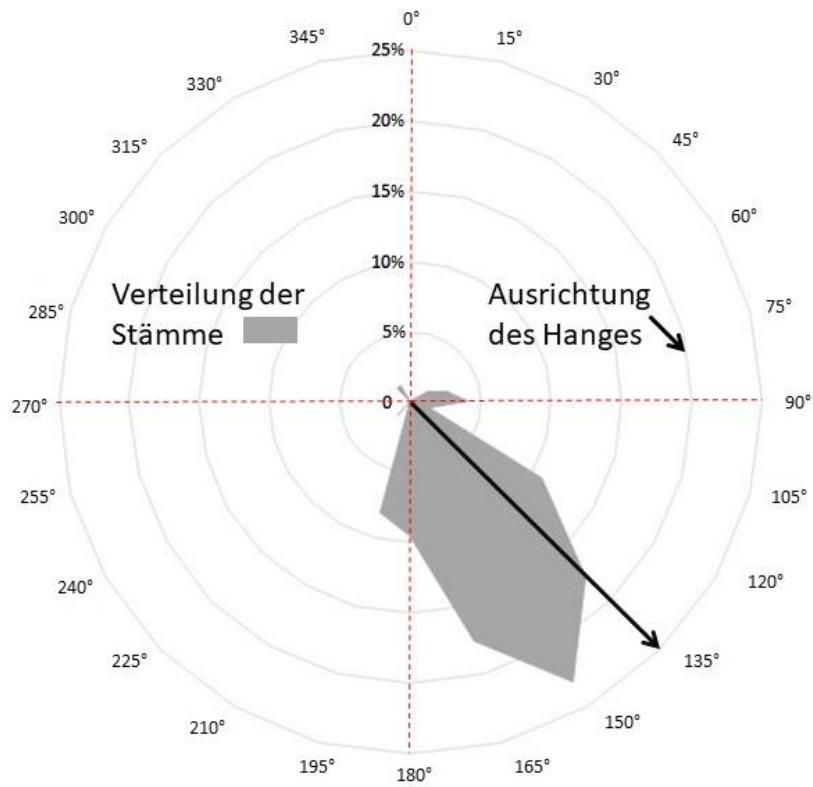


Abbildung 14: Ausrichtung der liegenden Stämme; Die Exposition des Hanges ist südwestlich (135°) und die 0° Grad entsprechen Norden. Der innere Kreis gibt an, wieviel Prozent der Stämme in welche Richtung schauen.

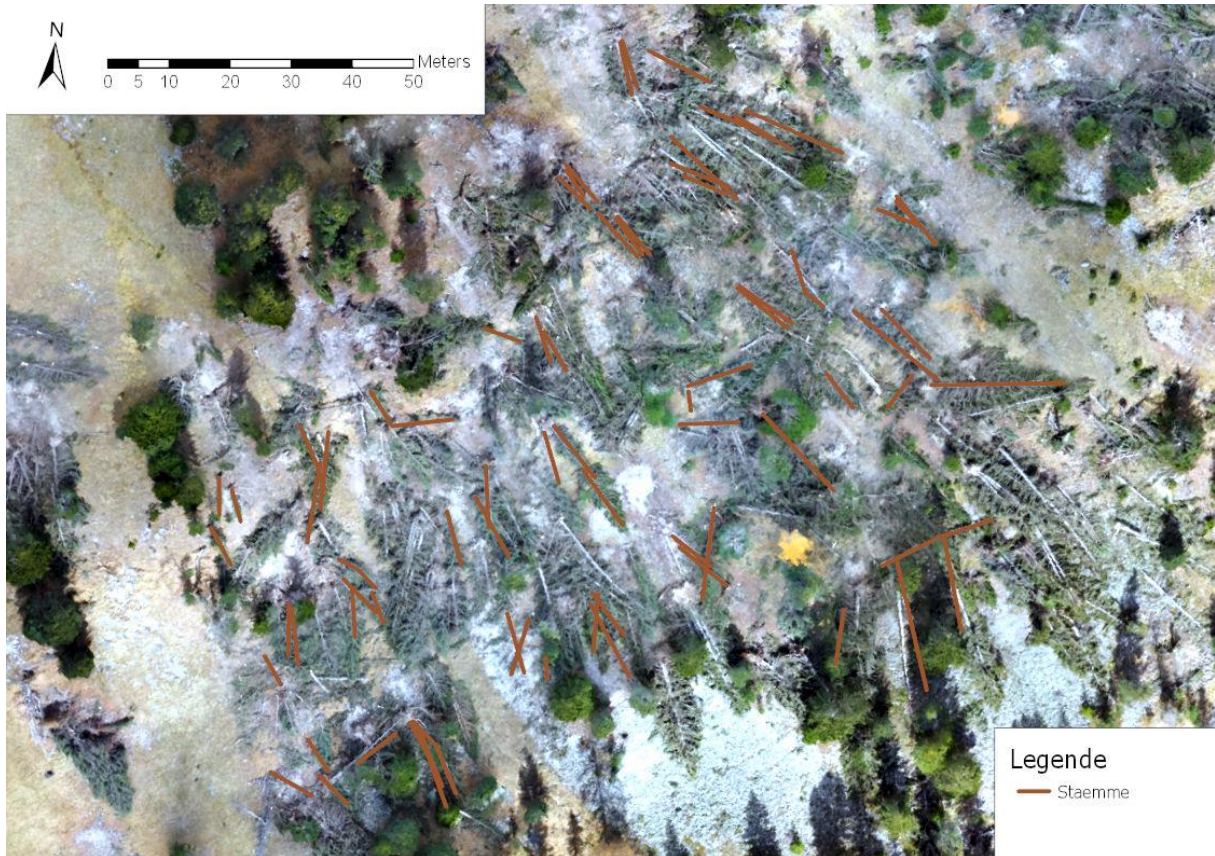


Abbildung 15: Orthofoto mit den digitalisierten Stämmen. Es ist gut sichtbar, dass die meisten Stämme in Falllinie liegen

### 3.3.2 Wirkhöhen

Es wurden zwei noch stehende Totholzbäume von 3.3 m und 10 m Höhe gefunden, welche die Sollhöhe überschritten, jedoch nur einen geringen Durchmesser von 15 bzw. 19 cm aufwiesen. Die durchschnittliche Höhe der liegenden Stämme lag bei 1.1 m und somit unterhalb der Schneehöhe. 85% der Stämme lagen unterhalb der maximalen Schneehöhe und unterhalb der Sollhöhe waren es sogar 92%. Nur 7 Stämme waren höher als die 2.62 m. Der durchschnittliche Durchmesser bei den liegenden Stämmen lag bei 35.7 cm. Ein Zusammenhang zwischen der Wirkhöhe und dem Durchmesser der liegenden Stämme konnte nicht nachgewiesen werden ( $\rho$ -Wert: 0.156; Abbildung 17). Bei den Wurzeltellern waren alle gemessenen Elemente höher als 1.75 m, aber nur 57% erreichten die Sollhöhe. Jedoch wiesen sie im Schnitt eine Breite von 2.9 m auf. Werden alle Elemente zusammen betrachtet, waren es 23% welche bei einer maximalen Schneehöhe mit 30-jährlichen Wiederkehrperiode höher waren als die Schneedecke. Die Sollhöhe wurde aber nur von 12% aller Elemente erreicht.

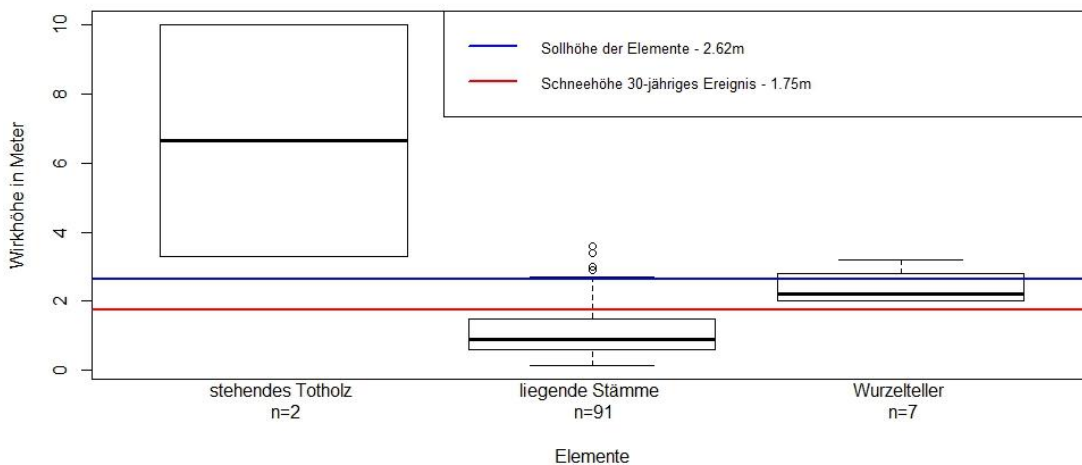


Abbildung 16: Boxplots der Wirkhöhen der verschiedenen Rauigkeitselemente (stehendes Totholz, liegende Stämme und Wurzelteller). Zusätzlich sind die maximale Schneehöhe mit 30-jähriger Wiederkehrperiode (rote Linie) und die Sollhöhe (blaue Linie) während eines solchen Ereignisses vermerkt.

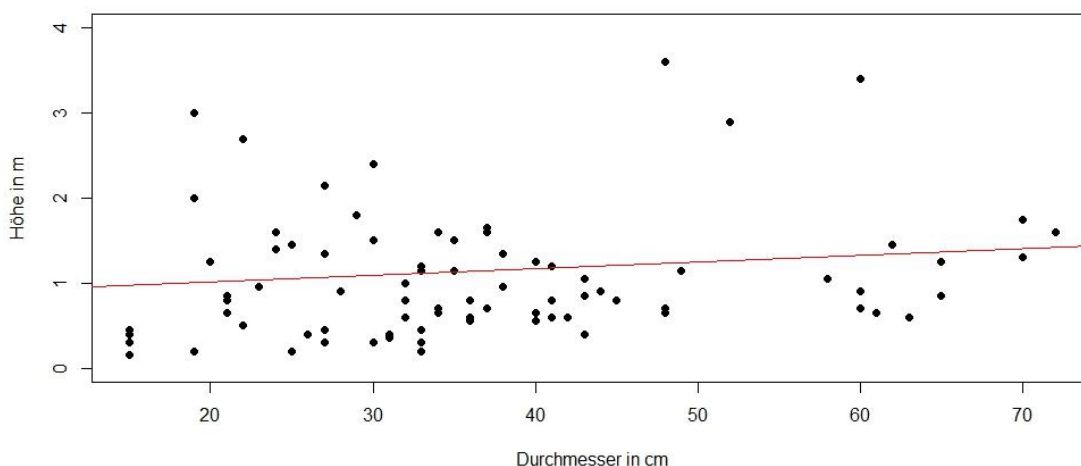


Abbildung 17: Zusammenhang zwischen der Wirkhöhe und dem Stammdurchmesser der liegenden Stämme ( $\rho$ -Wert: 0.156)

### 3.3.3 Wirkhöhen mit Fernerkundung

Die 25 Plots zusammen ergaben eine Untersuchungsfläche von 1250 m<sup>2</sup>. Auf einer Fläche von 113 m<sup>2</sup> wurde eine Mindesthöhe von 2.62 m erreicht, was 9% der Fläche aller Plots entsprach (Abbildung 18). Auf 231 m<sup>2</sup> lag die Wirkhöhe zwischen 1.75 m und 2.62 m. Auf etwa  $\frac{2}{3}$  der Gesamtfläche (906 m<sup>2</sup>) waren die Elemente tiefer als die 30-jährliche maximale Schneehöhe.

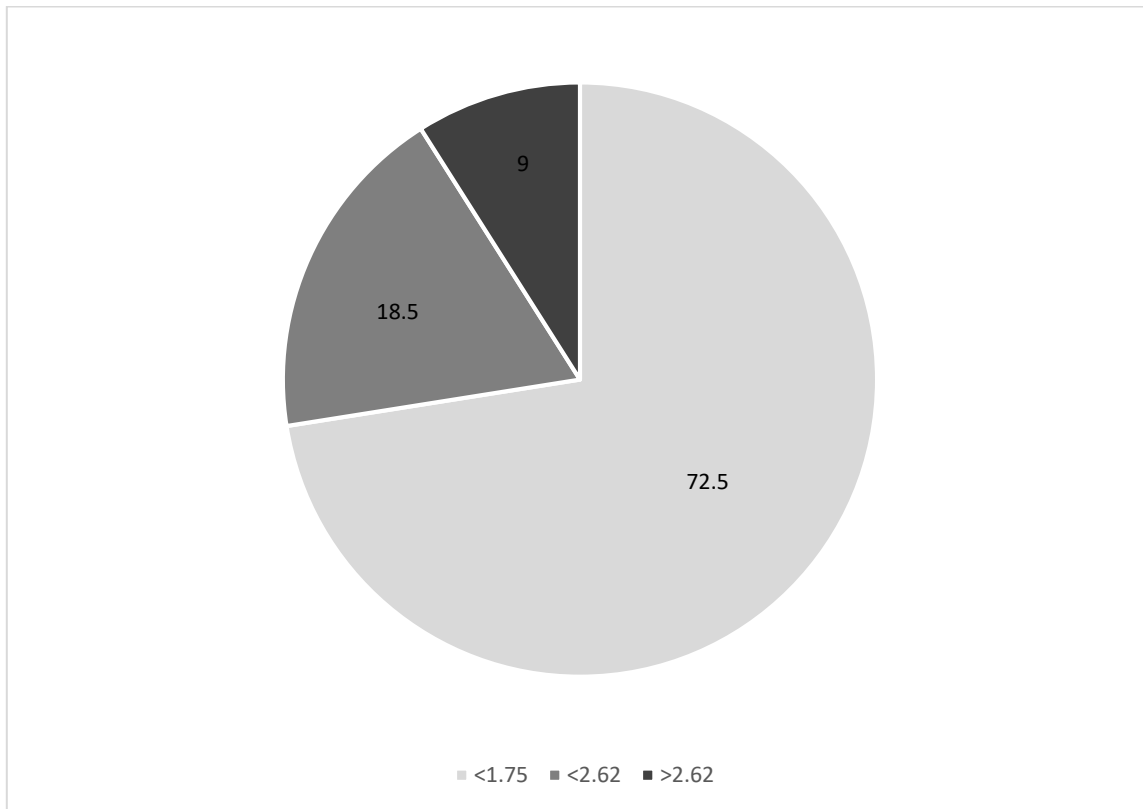


Abbildung 18: Anteil des Totholzes in den jeweiligen Höhenklassen. In dieser Grafik sind stehende Tothölzer, liegende Stämme und Wurzelteller inbegriffen

In der Untersuchungsfläche wurden sieben Lücken gefunden, welche auf 30 m Länge und 10 m Breite keine Rauigkeitselemente von >2.62 m Höhe aufwiesen. Wurde das Kriterium auf 1.75 m angepasst, konnten nur noch drei Lücken nachgewiesen werden. In Abbildung 19 ist ersichtlich, dass die Verteilung der Rauigkeitselemente relativ gut ist.

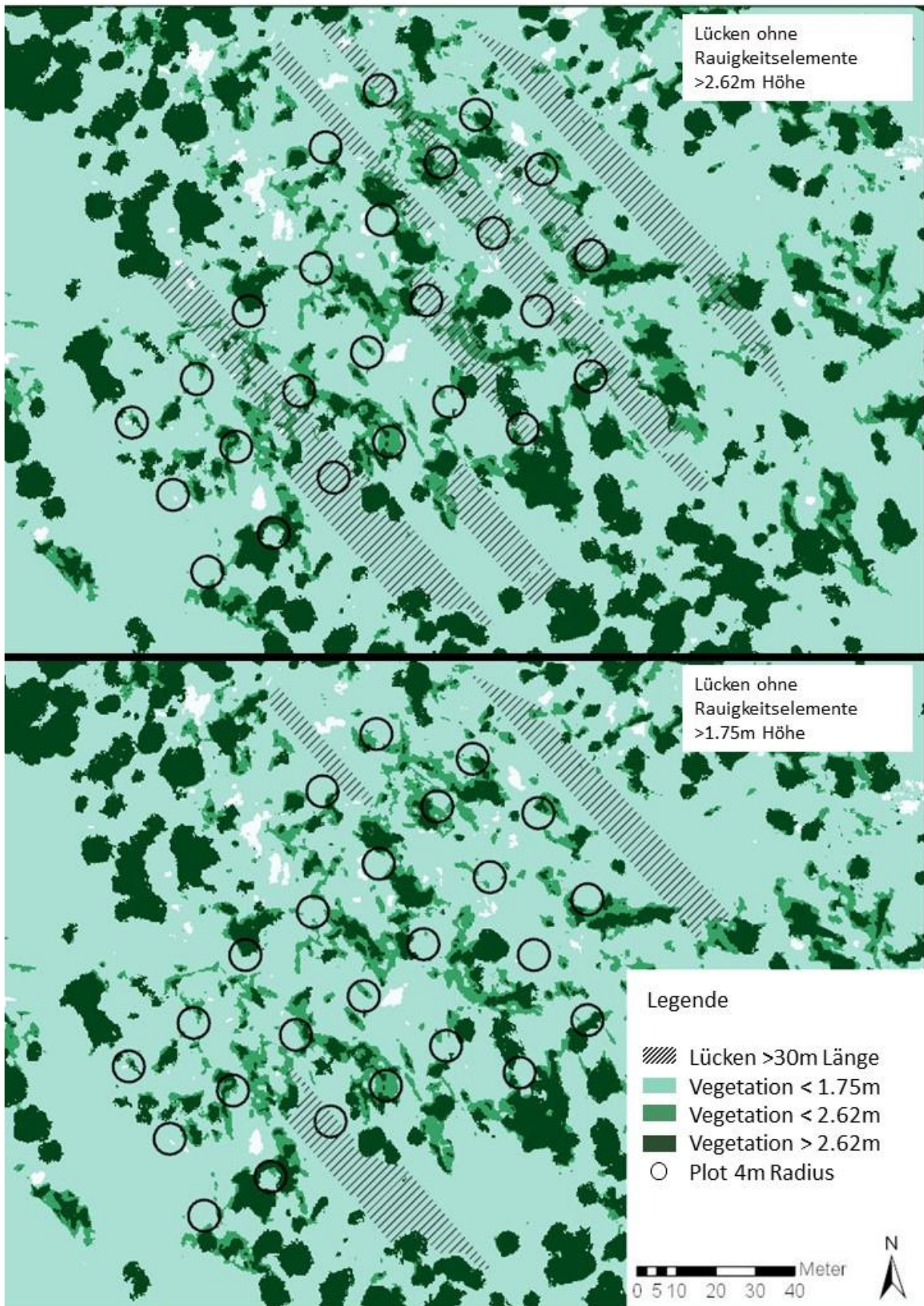


Abbildung 19: Übersichtskarte der Lücken im Untersuchungsgebiet. Es wurden einerseits Lücken ohne Rauigkeitselemente >2.62 m (oben) bzw. >1.75 m Höhe (unten) erfasst. Schwarz schraffiert sind die Lücken, welche die Kriterien für einen Lawinenanriss erfüllen.

### 3.4 Veränderung der höchsten Elemente über den Winter

Die höchsten Elemente, welche Anfang Juli 2019 aufgenommen wurden, waren im Schnitt 2.4 m hoch. Der Mindestwert lag im Plot 20, wo kein Totholz vorzufinden war. Der Höchstwert bei einem stehenden Totholzbaum von 10 m Höhe in Plot Nr. 18. Mit der Fernerkundung wurde eine Durchschnittshöhe von 3.5 m erhoben. Somit waren die höchsten Elemente in der Untersuchungsfläche acht Monate vor der Felderhebung signifikant höher ( $p$ -Wert:  $9.84 \cdot 10^{-4}$ , Abbildung 20). Der kleinste Wert wurde mit 0.9 m im gleichen Plot nachgewiesen, wo während der Feldaufnahme kein Totholz gefunden wurde. Der höchste Wert wurde mit der Fernerkundung tiefer bestimmt als in der Feldbegehung (6m).

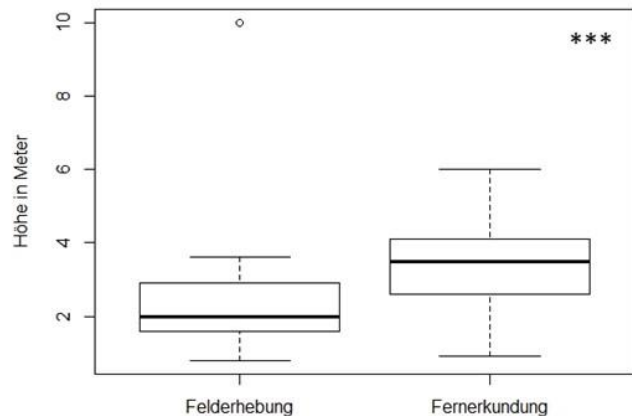


Abbildung 20: Boxplot der höchsten Elemente bei der Felderhebung und der Fernerkundung. Die Unterschied ist höchst signifikant ( $p$ -Wert:  $9.84 \cdot 10^{-4}$ ).

Der grösste Unterschied der Totholzhöhen konnte in der Klasse  $<0.5$  m festgestellt werden (Abbildung 21). Was im November 2018 noch 12% der Fläche entsprach, war im Juli 2019 schon auf 22% der Gesamtfläche anzutreffen. Ebenfalls einen Zuwachs konnte in der Kategorie 1-1.5 m beobachtet werden. Dort war der Unterschied aber nur geringfügig gestiegen. Ebenfalls konnte ein kleiner Unterschied bei der Kategorie 1.5 - 2 m festgestellt werden, bei welcher es aber einen höheren Anteil im Jahr 2019 gab. Auch in den beiden Klassen 0.5 - 1 m und  $>2$  m ist gegenüber dem November der Totholzanteil um je rund 20% angestiegen.

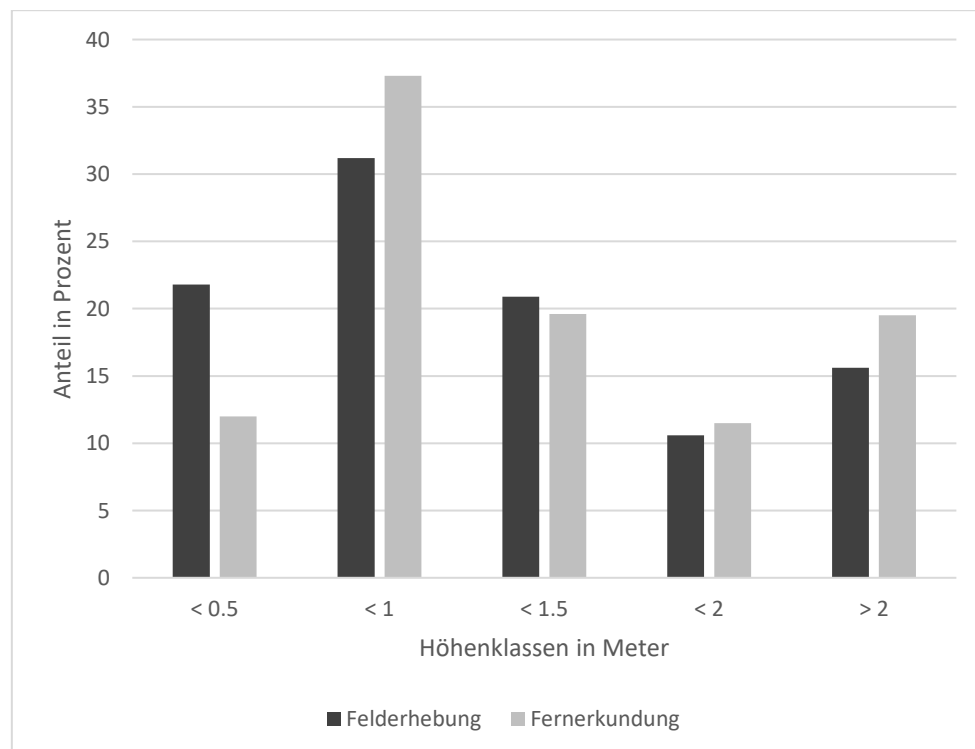


Abbildung 21: Unterschiede der Totholz-Höhenklassen bei der Felderhebung und der Fernerkundung

## 4 Diskussion

### 4.1 Betroffenheit der Waldteile durch den Sturm Vaia

Neben den untersuchten Parametern wie Kronenschlussgrad, Bestandesstruktur und Baumarten haben wahrscheinlich auch zahlreiche andere Faktoren, welche nicht untersucht wurden, einen grossen Einfluss auf die Verletzbarkeit bei einem Sturmereignis. Eigenschaften wie pH-Wert, Bodeneigenschaften, Bestandeshöhe, Geländeformen und auch die vorangegangene Waldbewirtschaftung beeinflussen die Widerstandskraft eines Waldes (Bebi et al., 2012; Mayer et al., 2014; Wegmann, 2010). Ebenfalls können intensiv genutzte Waldweiden zu verstärkten Wurzel- und Stammfäule führen und so die Widerstandskraft gegenüber Windschäden verringern (Ott et al., 1997). Zusätzlich nimmt die Windgeschwindigkeit in höheren Lagen zu, was die Verletzbarkeit in grösseren Höhenlagen steigert (Mayer et al., 2014). Bei der Auswertung des im Dezember 1999 über die Schweiz gezogenen Orkans Lothar wurde jedoch festgestellt, dass die zufällige Windstruktur den mit Abstand grössten Einfluss auf das Schadensmass hatte (Indermühle et al., 2005). Diese Windstrukturen können, gerade in Alpentälern wie dem Val Tuors, lokal stark ändern und unberechenbar werden. Dies sollte beim Betrachten der Resultate in dieser Arbeit nicht vergessen werden.

Trotz diesen Einschränkungen und nicht berücksichtigten Parametern zeichnen sich in dieser Arbeit klare Muster ab. Einige Waldtypen waren viel stärker betroffen als andere. So waren die räumigen und lockeren Kronenschlussgrade gegenüber dem Wind anfälliger. Dies bestätigt auch Wegmann (2010) und Indermühle et al. (2005), dass offenere Bestände eine erhöhte Anfälligkeit gegenüber Windwurf aufweisen. Die normalen Schlussgrade sind nur leicht gefährdet für Windschaden, was auch in dieser Arbeit bestätigt wird. Durch die Widerstandskraft eines Einzelbaumes und die Stützung von benachbarten Bäumen resultiert eine grosse gemeinsame Widerstandsfähigkeit (Wegmann, 2010). Jedoch gelten rothenförmige Plenterwälder als Idealzustand um Sturmschäden Stand zu halten (Ott et al., 1997). Dies zeigt sich auch in den Resultaten. Einerseits waren die gedrängt/normalen Bestände gegenüber den Erwartungen viel weniger betroffen, was auch den Zustand innerhalb einer Rotte repräsentiert. Andererseits sind verschiedene Rottenansammlungen meist gestreut in der Landschaft verteilt, was auch ein aufgelöstes Bild widerspiegelt. Ein Grund für die höhere Anfälligkeit der offeneren Strukturen gegenüber dem Sturm könnten entstehende Wirbel sein. Bei einem geschlossenen Kronendach fegt der Wind eher über den ganzen Bestand hinweg, als wenn er zwischen den einzelnen Bäumen Platz findet und so Wirbel entstehen können. Bei grösseren Abständen (aufgelöste Bestände) sind die Abstände hingegen schon zu gross, damit sich Wirbel mit grosser Kraft bilden können. Zu erwähnen ist sicher auch, dass die Einteilung in die Kronenschlussgrade sicher nicht zu 100% der Realität entspricht. Dies ist von der ausführenden Person abhängig und somit besteht eine gewisse Unsicherheit. Zusätzlich kann eine gewisse Fehlerquelle aufgrund von Fehleinschätzungen durch den Schattenwurf auf dem Orthofoto nicht ausgeschlossen werden. So wurden manche Schlussgrade wahrscheinlich dichter eingeschätzt als sie in Wirklichkeit waren. Zur Eingrenzung dieser Fehlerquelle ist sicher eine gewisse Erfahrung massgebend. Zusätzlich könnte mit einer Verifizierung die Annäherung an die Realität verbessert werden. Der Kronenschlussgrad sollte sich in einem Jahr (Orthofoto 2017; Sturm Vaia 2018) nicht all zu gross verändert haben, dass die Aktualität des Luftbildes eine grosse Fehlerquelle darstellen könnte.

Bei der Struktur zeigte sich ein diffuses Bild. Die stufigen Bestände waren die einzigen, welche eine erhöhte Anfälligkeit auf Sturmschaden hatten. Die plenterartigen Bestände, welche auch eine Art von Stufigkeit besitzen, zeigten sich gegenüber Vaia jedoch als sehr widerstandsfähig. Beim Sturmtief Lothar konnte kein eindeutiger Unterschied bezüglich Bestandesstrukturen festgestellt werden. Jedoch zeigte sich eine leichte Tendenz, dass die stufigen/plenterartigen Waldformen leicht weniger betroffen waren (Indermühle et al., 2005). Dies zeigt auf, wie wichtig die Definition der einzelnen Strukturen ist. Die Einschätzung der Bestandesstrukturen wurde nicht selbst durchgeführt. Daher ist auch nicht sicher, wie genau diese aufgenommen bzw. definiert wurden. Ein weiterer Grund für die skeptische Hinterfragung der Resultate, bietet das Erstellungsdatum der Bestandeskarte (2010) und die Bearbeitung (2019). In diesen neun Jahren dürfte eine gewisse Veränderung der Struktur stattgefunden haben. Es kann aber nicht gesagt werden, wie stark diese Abweichung ist. Ein möglicher Grund für die höhere Resistenz der einschichtigen und zweischichtigen Beständen könnte jedoch ein ähnlicher sein wie beim Kronenschlussgrad. In diesen Beständen bilden sich eher geschlossene Kronendächer, sofern sie genügen nahe beisammenstehen. Wie erwähnt, können sich in solchen Beständen weniger Wirbel bilden. Bei stufigen Beständen gibt es grössere Ausreisser, welche eher zu unterschiedlichen Windstrukturen führen könnten. Zusätzlich sind höhere Bäume, mit dickerem Durchmesser anfälliger auf Sturmschäden

(Dobbertin, 2002) und in einem stufigen Bestand sind einzelne, grössere Bäume dem Wind mehr ausgesetzt.

Nadelbäume sind im Allgemeinen anfälliger auf Sturmschäden als Laubbäume, wobei die Fichte die grösste Anfälligkeit darstellt (Dobbertin, 2002; Indermühle et al., 2005; Wegmann, 2010). In der Schweiz kommen starke Stürme mit Orkanstärke meistens im Winter vor. Daher sind die immergrünen Nadelbäume gegenüber den Laubbäumen, welche ihre Blätter abwerfen, stark benachteiligt (Dobbertin, 2002). Da die Lärche, wie Laubbäume, ihre Nadeln im Herbst abwirft, könnte dies ein Grund für ihre grössere Toleranz gegenüber Winterstürmen sein (Indermühle et al., 2005). Neben dem Laubabwurf ist aber auch das Holz von Laubbäumen robuster gegen Zug- und Druckbelastungen. Auch hier schliesst die Fichte am schlechtesten ab. Die Lärche hat ein um 28% höheres Elastizitätsmodul (E-Modul) als die Fichte. Auch die Föhre (*Pinus sylvestris*) ist stabiler als die Fichte (11% höheres E-Modul) (Indermühle et al., 2005). Somit ist zu vermuten, dass auch die Arve, welche zur gleichen Familie wie die Föhre (*Pinaceae*) gehört, ein stabileres Holz aufweist als die Fichte. Den wichtigsten Grund für das höhere Sturmschadenrisiko der Fichte, dürfte aber ihr Wurzelsystem (Flachwurzler) sein. Die Lärche hat ein Herzwurzelsystem, welches ein mittleres Risiko birgt. Die Arve hingegen besitzt ein Pfahlwurzelsystem, welches nur ein kleines Sturmrisiko besitzt (Wegmann, 2010). Diese Einteilung anhand der Wurzelsysteme widerspiegelt auch die Resultate dieser Arbeit. So war die Arve vom Sturm Vaia fast nicht betroffen, während die Fichte eine hohe Anfälligkeit aufwies. Die Lärche lag dazwischen. Die Information bezüglich der Baumarten stammte ebenfalls von der Bestandeskarte. Die Baumartenzusammensetzung ändert sich innerhalb von neun Jahren aber nicht so drastisch, dass ein grosser Unterschied zu 2010 herrschen würde. Jedoch wurden in dieser Analyse nicht die effektiv geworfenen Bäume gezählt, sondern nur der prozentuale Anteil ausgewertet. Das heisst, wenn eine Fläche mit 90% Arve und 10% Fichte vom Windwurf betroffen war, floss dieser Anteil auch so in die Resultate ein. Jedoch könnten in dieser Fläche auch alle Arven stehen geblieben und nur die 10% Fichte vom Sturm Vaia geworfen worden sein. Mit diesem Beispiel wäre die Arve negativer bzw. die Fichte positiver eingeschätzt worden, als dies in der Realität angetroffen worden wäre. Diese Unsicherheit sollte berücksichtigt werden. Jedoch zeigen die Resultate eine ziemlich gute Übereinstimmung mit der verglichenen Literatur.

Es ist zu erwähnen, dass eine komplexe Interaktion von meteorologischen Bedingungen, Standortigenschaften, Bestandeszusammensetzung sowie äusseren Einflüssen die Widerstandskraft eines Bestandes ausmacht (Bebi et al., 2012). Vor allem in einem engen Bergtal wie dem Val Tuors können auf kleinem Raum komplett unterschiedliche Bedingungen angetroffen werden. Somit können diese Resultate nicht verwendet werden, um Sturmschäden in der ganzen Schweiz vorausszusagen. Sie widerspiegeln lediglich die angetroffene Situation in Blegs da Vo, können aber als Vergleichswerte dienen.

## 4.2 Flächenparameter

In der Untersuchungsfläche wurden mehrere Blockschuttflächen angetroffen. Dies war der Grund für den hohen Anteil an vegetationsfreier Fläche. Weiter war die Bodenvegetation stark von der Beweidung beeinflusst. In einer weiterführenden Untersuchung könnte eine Bestimmung der Bodenvegetationstypen durchgeführt werden. Damit könnte eine klare Antwort geliefert werden, wie die Beweidung mit Schafen die Artenzusammensetzung beeinflussen kann.

Der Kronendeckungsgrad war auf allen Plots sehr niedrig und erfüllt die Anforderungen gemäss NaiS bei weitem nicht (Frehner et al., 2005). Auch auf Flächen die 20 Jahre nach einem Windwurf (Vivian) untersucht wurden, war der Deckungsgrad nur in wenigen bei den von NaiS vorgeschriebenen 50%. Im Schnitt lag er bei 24% (Fankhauser, 2010). Jedoch war der Schlussgrad in Blegs da Vo auch vor dem Sturm nicht all zu dicht (locker/aufgelöst). Der natürliche Deckungsgrad eines subalpinen Lärchen-Arvenwaldes beträgt 20 - 60% (Delarze et al., 2015; Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung, 2000). Daher ist es auch fraglich, ob dieses NaiS-Kriterium in einem Gebirgswald auf 2000 m ü.M. überhaupt anzustreben ist.

Der Deckungsgrad des Totholzes war über die gesamte Untersuchungsfläche sehr unterschiedlich. In subalpinen Nadelwäldern bilden sich oft rottenförmige Strukturen, um das Überleben in der Grenzregion möglich zu machen (Ott et al., 1997). Dies ist der Grund, wieso auf einigen Plots sehr viel Totholz vorkam. Die Erklärung für Flächen, auf denen kein oder sehr wenig Totholz gefunden wurde, liegt wie vorhin beschrieben darin, dass es ein offener Wald gewesen war.

Die nur sehr schwache Korrelation zwischen der Hangneigung und dem Totholzdeckungsgrad darf nicht überbewertet werden. Trotzdem zeigt sich eine ganz leichte Tendenz, dass bei steilerer Hangneigung weniger Totholz liegt. Dies könnte daran liegen, dass Bäume, die umstürzen, in steilerem Gelände eher

abwärtsrollen und dann an flacheren Orten liegen bleiben. Zusätzlich könnte Wind oder Regen Material in steilen Hängen eher mobilisieren als in flachen. Jedoch kommt dieser Tendenz noch weniger Bedeutung zu, da der Zusammenhang zwischen Vorhandensein von Lücken und der Hangneigung keine Signifikanz hat. Es wurden nicht signifikant mehr Lücken in steileren als in flacheren Plots gefunden. Jedoch korrelieren die Lückenlängen und -breiten sehr stark miteinander. Dies konnte auch bei Fankhauser, (2010) beobachtet werden. Diese Begebenheit ist für die Entstehung von Lawinen von negativer Auswirkung. Mit grösserer Länge und Breite nimmt die Fläche für potenzielle Lawinenanrisse stark zu. Bei der Definition von Lücken ist es sehr wichtig, diese klar und präzise zu definieren. Auch in der Literatur werden verschiedene Definitionen angetroffen (Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung, 2000; Frehner et al., 2005). Für den Vergleich von Lücken ist es somit sehr wichtig, dass nur die einheitlichen Definitionen miteinander verglichen werden.

Die Untersuchungsfläche wurde vom Sturm Vaia sehr stark beschädigt. In den 25 Plots (1250 m<sup>2</sup>) konnten lediglich elf Bäume, welche höher als 130 cm waren, gezählt werden. Von diesen waren nur vier Bäume nicht beschädigt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass viele andere Bäume durch den Sturm umgefallen sind. Damit stieg das Risiko, dass andere Bäume, welche nicht durch den Wind direkt beschädigt wurden, von umfallenden Bäumen getroffen und dadurch beschädigt wurden. Zusätzlich konnten in den Plots noch vier Bäume, die unter 130 cm hoch waren, gefunden werden, die als Vorverjüngung galten. Bei diesen wurde nur an einer Arve einen Schaden nachgewiesen, welcher wahrscheinlich auf einen umgefallenen Baum zurückzuführen war. Die grössere Elastizität der Jungbäume ist sicher ein Grund, wieso bei diesen weniger Bruchschaden beobachtet werden konnte. Allgemein sind Jungbäume nur einer kleinen Anfälligkeit gegenüber Sturmschäden ausgesetzt (Wegmann, 2010). Jedoch war nur eine Arve, die als Vorverjüngung galt, nicht beschädigt. Bei den zwei Fichten unter 130 cm konnten Verbissspuren festgestellt werden. Der Verbissdruck durch Schalenwild wird in der Untersuchungsfläche noch zusätzlich erhöht, da das Gebiet auch als Sömmerungsweide für Schafe genutzt wird. Arven, Lärchen, Fichten und auch Vogelbeeren werden durch das Schalenwild stark gebissen, wie auch intensiv gefegt, geschlagen oder geschält (Frehner et al., 2005). Dies ist wahrscheinlich der Hauptgrund, warum in Blegs da Vo so wenig Vorverjüngung vorhanden ist. Zusätzlich bringt die grosse Höhenlage limitierende Faktoren wie Wärmemangel, Schneekriechen, -gleiten oder Frosttrocknis mit sich (Frehner et al., 2005). Für die Verjüngung könnte der Windwurf somit eine positive Wirkung haben. Liegendes Totholz kann Schneekriechen und -gleiten reduzieren und bildet langfristig ein günstiges Verjüngungssubstrat durch eine frühere Ausaperung, günstigeren Wärmehaushalt oder Schutz vor Vegetationskonkurrenz (Frey & Thee, 2002; Ott et al., 1997; Schwitter et al., 2015). In der subalpinen Zone kann der Regenerationsprozess aber sehr lange gehen. Laut Schönenberger (2002) waren Windwurfflächen auch zehn Jahre nach dem Sturm Vivian noch immer offen. Dies hat wahrscheinlich mit dem Vermoderungsgrad des Totholzes zu tun. Marty M. (2019) hat festgestellt, dass 30 Jahre nach dem Sturm Vivian markant mehr Moderholzverjüngung vorhanden war als bei einer Aufnahme 10 Jahre zuvor. Ebenfalls konnte der Trend, dass auf Mulmholz mehr Verjüngung gefunden wurde als auf Moderholz, beobachtet werden, jedoch ohne signifikanten Unterschied. Neben der Fichte kann auch der Arve und der Lärche Moderholz oder Rohboden, welcher hinter den entwurzelten Wurzeltellern hervorkommt, zugutekommen. Vor allem die Lärche, welche Rohböden und viel Licht braucht, kann sich in Bereichen von Windwurfflächen gut verjüngen (Frehner et al., 2005; Ruhm & Schönauer, 2011). Die Untersuchungsfläche befindet sich jedoch in einer kontinentalen Südhanglage. Da Moderholz in diesen Lagen rasch austrocknet und relativ langsam abgebaut wird, ist Moderholzverjüngung nur selten anzutreffen. Angesichts der eher geringen Vegetationskonkurrenz ist dies in diesen Gebieten jedoch auch nicht unbedingt notwendig (Ott et al., 1997).

### 4.3 Lawinenschutzwirkung auf der Untersuchungsfläche

Die Ausrichtung der geworfenen Bäume und die Schneise, welche durch den Sturm Vaia im Wald entstanden ist, zeigen ein unterschiedliches Bild. Zum einen liegen 80% aller Stämme in Hangrichtung also senkrecht zu den Höhenlinien. Zum anderen ist die Schneise parallel zu den Höhenlinien. Die erste Interpretation dieses Zustandes ist, dass der Wind von Südwest gekommen ist und daher eine Schneise parallel zum Tal gemacht hat. Die Bäume sind daher nicht vom Wind in Hangrichtung geworfen worden, sondern müssen sich durch einen anderen Grund nach unten gedreht haben. Ein möglicher Grund für dieses Phänomen könnte die steile Hangneigung (Durchschnitt auf Untersuchungsfläche 37.5°) sein. Beim Umfallen ist die schwere Krone vielleicht schon hangabwärts gerutscht, als einige Wurzeln noch im Boden gehalten haben. Zusätzlich könnte die Wuchsform der Wurzel einen Einfluss gehabt haben. Ein Wurzelteller an einem steilen Hang verankert sich viel stärker hangaufwärts als hangabwärts (Abbildung 22; Fraser & Gardiner, 1967). Somit ist es für den Baum viel einfacher in Hangrichtung zu fallen

als auf eine andere Seite. Werden die Wurzelteller grösser, nimmt dieser Einfluss wahrscheinlich auch immer mehr zu. Der Wald in Blegs da Vo war wie erwähnt von geringer Bestandesdichte und es konnten grössere Wurzelteller gebildet werden. In einer ebenfalls steilen Vivian-Windwurffläche in Disentis liegen die meisten Stämme quer zur Hangrichtung (Frey & Thee, 2002). Jedoch war dort der Bestand vor dem Sturm dichter und demnach waren die Wurzelteller wahrscheinlich nicht so gross ausgebildet. Daher war der Einfluss der Wurzeln geringer. Dazu kommt, dass in einem engen Bestand der Dominoeffekt in Windrichtung wahrscheinlich zunimmt.



Abbildung 22: Wurzelsystem einer Sitka-Fichte (*Picea sitchensis*) in einer Braunerde an einem 20° steilen Hang. Zu beachten ist die dominante Wurzelenausrichtung hangaufwärts (im Bild nach rechts) (Fraser & Gardiner, 1967)

Wie bereits im Kapitel 4.1 erwähnt, ist es die zufällige Windstruktur, welche den grössten Einfluss auf das Schadenausmass hat (Indermühle et al., 2005). Diese Zufälligkeit und die komplexen Interaktionen zwischen den verschiedenen Einflüssen (Bebi et al., 2012), haben wahrscheinlich auch einen grossen Einfluss, in welche Richtung die Bäume bei bestimmten Begebenheiten fallen. Daher ist es auch schwierig, zwei verschiedene Standorte und Gebirgstäler (Disentis und Val Tuors) miteinander zu vergleichen. Für die Lawinenschutzwirkung sind die Stämme, die in der Falllinie liegen jedoch nicht optimal. Die Wahrscheinlichkeit für ein Abrutschen der Stämme ist höher, als wenn sie quer lägen. So könnten sie eher an Wurzelstöcken und anderen Elementen anhängen und stabilisiert werden. Liegen die Stämme jedoch 90° zur Hangrichtung, ist dies auch nicht der Optimalfall. Das Totholz bricht durch den Druck schneller und kann so in kleineren Stücken besser mobilisiert werden und verwittern. Darum schlägt BAFU (2008-b) vor, bei steilen Windwurfflächen, wo Totholz ungenügend verankert ist, oder durch Schneedruck abrutschen könnte, Stützverbauten anzubringen. Eine weitere Lösung ohne technische Massnahmen könnte sein, die Stämme diagonal zur Hangrichtung hinter Strünken zu positionieren. Somit wäre die Abrutschgefahr der Stämme vorerst verhindert und die Schutzwirkung würde sich verbessern.

Die Beurteilung der Lawinenschutzwirkung auf der Untersuchungsfläche anhand der Wirkhöhen erfolgte mittels Felddatenerhebung und Fernerkundung. Die Fernerkundungsanalyse basierte auf dem berechneten Vegetationshöhenmodell. Wie in Kapitel 2.4.3 beschrieben, konnte weder eine Verifizierung noch eine Korrektur vorgenommen werden. Deshalb ist sicherlich eine gewisse Fehlerhaftigkeit in den

angegebenen Höhen vorhanden. Diese sollten sicher kritisch hinterfragt werden, reichen aber aus, um einen Überblick zu erhalten.

Für die Beurteilung der Wirkhöhen ist es wichtig, die berechnete Schneehöhe kritisch zu begutachten. Sie wurde anhand einer Messstation in Bergün berechnet, welche eine Unsicherheit von 18% birgt (Marty, C., 2019). Diese liegt zwar in Luftlinie nur ca. 6.5 km von der Untersuchungsfläche entfernt, trotzdem gibt es einen Höhenunterschied von 620 m. Durch diese Höhenlagekorrektur wird die Unsicherheit sehr wahrscheinlich noch einmal stark erhöht.

Zur Bestimmung des BSH-Faktors werden in der Literatur verschiedene Faustregeln genannt. Während Frehner et al. (2005) vom Faktor 2 spricht, legte ihn Bebi et al. (2015) bei 1.5 fest. In dieser Arbeit wurde ebenfalls der Faktor 1.5 verwendet, da bei liegenden Stämmen die Höhe allein nicht mehr von so grosser Bedeutung ist. Die Breite, welche von liegenden Stämmen und Wurzeltellern ausgeht, sollte zwingend berücksichtigt werden. Neben den liegenden Stämmen und Wurzeltellern können auch Äste, Zweige und Nadeln, welche in den ersten Jahren nach dem Sturm noch am Baum sind, effektiv Schneebewegungen verhindern (Frey & Thee, 2002). So vermittelt Abbildung 16 vielleicht ein falsches Bild. Die Lawinenschutzwirkung darf beim stehenden Totholz sicher nicht überschätzt werden, da sie nur auf einer kleinen Fläche eine grosse Höhe aufweisen. Die Widerstandskraft gegen Schneebewegungen der Wurzelteller oder auch der liegenden Stämme ist jedoch auch nicht zu unterschätzen. Sie weisen zwar kleinere Höhen auf, diese sind aber über eine viel grössere Fläche verteilt. Vor allem quer zur Hangneigung liegende und ineinander verflochtene Stämme führen zu einer guten Lawinenschutzwirkung. Liegendes Totholz oder Wurzelteller können somit auch Lawinenanrisse verhindern, wenn sie die Schneeschicht nicht durchstossen. Durch ihre vergrössernde Bodenrauigkeit verhindern sie die Bildung von gleichmässigen, grossflächigen Schichten, welche die Lawinenbildung begünstigen (Frey & Thee, 2002).

Wurzelteller sind starre Elemente, welche in den ersten Jahren eine ähnliche Eigenschaft aufweisen können wie technische Lawinenverbauungen. Bäume hingegen sind biegsamer. Somit gilt zu hinterfragen, ob Wurzelteller den gleichen Anforderungen unterstellt werden sollen wie Bäume. Die Werkhöhe einer Lawinenverbauung hat mindestens der zu erwartenden extremen Schneehöhe zu entsprechen (Margreth, 2007). Somit wäre die Schutzwirkung gegen Lawinenanrisse bei allen gemessenen Wurzeltellern gewährleistet.

Der Zusammenhang zwischen der Wirkhöhe und dem Stammdurchmesser darf nicht überschätzt werden. Erstens zeigt schon die sehr tiefe Korrelation an, dass kein allzu grosser Zusammenhang besteht. Zweitens kann es auch sein, dass ein dünner Stamm über einen sehr dicken gefallen ist und dieser somit eine grössere Wirkhöhe aufweist als der unter ihm liegende Stamm. Trotzdem kann davon ausgegangen werden, dass Bäume mit einem grösseren Durchmesser in der Regel auch grössere Wirkhöhen erzielen als Dünnere. Dies aus dem Grund, weil dickere Bäume meist auch höher sind und somit auch eine grössere Krone aufweisen. Diese grössere Krone kann somit auch im liegenden Zustand zu einer höheren Wirkhöhe führen. Sobald die Bäume aber in einer chaotischen Anordnung zu liegen kommen, was bei Windwurf Flächen meist der Fall ist, ist die Kronengrösse wahrscheinlich meist von kleinerer Bedeutung als das darunterliegende Element.

Die Auswertung der Totholzanteile in den Höhenklassen  $<1.75$  m,  $<2.62$  m und  $>2.62$  m muss relativiert werden. Wie oben bereits erklärt, werden die Wurzelteller mit dem BSH-Faktor von 1.5 stark unterschätzt und auch die Rauigkeitselemente, welche unterhalb der Schneedecke liegen, leisten ihren Beitrag für den Schutz gegen Lawinenanrisse (Frey & Thee, 2002). Neben der Höhe ist aber auch die Verteilung der bestimmten Elemente von entscheidender Bedeutung (Noak et al., 2004). Die Verteilung dieser Elemente war auf der Untersuchungsfläche relativ gut. Trotzdem kam es an einigen Stellen zu Lückenlängen von mehr als 30 m zwischen Elementen mit der Mindestsollhöhe. Wird die Fläche mit der Schneehöhe (1.75 m) betrachtet, sieht das Bild schon viel besser aus. Auch für diese Beurteilung ist es von entscheidender Bedeutung wie die Lücken definiert wurden. Da der Abstand zwischen den Elementen über 2.62 m bzw. 1.75 m gemessen wurde, wurden die 30 m in Hanglänge als Kriterium gewählt. Dies ist gemäss NaiS die Minimalanforderung für Lückenlängen bei Hängen über  $45^\circ$  (Frehner et al., 2005), also die strengste Anforderung bezüglich Lückenlängen. Die Wirkhöhen, welche mit dem Vegetationsmodell gerechnet wurden, sind jedoch kritisch zu hinterfragen. Wie im Kapitel 2.4.3. beschrieben, konnte keine Verifizierung des VHM gemacht werden und somit ist eine gewisse Unsicherheit in diesem Modell dabei. Dazu kommt die Ausscheidung der Lücken. Diese erfolgte sehr oberflächlich. Erstens wurde mit horizontalen Massen gerechnet und nicht mit der effektiven Hanglänge. Diese Umrechnung erfolgte nicht für jedes Polygon einzeln, sondern wurde über die mittlere Hangneigung von  $37.5^\circ$  berechnet. Somit ist in der effektiven Lückenlänge eine gewisse Fehlerquelle vorhanden. Auch die Berechnung der mittleren Länge im GIS wurde sehr rudimentär durchgeführt. Auch dies führte zu einer

nicht zu unterschätzenden Fehlerquelle. Für eine quantitative Beurteilung der Fläche reicht es jedoch aus. Diese Lücken dürfen jedoch nicht zu 100% dem Sturm Vaia zugeschrieben werden. Schon vor dem Ereignis war es ein offener Wald, in dem Lücken angetroffen werden konnten, die den Kriterien von NaiS wahrscheinlich nicht standgehalten hätten.

In mehreren Studien hat sich ergeben, dass die Anforderungen von NaiS bezüglich einem Lawinenschutzwald auf Windwurfflächen nicht ideal sind. Die Kriterien werden nur selten erfüllt, aber trotzdem gibt es auf den untersuchten Windwurfflächen keine erhöhte Lawinenaktivität (Bebi et al., 2015; Wohlgemuth et al., 2017). In der ungeräumten Windwurffläche in Disentis konnte in den ersten 10 Jahren nach dem Sturm Vivian keine einzige Lawine nachgewiesen werden, wobei in den benachbarten, geräumten Flächen mehrere Schneerutsche abgingen (Noak et al., 2004). In den ersten 10 Jahren nach einem Sturmereignis ist die Lawinenschutzwirkung somit sehr gut. Danach nimmt die Schutzwirkung jedoch langsam ab. Gegenüber geräumten Sturmflächen ist sie jedoch immer noch wesentlich besser (Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung, 2000; Frey & Thee, 2002). Dies ist aber mit Sicherheit auch abhängig vom Zustand des Schutzwaldes vor dem Sturm. Ist dieser intakt, verbessert sich die Schutzfähigkeit laut Noak et al. (2004) auf Windwurfflächen sogar direkt nach einem Ereignis kurzfristig. Dies ist aber sicher auch abhängig von verschiedenen Gegebenheiten wie die Ausrichtung der geworfenen Stämme. Mit Sicherheit ist zu sagen, dass eine erhöhte Oberflächenrauigkeit wie liegende Stämme, Wurzelteller oder auch Strünke einen beträchtlichen Anteil zur Verminderung von Lawinenanrissen beitragen (Schwitter et al., 2015; Wohlgemuth et al., 2017). Weiter hilft die Oberflächenrauigkeit nicht nur gegen den Anriss von Lawinen, sondern reduziert auch deren Auslauf (Feistl et al., 2014). Kriterien wie Oberflächenrauigkeit und die Ausrichtung der geworfenen Stämme werden in NaiS nicht berücksichtigt, da diese Anforderungskriterien auf intakte Bestände ausgerichtet sind.

Mit zunehmender Zeit und fortschreitender Verwitterung des Holzes nimmt die Lawinenschutzwirkung auf Windwurfflächen bis zu einem kritischen Punkt immer mehr ab (Abbildung 23). Die Vorverjüngung, welche den Schutz ab diesem kritischen Punkt übernehmen sollte, ist in subalpiner Zone jedoch meist noch nicht genügend fortgeschritten, was aber von Fall zu Fall sehr unterschiedlich sein kann (Schönenberger, 2002; Wohlgemuth et al., 2017). Laut Frey und Thee (2002) und Noak et al. (2004) ist ab 20 Jahren die Schutzwirkung nicht mehr effektiv genug und der heranwachsende Wald kann die Funktion erst ab ca. 50 Jahren wieder vollumfänglich übernehmen. Dies sollte aber nicht zu allgemein betrachtet werden, da sich die Situation über diese Zeitspanne sehr unterschiedlich verhalten kann und noch nicht so viele entsprechende Forschungsergebnisse vorliegen. Es ist abhängig von der Exposition, Witterung, Konkurrenz, Wilddruck und zahlreichen anderen Faktoren, welche einen starken Einfluss auf die Verjüngung haben können. In Disentis konnte die Regeneration, welche nach dem Sturm Vivian aufgekommen ist, die Schutzwirkung teilweise schon nach 30 Jahren wieder übernehmen (Marty, M., 2019). Jedoch liegt diese Fläche rund 500 m tiefer als in Blegs da Vo, was wiederum einen grossen Einfluss auf die Zeitspanne haben kann. Um diese kritische Phase möglichst kurz zu halten, ist die Vorverjüngung auf einer Fläche von entscheidender Bedeutung (Schwitter et al., 2015). Dies ist auf der Untersuchungsfläche ein Punkt, der für die langfristige Schutzwirkung als sehr negativ gewertet werden muss. Es wurde fast keine Vorverjüngung gefunden und die paar wenigen Bäumchen befanden sich in einem schlechten Zustand. Das Abwarten auf die Moderholzverjüngung reicht sehr wahrscheinlich nicht aus, um den Lawinenschutz lückenlos übernehmen zu können. Dafür könnten punktuelle Aufforstungen mit Verbisschutz in Betracht gezogen werden. Da könnte sich das Nichträumen mit Pflanzungen als eine gute Methode erweisen (Schwitter et al., 2015). Die Fichte benötigt bei natürlicher Verjüngung oft bis zu 50 Jahre bis sie Brusthöhe erreicht, wobei gepflanzte Bäume mit kräftigem Wurzelwerk ein deutlich stärkeres Jugendwachstum zeigen als die Naturverjüngung (Ott et al., 1997). Für den Entscheid ob zusätzliche technische Verbauungen notwendig sind, spielt auch die Gefahrensituation und das vorhandene Risiko eine Rolle. Da das Untersuchungsgebiet als Schutzwald mit kleinem Risiko ausgeschieden wurde (Geoportal GR, ohne Datum), kann von Schutzbauten abgesehen werden.

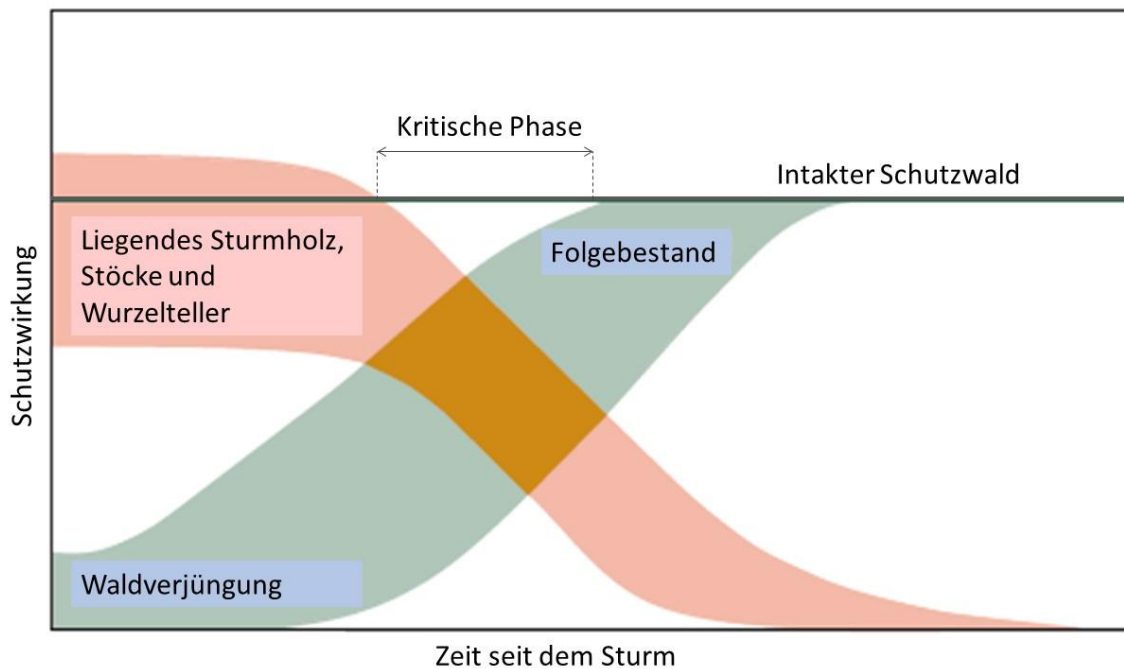


Abbildung 23: Verlauf der Schutzfunktion auf Windwurfflächen im Laufe der Zeit (BAFU, 2008-a, eigene Bearbeitung)

Die Diskussion um das Räumen und Belassen von Sturmflächen ist ein viel diskutierter Punkt. Viele verschiedene Argumente wie die Naturgefahr, die Bodenfruchtbarkeit, der Artenschutz, die Biodiversität oder die Sicherheit der Forstleute beeinflussen den Entscheid (BAFU, 2008-a). Jedoch stehen in der Praxis die Borkenkäferproblematik und die Erntekosten einer objektiven Einschätzung ob Räumen oder Belassen oft im Wege (Schwitter et al., 2015). Auf belassenen Sturmflächen schmilzt der Schnee jedoch meist schon etwas früher als in geräumten Gebieten, da das Totholz bei der Schneeschmelze mithilft. Die Verjüngung hat so die Chance, früher Sonne und damit wichtige Wärme abzubekommen (Frey & Thee, 2002). Dies spricht neben der bereits erwähnten Moderholzverjüngung ebenfalls dafür, Totholz liegen zu lassen. Wird die Borkenkäferproblematik trotzdem als zu hoch eingestuft, können die Bäume entrindet werden. Vor allem das Schlitzeln der Rinde stellt sich als ideale Methode heraus, um den Borkenkäfer zu reduzieren und trotzdem die Biodiversität in einer Windwurffläche möglichst hoch zu halten (Thorn & Müller, 2016). Bei einem Vergleich von geräumten und nicht geräumten Vivian-Sturmflächen wurde festgestellt, dass es ein Vorteil gewesen wäre, mehr Totholz liegen zu lassen. Das belassene Totholz wurde jedoch auf keiner beurteilten Fläche als störend bezeichnet (Schwitter et al., 2015). Der Schweizer Wald hat per Waldgesetz 1991 (WaG) in Art. 1 verschiedenen Funktionen zu erfüllen. Somit sollten bei einer Beurteilung auch diese Funktionen im Vordergrund stehen. Bei einem Schutzwald hat die Schutzfunktion immer an erster Stelle zu stehen und somit sollten Wälder mit einer Schutzfunktion auch danach beurteilt werden.

#### 4.4 Veränderung der höchsten Elemente über den Winter

Die Unterschiede der höchsten Elemente zwischen November 2018 und Juli 2019 müssen sicher kritisch begutachtet werden, da bei den Fernerkundungsdaten wie erwähnt keine Verifizierung gemacht werden konnte. Somit ist bei diesen Daten eine gewisse Unsicherheit inbegriffen. Trotzdem ist diese Setzung um ca. 30% sehr plausibel. Der Winter 2018/19 war in den östlichen Zentralalpen sehr niederschlagsreich (MeteoSchweiz, 2019-b). So lag eine schwere Schneedecke, welche das liegende Totholz sicher stark beeinflusste. Dieser durchschnittliche Unterschied von 1.1 m kann mit dem Brechen der stützenden Äste und Verschiebung durch den Schneedruck erklärt werden. Auch auf untersuchten Vivian-Flächen konnte diese Setzung festgestellt werden (Wohlgemuth et al., 2017). Vor allem in den ersten Jahren wurde die Wirkhöhe des Totholzes stark reduziert, obwohl die Äste noch eine starke Stützwirkung hatten. Die fortlaufende Senkung des Totholzes kann aber auch mit der andauernden Zersetzung des Holzes erklärt werden (Frey & Thee, 2002).

Werden die Unterschiede auf die verschiedenen Höhenklassen betrachtet, macht es durchaus Sinn, dass in der tiefsten Klasse auch der grösste Zuwachs ist. Das ganze Holz wurde durch die Schneelast

auf den Boden gedrückt. Für die anderen Höhenklassen ist es schwierig eine klare Aussage zu treffen. Auf der Untersuchungsfläche lagen viele Stämme übereinander. Diese wurden nicht nur von Ästen, welche im Winter relativ leicht brechen können, gestützt, sondern auch von darunterliegenden Stämmen. Um eine grosse Setzung bei diesen Zuständen sehen zu können, braucht es sehr wahrscheinlich noch mehrere Jahre, während denen die Zersetzung des Holzes weiter fortschreitet.

Das höchste Element von 10 m (Abbildung 16) wurde jedoch während der Feldaufnahme und nicht mit der Fernerkundung erhoben. Dies ist darauf zurückzuführen, dass dieses stehende Totholz bei der Auswertung des Orthophotos im Plot nicht aufzufinden war. Da dieses Element mit Sicherheit auch schon im November 2018 dort gestanden hat, ist der Fehler wahrscheinlich in der Ungenauigkeit des GNSS (Globales Navigationssatellitensystem) zu finden. Jeder mit dem GNSS erfasste Punkt, wurde mit einer gewissen Genauigkeit erfasst. Somit gibt es eine gewisse Abweichung zwischen den Plotstandorten im Feld und im Orthophoto. Der Unterschied bei den Plots mit den geringsten Höhen (Felderhebung 0 m, Fernerkundung 0.9 m) kann zwei Erklärungen hervorbringen. Einerseits waren im November vielleicht nur Äste auf der Fläche, welche mit dem Wind, Regen oder Schnee hangabwärts transportiert wurden. Somit waren im Juli diese Elemente nicht mehr innerhalb des Plots gelegen. Auf dem Luftbild ist jedenfalls nichts anderes als Äste und Bodenvegetation zu sehen. Andererseits wurde bei der Felderhebung kein Totholz erfasst. Jedoch gab es Bodenvegetation von Gräsern und Zwergsträuchern. Bei der Fernerkundung wurde mit einem Vegetationshöhenmodell gearbeitet, welches auch die Bodenvegetation erfasste und somit eine Höhe generierte. Dies könnte auch eine allgemeine Fehlerquelle sein, falls grössere noch stehende Bäume erfasst wurden. Obwohl stehende Bäume, welche auf dem Orthophoto erkannt wurden, aus der Bearbeitungsfläche ausgegrenzt wurden, besteht die Chance dieser Fehlerquelle.

## 5 Schlussfolgerung

Die Analyse der Betroffenheit der verschiedenen Waldtypen hat gezeigt, dass räumige, stufige Fichtenbestände in der Untersuchungsfläche vom Sturm Vaia am meisten betroffen waren. Vor allem die Fichte zeigt die grösste Anfälligkeit auf Sturmschäden. Arven und Lärchen sind weitaus resistenter. Im Grossen und Ganzen ist es aber eine komplexe Interaktion zahlreicher Faktoren, welche das Risiko eines Schadens ausmachen. Der grösste Anteil dabei trägt der Sturm selbst.

Die Lawinenschutzwirkung auf der Untersuchungsfläche hat durch den Sturm Vaia vorerst noch keine grossen Einbussen erlitten. Durch die hohe Oberflächenrauigkeit, welche vom liegengelassenen Totholz kommt und die Verteilung dieser Elemente, wird die Schneedecke auch bei einem 30-jährlichen Ereignis relativ gut stabilisiert. Eine mögliche Rutschung, welche im Perimeter losgehen würde, könnte mit guter Chance durch die hohe Oberflächenrauigkeit soweit abgebremst werden, dass die unterhalb liegende Siedlung nicht betroffen wäre. Dies ist jedoch eine Momentaufnahme kurz nach dem Sturmergebnis. Das Totholz wird sich in den folgenden Jahren weiter zersetzen und in 10-20 Jahren die Schutzwirkung nicht mehr im gleichen Rahmen übernehmen können. Anhand der Höhenlage und der fast nicht vorhandenen Vorverjüngung ist nicht davon auszugehen, dass die natürliche Regeneration diese Schutzwirkung in absehbarer Zeit übernehmen kann. Daher wäre eine gezielte Pflanzung von Arve, Lärche und Fichte als Unterstützung zur natürlichen Verjüngung eine Option. Da die Rauigkeitselemente auch das Schneekriechen verhindern können, wären nur wenige Dreibeinböcke in den grösseren Lücken anzubringen. Zusätzlich könnten die hangabwärts liegenden Stämme diagonal in den Hang hinter Strünke positioniert werden. Von technischen Verbauungen kann jedoch abgesehen werden.

Aus den oben genannten Gründen wird davon abgeraten, die Windwurffläche zu räumen. Zusätzlich zu der Oberflächenrauigkeit bieten die liegen gelassenen Stämme und Wurzelteller der Regeneration ohne grossen Pflegeaufwand sehr viel Positives. Nicht zu unterschätzen ist auch der Beitrag zur Biodiversität, welches das vermodernde Totholz leistet.

Der wichtigste Faktor bei der Beurteilung der Lawinenschutzwirkung sind die Definitionen. Da NaiS auf Windwurfflächen nicht gut anwendbar ist, wäre eine allgemein gültige Richtlinie von Vorteil. Da Windwurfflächen sehr unterschiedlich ausgeprägt sein können, ist eine solche aber schwierig zu verfassen. Für eine objektive Beurteilung kann die Fernerkundung mit einer GIS-Analyse von entscheidendem Vorteil sein. Es sollte dabei jedoch darauf geachtet werden, dass eine Verifizierung und eine allenfalls nötige Korrektur gemacht werden kann. Das heisst die Luftaufnahme und Felddatenerhebung sollten zeitlich möglichst nahe beisammen sein. Für die GIS-Analyse wäre ein höher aufgelöstes Terrainmodell von Vorteil, da bei einem Resampling Daten verloren gehen oder künstliche Werte generiert werden. Ebenso wäre eine Automatisierung, welche die Hangneigung und Hangrichtung direkt mitberücksichtigt, von Vorteil für eine qualitative Aussage.

### 5.1 Ausblick

Für die Zukunft wäre es spannend, die weitere Entwicklung des Totholzes und der Verjüngung zu beobachten. Für die nachhaltige Lawinenschutzwirkung sind diese beiden Faktoren von entscheidender Bedeutung. Am Beispiel der Langzeitstudie der Vivian-Windwurffläche in Disentis könnte eine Messreihe in diesem Untersuchungsgebiet aufgebaut werden, wobei die vorliegende Arbeit als Vergleich genutzt werden kann.

Weiter wäre es interessant zu wissen, ob es zwischen Bestandesdichte, Wurzelteller und Wurfrichtung der Stämme ein Zusammenhang gibt.

Ein weiterer sehr interessanter Schritt wäre die Ausarbeitung einer Automatisierung für die Ausscheidung von Lücken im GIS. Dies hat wahrscheinlich auch in der Praxis ein hohes Anwendungspotenzial.

## 6 Literaturverzeichnis

Amt für Wald und Naturgefahren. (2010). Bestandeskarte.

Amt für Wald und Naturgefahren. (2018, November 9). Die Folgen von Sturm „Vaia“ im Wald. *Kanton Graubünden*. Zugriff am 5.4.2019. Verfügbar unter: <https://www.gr.ch/DE/Medien/Mitteilungen/MMStaka/2018/Seiten/2018110902.aspx>

Arge Alp. (2009). Ökonomie und Ökologie im Schutzwald / Projekte - ArgeAlp. Zugriff am 20.3.2018. Verfügbar unter: <http://www.argealp.org/projekte/oekonomie-und-oekologie-im-schutzwald>

BAFU, (Bundesamt für Umwelt). (Hrsg.). (2008-a). *Entscheidungshilfe bei Sturmschäden im Wald. Vollzugshilfe für die Wahl der Schadenbehandlung im Einzelbestand*. (Sturmschaden-Handbuch) (Band Umwelt-Vollzug Nr. 3). Bern.

BAFU, (Bundesamt für Umwelt). (Hrsg.). (2008-b). *Sturmschaden-Handbuch. Vollzugshilfe für die Bewältigung von Sturmschadeneignissen von nationaler Bedeutung im Wald*. (Sturmschaden-Handbuch). Bern.

BAFU, (Bundesamt für Umwelt). (2013). Warum die Naturgefahren in den Bergen zunehmen. Zugriff am 3.4.2018. Verfügbar unter: <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/landschaft/dossiers/magazin-umwelt-alpen/warum-die-naturgefahren-in-den-bergen-zunehmen.html>

BAFU, (Bundesamt für Umwelt). (2018). Steckbrief Schweizer Wald. Zugriff am 19.9.2019. Verfügbar unter: <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/thema-wald-und-holz/wald-und-holz-fachinformationen/waldzustand-und-waldfunktionen/steckbrief-schweizer-wald.html>

Bebi, P., Putallaz, J.-M., Fankhauser, M., Schmid, U., Schwitter, R. & Gerber, W. (2015). Die Schutzfunktion in Windwurfflächen. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen*, 166 (3), 168–176. doi:10.3188/szf.2015.0168

Bebi, P., Teich, M., Schwaab, J., Krumm, F., Walz, A. & Gret-Regamey, A. (2012). *Entwicklung und Leistung von Schutzwäldern unter dem Einfluss des Klimawandels. Schlussbericht im Rahmen des Forschungsprogramms „Wald und Klimawandel“*. Schlussbericht. Bern: Eidg. Forschungsanstalt WSL, Bundesamt für Umwelt.

Bundesgesetz über den Wald (Waldgesetz, WaG). (1991). 921.0 (Stand am 1. Januar 2017).

- Canadian Avalanche Association. (2016). *Technical Aspects of Snow Avalanche Risk Management - Resources and Guidelines for Avalanche Practitioners in Canada* (C. Campbell, S. Conger, B. Gould, P. Haegeli, B. Jamieson, & G. Statham Eds.). Revelstock BC: Canadian Avalanche Association.
- Delarze, R., Gonseth, Y., Eggenberg, S. & Vust, M. (2015). *Lebensräume der Schweiz - Ökologie - Gefährdung - Kennarten* (3. vollständig überarbeitet.). Bern: Ott.
- Dobbertin, M. (2002). Influence of stand structure and site factors on wind damage comparing the storms Vivian and Lothar. *Forest Snow and Landscape Research*, 77, 187–205.
- Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung. (2000). *Der Lawinenwinter 1999*. Ereignisanalyse. (S. 588). Davos: Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung.
- Fankhauser, M. (2010). Lawinenschutzwirksamkeit auf Vivian-Windwurfflächen. Stand der Verjüngung 20 Jahre nach dem Sturmereignis. In *Bachelorarbeit SHL*, unveröffentlicht
- Feistl, T., Bebi, P., Teich, M., Bühler, Y., Christen, M., Thuro, K. et al. (2014). Observations and modeling of the braking effect of forests on small and medium avalanches. *Journal of Glaciology*, 60 (219), 124–138. doi:10.3189/2014JoG13J055
- Fraser, A. I. & Gardiner, J. B. H. (1967). Rooting and Stability in Sitka Spruce. *Forestry Commission Bulletin*, 40, 28.
- Frehner, M., Wasser, B. & Schwitter, R. (2005). *Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald. Wegleitung für Pflegemassnahmen in Wäldern mit Schutzfunktionen* (Vollzug Umwelt). Bern: Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft.
- Frey, W. & Thee, P. (2002). Avalanche protection of windthrow areas: A ten year comparison of cleared and uncleared starting zones. *Forest Snow and Landscape Research*, 77, 89–107.
- Geoportal GR. (ohne Datum). Waldflächen Schutzwald 2012. *Geoportal Kanton Graubünden*. interaktive Karte. Zugriff am 2.9.2019. Verfügbar unter: [http://map.geo.gr.ch/gr\\_web-maps/wsgi/theme/Schutzwald](http://map.geo.gr.ch/gr_web-maps/wsgi/theme/Schutzwald)
- Hirt, C. (2014). *Digital Terrain Models*. Perth, München: Department of Spatial Sciences Curtin University, Institute for Advanced Study TU Munich.

- Indermühle, M., Raetz, P. & Volz, R. (2005). *LOTHAR Ursächliche Zusammenhänge und Risikoentwicklung. Synthese des Teilprogramms 6*. No. 184. (S. 145). Bern: Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft.
- Kulakowski, D. & Veblen, T. T. (2002). *Influences of fire history and topography on the pattern of a severe wind blowdown in a Colorado subalpine forest*. No. 90. (S. 806–819). University of Colorado.
- Lachat, T., Brang, P., Bolliger, M., Bollmann, K., Brändli, U.-B., Bütler, R. et al. (2019). *Totholz im Wald. Entstehung, Bedeutung und Förderung. 2. überarbeitete Auflage*. Merkblatt für die Praxis No. 52. (S. 12). Birmensdorf: Eidg. Forschungsanstalt WSL.
- Margreth, S. (2004). Die Wirkung des Waldes bei Lawinen. *Forum für Wissen, 2004*, 21–26.
- Margreth, S. (2007). *Lawinenverbauung im Anbruchgebiet. Technische Richtlinien als Vollzugshilfe*. Umwelt-Vollzug No. 0704. (S. 137). Bern, Davos: Bundesamt für Umwelt, WSL Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF.
- Margreth, S., Stoffel, L. & Schaer, M. (2015). *Berücksichtigung der Lawinen und Schneedruckgefährdung bei Seilbahnen. Ein Leitfaden für die Praxis*. WSL.
- Martinec, J., Lang, H. & Rohner, M. (1992). Hydrologischer Atlas der Schweiz. Tafel 3.2: Schneehöhen und Wasseräquivalenten der Schneedecke, Neuschneehöhen extremer Schneefall-Ereignisse. Wabern. Bern: Bundesamt für Landestopografie.
- Marty, C. (2019). Extremwert 100 jährliche Schneehöhe.
- Marty, M. (2019). Lawinenschutz und Waldentwicklung auf der Windwurffläche Disentis 29 Jahre nach Vivian. In *Bachelorarbeit ZHAW*, unveröffentlicht
- Mayer, P., Brang, P., Dobbertin, M. & Zimmermann, S. (2014). *Sturmschäden auf sauren Standorten häufiger*. Informationsblatt Forschungsbereich Wald No. 16. (S. 8). Birmensdorf: Eidg. Forschungsanstalt WSL.
- MeteoSchweiz. (2019-a). *Klimanormwerte Samedan - Normperiode 1981 - 2010*. Zürich: Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz.
- MeteoSchweiz. (2019-b). *Klimabulletin Winter 208/2019*. Zürich: Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz.

- Noak, A., Schönenberger, W. & Thee, P. (2004). Schützen Windwurfflächen vor Lawinen und Stein-  
schlag? *WALD UND HOLZ*, 85 (10), 43–46.
- Ott, E., Frehner, M., Frey, H.-U. & Lüscher, P. (1997). *Gebirgsnadelwälder - Ein praxisorientierter Leit-  
faden für eine standortgerechte Waldbehandlung*. Bern, Stuttgart, Wien: Paul Haupt.
- Ruhm, W. & Schönauer, H. (2011). *Waldbau mit Lärche: Auf die Kronenlänge kommt es an*. Praxisin-  
formation No. 25. (S. 5–6). BFW.
- Schönenberger, W. (2002). Post windthrow stand regeneration in Swiss mountain forests: the first ten  
years after the 1990 storm Vivian. *Forest Snow and Landscape Research*, 77, 61–80.
- Schönenberger, W., Brang, P. & Wasem, U. (2005). *Wiederbewaldung der Vivian-Versuchsflächen  
Disentis, Pfäfers, Schwanden und Zweisimmen. 15 Jahre Entwicklung*. Schlussbericht Wie-  
derbewaldung Vivian-Versuchsflächen 2005. (S. 59). Birmensdorf: Eidg. Forschungsanstalt  
WSL.
- Schwiter, R., Sandri, A., Bebi, P., Wohlgemuth, T. & Brang, P. (2015). Lehren aus Vivian für den Ge-  
birgswald – im Hinblick auf den nächsten Sturm. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen*,  
166 (3), 159–167. doi:10.3188/szf.2015.0159
- Stierlin, H.-R., Brändli, U.-B., Herold, A. & Zinggeler, J. (1994). *Schweizerisches Landesforstinventar*.  
Anleitung für die Feldaufnahmen der Erhebung 1993-1995. (S. 204). Birmensdorf: Eidgenössi-  
sche Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft.
- Swisstopo. (ohne Datum). Karten.
- Thorn, S. & Müller, J. (2016). Rindenschlitzen bei Fichte bekämpft Buchdrucker, aber enthält Biodiver-  
sität. *Anliegen Natur*, (38(1)), 97-98
- Usbeck, T. (2015). Wintersturmschäden im Schweizer Wald von 1865 bis 2014. *Schweizerische Zeit-  
schrift für Forstwesen*, (166), 184–190.
- Wasser, L. (2019). Canopy Height Models, Digital Surface Models & Digital Elevation Models - Work  
with LiDAR Data in Python. *Earth Data Science - Earth Lab*.
- Wegmann, E. (2010). *Verminderung der Sturmgefährdung unserer Wälder - eine Art Checkliste*. Vol-  
ketswil.

Wohlgemuth, T., Schwitter, R., Bebi, P., Sutter, F. & Brang, P. (2017). Post-windthrow management in protection forests of the Swiss Alps. *Eur J Forest Res*, 136, 1029–1040.

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Übersichtskarte der Untersuchungsflächen (Swisstopo, ohne Datum; eigene Bearbeitung) .....	9
Abbildung 2: Übersichtskarte der Kronenschlussgrade (Grautöne) und der Windwurfflächen (rot umrandete).....	11
Abbildung 3: Übersichtskarte der Untersuchungsfläche (Blegs da Vo) mit den eingezeichneten Plots. 12	
Abbildung 4: Darstellung der verschiedenen Höhenmodelle. Digitales Oberflächenmodell (DOM/ DSM), digitales Terrainmodell (DTM) und das Vegetationshöhenmodell (VHM/CHM) (Wasser, 2019).....	14
Abbildung 5: Betroffenheit der verschiedenen Kronenschlussgrade; dunkelgrau ist die Säule des Flächenanteils an der Gesamtfläche. Dies entspricht ebenfalls dem Erwartungswert für die Windwurfflächen. Als Prozentzahl wird die Abweichung der eingetroffenen Werte gegenüber diesem Erwartungswert beschrieben. Ein positiver Wert beschreibt eine höhere Anfälligkeit gegenüber dem Sturmtief Vaia, wobei ein negativer Wert eine erhöhte Resistenz gegenüber dem Windwurf entspricht. ....	17
Abbildung 6: Betroffenheit der verschiedenen Waldstrukturen; dunkelgrau ist die Säule des Flächenanteils an der Gesamtfläche. Dies entspricht ebenfalls dem Erwartungswert für die Windwurfflächen. Als Prozentzahl wird die Abweichung der eingetroffenen Werte gegenüber diesem Erwartungswert beschrieben. Ein positiver Wert beschreibt eine höhere Anfälligkeit gegenüber dem Sturmtief Vaia, wobei ein negativer Wert eine erhöhte Resistenz gegenüber dem Windwurf entspricht. ....	18
Abbildung 7: Betroffenheit der verschiedenen Baumarten; dunkelgrau ist die Säule des Flächenanteils an der Gesamtfläche. Dies entspricht ebenfalls dem Erwartungswert für die Windwurfflächen. Als Prozentzahl wird die Abweichung der eingetroffenen Werte gegenüber diesem Erwartungswert beschrieben. Ein positiver Wert beschreibt eine höhere Anfälligkeit gegenüber dem Sturmtief Vaia, wobei ein negativer Wert eine erhöhte Resistenz gegenüber dem Windwurf entspricht. ....	19
Abbildung 8: Häufigkeitsverteilung der Deckungsgrade aller 25 Plots aufgeteilt in Bodenvegetation, Baumkronen und Totholz. ....	20
Abbildung 9: Übersicht über den Deckungsgrad der Bodenvegetation aller Plots. Zusätzlich wurden pro Plot die drei häufigsten Bodenvegetationstypen erfasst. ....	20
Abbildung 10: Übersicht über den Deckungsgrad des Totholzes aller Plots. Die rot umrandete Säule stellt den Deckungsgrad des Totholzes im Plot dar, wobei die 50 m <sup>2</sup> als 100% angenommen wurden. Die graue Säule zeigt die addierten Deckungsgrade der verschiedenen Höhenklassen, welche zusammen über 100% ergeben konnten, sofern genügend Totholz übereinander lag. ....	21
Abbildung 11: Zusammenhang zwischen Hangneigung und dem Totholzdeckungsgrad. (rho-Wert: -0.151).....	21
Abbildung 12: Boxplot der Hangneigung und Lücken. ....	22
Abbildung 13: Links und in der Mitte ist die Häufigkeitsverteilung der Lückenlängen, bzw. -breiten zu sehen. In der rechten Box ist der Zusammenhang zwischen der Lückenlänge und -breite zusehen. Es gibt eine positive Korrelation, dass längere Lücken auch eine grössere Breite aufweisen (rho-Wert: 0.985).....	22
Abbildung 14: Ausrichtung der liegenden Stämme; Die Exposition des Hanges ist südwestlich (135°) und die 0° Grad entsprechen Norden. Der innere Kreis gibt an, wieviel Prozent der Stämme in welche Richtung schauen. ....	24
Abbildung 15: Orthofoto mit den digitalisierten Stämmen. Es ist gut sichtbar, dass die meisten Stämme in .....	24
Abbildung 16:Boxplots der Wirkhöhen der verschiedenen Rauigkeitselemente (stehendes Totholz, liegende Stämme und Wurzelteller). Zusätzlich sind die maximale Schneehöhe mit 30-jähriger Wiederkehrperiode .....	25
Abbildung 17: Zusammenhang zwischen der Wirkhöhe und dem Stammdurchmesser der liegenden Stämme .....	25

Abbildung 18: Anteil des Totholzes in den jeweiligen Höhenklassen. In dieser Grafik sind stehende Tothölzer,.....	26
Abbildung 19: Übersichtskarte der Lücken im Untersuchungsgebiet. Es wurden einerseits Lücken ohne Rauigkeitselemente >2.62 m (oben) bzw. >1.75 m Höhe (unten) erfasst. Schwarz schraffiert sind die Lücken, welche die Kriterien für einen Lawinenanriss erfüllen. ....	27
Abbildung 20: Boxplot der höchsten Elemente bei der Felderhebung und der Fernerkundung. Die Unterschied ist höchst signifikant (p-Wert: $9.84 \cdot 10^{-4}$ ). ....	28
Abbildung 21: Unterschiede der Totholz-Höhenklassen bei der Felderhebung und der Fernerkundung .....	28
Abbildung 22: Wurzelsystem einer Sitka-Fichte ( <i>Picea sitchensis</i> ) in einer Braunerde an einem 20° steilen Hang. Zu beachten ist die dominante Wurzelausrichtung hangaufwärts (im Bild nach rechts) (Fraser & Gardiner, 1967) .....	32
Abbildung 23:Verlauf der Schutzwirkung auf Windwurfflächen im Laufe der Zeit .....	35

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht über die Kronenschlussgrade nach Stierlin et al. (1994) .....	10
Tabelle 2: Übersicht über die verschiedenen Waldstrukturen mit ihren Bedeutungen nach Stierlin et al. (1994) .....	11
Tabelle 3: Übersicht über die Bodenvegetationstypen gemäss Marty M. (2019) .....	13
Tabelle 4: Berechnung der maximale Schneehöhe mit einer 30-jährlichen Wiederkehrperiode nach .	16
Tabelle 5: Bedeutung der Signifikanz zur Interpretation .....	16
Tabelle 6: Übersicht der Kronenschlussgrade mit ihren Anteilen im Untersuchungsgebiet sowie an den .....	17
Tabelle 7: Übersicht der Waldstrukturen mit ihren Anteilen im Untersuchungsgebiet sowie an den Windwurfflächen .....	18
Tabelle 8: Übersicht über die Vorverjüngung und die Bäume welche in den Plots (4 m Radius) vorhanden waren. V.beere ist die Abkürzung für Vogelbeere (Sorbus aucuparia) .....	23

## **Anhangsverzeichnis**

Anhang 1: Feldprotokolle

Anhang 2: Legende für Feldprotokolle

Anhang 3: Selbständigkeitserklärung

Anhang 4: Poster

# Anhang 1 Feldprotokolle

## Feldprotokolle für die Flächenparameter



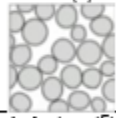
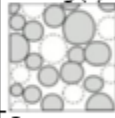


**A**

02.07.2019

<b>Feldprotokoll Disentis 2019</b> <b>Cavorgia, Teilfläche «belassen»</b>
--

<b>BearbeiterIn:</b>			<b>Datum:</b>	<b>Uhrzeit:</b>
<b>Plot Nr.</b>			<b>Foto Nr.</b>	
<b>GPS Koordinaten</b> Zentrum LV95	Y	X	<b>Höhe [m ü. M.]</b>	<b>Genauigkeit [m]</b>

<b>Lücke</b> Definition siehe Legende	(0/1)		Länge (cm)		Breite (cm)		Bemerkungen	
<b>Bodenvegetation</b> Typen siehe Legende	Typ 1	Anteil %	Typ 2	Anteil %	Typ 3	Anteil %	Deckungsgrad (%)	
<b>Totholz</b> Plotfläche	Deckungsgrad (%)							
<b>Totholz in Höhenkategorien</b> alle Elemente total 100%	<50cm (%)		50-100cm (%)		100-150cm (%)		150-200cm (%)	> 200cm (%)

<b>Kronendeckungsgrad</b> Radius 10m	
<b>Gedrängt (1)</b> 	<b>Normal (2)</b> 
<b>Locker (3)</b> 	<b>Räumig (4)</b> 
<b>Aufgelöst (5)</b> 	<b>Gruppen gedrängt (6)</b> 

<b>Bemerkungen / Skizze</b>
-----------------------------





## Anhang 2: Legende für Feldprotokolle

### Legende Feldaufnahmen

SLF, Bachelorarbeit Tobias Ott

#### Formular A = Allgemeine Plot-Parameter

Koordinaten in CH1903+/LV95

Lücke: Hangabwärts >10m, Ohne Rauigkeitselemente > 50cm  
ohne Bäume BHD > 8cm

Bodenvegetation: (Die 3 häufigsten Vegetationstypen)

M	Moos
F	Farn
G	Gras, <del>Luzula</del>
Z	Zwergstrauch
Ho	Hochstauden = <del>Adenostyles sp.</del>
Ru	Rubus = Himbeeren & Brombeeren
K	Kraut = alles andere
N	Nicht bewachsen

Kronendeckungsgrad: mit Radius 10m anschauen

#### Formular EV = Einzelparameter Verjüngung

Azimet Richtung vom Plot-Zentrum zur Pflanze in °  
im Uhrzeigersinn aufgenommen

Distanz Abstand der Pflanze vom Plot-Zentrum in **cm**

##### Baumart

<del>F</del> <sub>l</sub>	Fichte	Ta	Tanne
<del>L</del> <sub>ä</sub>	Lärche	<del>F</del> <sub>ö</sub>	Föhre
<del>B</del> <sub>u</sub>	Buche	Ba	Bergahorn
Es	Esche	Ei	Eiche
Bi	Birke	<del>W</del> <sub>e</sub>	Weide
Er	<del>Grauerle</del>	<del>K</del> <sub>i</sub>	Kirsche
<del>V</del> <sub>b</sub>	Vogelbeere	<del>M</del> <sub>b</sub>	Mehlbeere
<del>A</del> <sub>x</sub>	Arve		

Einwuchsjahr (in Höhe > 20 cm)

BHD: Immer von oberhalb messen

Höhe 2019 Schaftlänge in cm, **ohne Neutrieb**

##### Verbiss?

0 = nein

1 = ja

##### Andere Schäden?

0 = nein

1 = ja

##### Schadegrad

0	kein Schaden (wird nicht registriert)
1	bis 1/3 geschädigt, bzw. schwach
2	1/3 bis 2/3 geschädigt, bzw. mittel
3	über 2/3 geschädigt, bzw. stark
4	letal (Pflanze neu tot)

##### Moderholzverjüngung?

0 = nein

1 = ja

#### Formular ET = Einzelparameter Totholz

Azimet Richtung vom Plot-Zentrum zur Pflanze in °  
im Uhrzeigersinn aufgenommen

Distanz Abstand der Pflanze vom Plot-Zentrum in **cm**

Höhe: vertikal über Grund, gemessen am Punkt der am nächsten zum Plot-Mittelpunkt ist. Immer von oben messen. (Am Hang oberhalb des Baumes stehen)

Durchmesser: nur bei Stämmen, dickeres Ende

Vermoderungsgrad: 5 Stufen (Nächsten zur ~~Plotmitte~~)

1 = Frischholz

2 = Hartholz

3 = Morschholz

4 = Moderholz

5 = Mulmholz

Bewegung von Hand: lässt sich der Stamm leicht bewegen?

##### Moderholzverjüngung?

0 = nein

1 = ja, es hat auf dem Stamm Verjüngung

##### Baumart Verjüngung

<del>F</del> <sub>l</sub>	Fichte	Ta	Tanne
<del>L</del> <sub>ä</sub>	Lärche	<del>F</del> <sub>ö</sub>	Föhre
<del>B</del> <sub>u</sub>	Buche	Ba	Bergahorn
Es	Esche	Ei	Eiche
Bi	Birke	<del>W</del> <sub>e</sub>	Weide
Er	<del>Grauerle</del>	<del>K</del> <sub>i</sub>	Kirsche
<del>V</del> <sub>b</sub>	Vogelbeere	<del>M</del> <sub>b</sub>	Mehlbeere
<del>A</del> <sub>x</sub>	Arve		

Wenn das höchste Element ein Stamm ist, wird er doppelt geschrieben (Auch als nächster Stamm)!

## Anhang 3: Selbständigkeitserklärung

### Erklärung betreffend das selbständige Verfassen einer Bachelorarbeit im Departement Life Sciences und Facility Management

Mit der Abgabe dieser Bachelorarbeit versichert die Studierende, dass sie die Arbeit selbständig und ohne fremde Hilfe verfasst hat.

Die unterzeichnende Studierende erklärt, dass alle verwendeten Quellen im Text oder Anhang korrekt ausgewiesen sind, d.h. dass die Bachelorarbeit keine Plagiate enthält, also keine Teile, die teilweise oder vollständig aus einem fremden Text oder einer fremden Arbeit unter Vorgabe der eigenen Urheberschaft bzw. ohne Quellenangabe übernommen worden sind.

Bei Verfehlungen aller Art treten Paragraph 39 und Paragraph 40 der Rahmenprüfungsordnung für die Bachelor- und Masterstudiengänge an der Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften vom 29. Januar 2008 sowie die Bestimmungen der Disziplinarmassnahmen der Hochschulordnung in Kraft.

Ort, Datum:

Unterschrift:



Zürich, 06.10.2019

# Anhang 4: Poster

## Schutzwirkung gegen Lawinen auf Vaia-Windwurfflächen im Val Tuors

Bachelorarbeit  
Tobias Ott

### Einführung

Windwurf zählt neben Borkenkäferplagien und Waldbrand zu den grössten Gefahren des Schweizer Lawinenschutzwaldes (Bebi et al., 2015). Vor allem in Gebirgsregionen übernimmt der Wald durch die Verankerung oder die Reduktion von Gefahrenprozessen eine wichtige Schutzfunktion für Mensch und Infrastruktur (ArgeAlp, 2009). Ein intakter Lawinenschutzwald trägt mit verschiedenen Eigenschaften zur Stabilisierung der Schneedecke bei (Margreth, 2004; Frehner et al., 2005). Richtet ein Sturm wie Vaia (2018) in einem Schutzwald grossen Schaden an, ist die Schutzwirkung zumindest zeitweise in Frage gestellt. Es stellt sich nun die Frage, ob durch die Oberflächenrauigkeit der umgestürzten Bäume die Schutzwirkung noch ausreichend ist und wie lange es dauern wird, bis die natürliche Regeneration den Schutz wieder gewährleisten kann.

### Forschungsfragen:

- Welche Waldtypen bezüglich dem Kronenschlussgrad, Bestandsstruktur und Baumarten waren vom Sturm Vaia im Oktober 2018 betroffen?
- Wie ist die momentane Lawinenschutzwirkung auf der Untersuchungsfläche einzuschätzen und wie wird sie sich entwickeln?
- Soll die Windwurffläche in Blegs da Vo geräumt oder belassen werden?
- Wie kann die Lawinenschutzwirkung am besten erfasst werden und können Fernerkundungsdaten bei einer objektiven Einschätzung der Restschutzwirkung helfen?

### Material & Methode

Das Untersuchungsgebiet liegt nahe Bergün im Val Tuors in den kontinentalen Hochalpen. Es erfolgte eine Analyse der vom Sturm betroffenen Waldtypen auf einer Fläche von 290 ha. Diese Auswertung erfolgte ausschliesslich mit Fernerkundungsdaten. Zudem wurden in einem kleineren Perimeter von 1.3 ha 25 Plots von 50m<sup>2</sup> unterschieden, auf denen Felddaten erhoben wurden. Die nachhaltige Lawinenschutzwirkung wurde ebenfalls auf dieser kleinen Fläche in Blegs da Vo anhand der Feld- und Fernerkundungsdaten beurteilt.

### Resultate

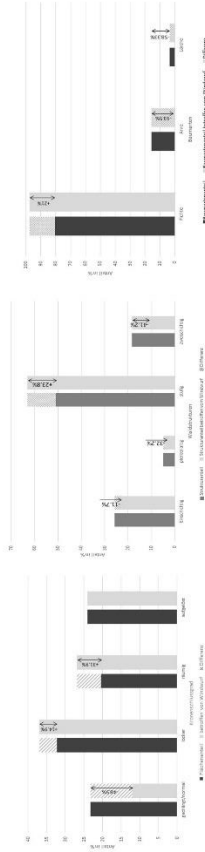


Abbildung 1-3: Betroffenheit der verschiedenen Waldtypen Kronenschlussgrad (links), Waldstrukturen (mitte) und Baumarten (rechts). Dunkelgrau ist die Säule des Flächenanteils an der Gesamtfläche vor dem Sturm und entspricht dem Erwartungswert der Windwurffläche. Die hellgraue Fläche ist der effektiv vom Sturm Vaia beschädigte Anteil. Als Prozentzahl wird die Abweichung der eingetretenen Werte gegenüber diesem Erwartungswert beschrieben. Ein positiver Wert beschreibt eine erhöhte Anfälligkeit, wobei ein negativer Wert eine erhöhte Resistenz gegenüber dem Sturm Vaia entspricht.

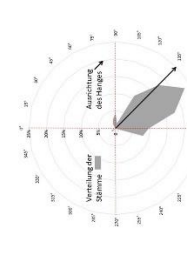


Abbildung 4: Ausrichtung der liegenden Stämme. 80% liegen zwischen 90°-180°.

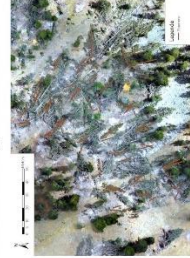


Abbildung 5: Luftbild mit den digitalisierten Bäumen. Die meisten liegen in Hangrichtung.

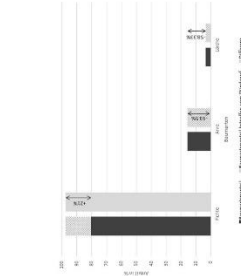


Abbildung 6: Anteil des Totholzes in den jeweiligen Höhenklassen (Schneehöhe 1.75m und Sollhöhe 2.62m), welche mit Fernerkundung erhoben wurden.

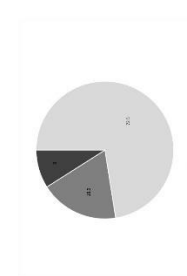


Abbildung 7: Boxplot der verschiedenen Rauigkeitselemente, welche während der Felddaufnahme erhoben wurden.

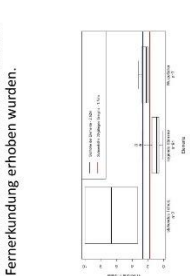


Abbildung 8: Karte der Lücken (>30m lang, 10m breit) ohne Rauigkeitselemente >2.62 m (oben) bzw. ohne Rauigkeitselemente >1.75 m unten.

### Diskussion

Von den drei untersuchten Faktoren kommt wahrscheinlich den Baumarten mit der Fichte als Flachwurzler die grösste Bedeutung zu, da sie sehr anfällig auf Sturmschaden ist (Wegmann, 2010). Zahlreiche Faktoren welche nicht untersucht wurden, haben jedoch einen erheblichen Einfluss auf die Verletzbarkeit bei einem Sturmereignis (Bebi et al., 2015; Mayer et al., 2014; Wegmann, 2010). Die Oberflächenrauigkeit des liegenden Totholzes leistet auch einen erheblichen Schutz gegen das Anreisen von Lawinen, wenn sie die Sollhöhe nicht erreichen (Frey & Thee, 2002). Neben der Höhe ist auch die Verteilung dieser Rauigkeitselemente von entscheidender Bedeutung (Noak et al., 2014). Neben der Schutzwirkung in den ersten Jahren, kann das Totholz auch für die Regeneration der Fläche von grossem Vorteil sein (Frey & Thee, 2002; Ott et al., 1997; Schwiter et al., 2015). Zusätzlich spielt es für die Biodiversität eine wichtige Rolle (BAFU, 2008). Die Beurteilung der Lawinenschutzwirkung nur durch Fernerkundung in dieser Arbeit reicht nicht aus um eine qualitative Aussage zu treffen. Zahlreiche kleinere Unsicherheiten haben sich durch manuelle Bearbeitungen und Korrekturen aufgrund ungleichen Auflosungen der Modelle addiert. Für eine quantitative Aussage reichen die Aussagen aber mit Sicherheit aus.

### Fazit

Räumige, stufige Fichtenbestände wurden in der Untersuchung vom Sturm Vaia am meisten beschädigt. Jedoch ist es eine komplexe Interaktion zahlreicher Faktoren, welche das Risiko eines Schadens ausmachen, wobei der Sturm selbst den grössten Anteil ausmacht. Die Lawinenschutzwirkung hat durch den Sturm Vaia vorerst keine grossen Einbussen erlitten. Durch die hohe Oberflächenrauigkeit des liegenden Totholzes wird die Schneedecke relativ gut stabilisiert. Daher wird auch von einem Räumen der Fläche abgeraten. Negativ muss jedoch die fast gänzlich fehlende Vorverjüngung gewertet werden. Daher könnte eine gezielte Pflanzung für die nachhaltige Schutzwirkung in Betracht gezogen werden. Die Fernerkundung ist für die Beurteilung der Lawinenschutzwirkung für die Zukunft sicher ein gutes Mittel. Die GIS-Analyse muss jedoch noch weiterentwickelt werden und Feldbegehungen bleiben unentbehrlich.



© Tobias Ott, 2019. Dieses Dokument ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte vorbehalten. Nachdruck, Vervielfältigung und Verbreitung, auch auszugsweise, ist ohne schriftliche Genehmigung des Autors. Dieses Dokument ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte vorbehalten. Nachdruck, Vervielfältigung und Verbreitung, auch auszugsweise, ist ohne schriftliche Genehmigung des Autors. Dieses Dokument ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte vorbehalten. Nachdruck, Vervielfältigung und Verbreitung, auch auszugsweise, ist ohne schriftliche Genehmigung des Autors.