

Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften ZHAW
Departement Life Sciences und Facility Management LSFM
Institut für Umwelt und natürliche Ressourcen IUNR

Lawinenschutz und Waldentwicklung auf der Windwurffläche Disentis 29 Jahre nach Vivian



Bachelorarbeit von

Mirjam Marty

Bachelorstudiengang 2016

Umweltingenieurwesen

Abgabedatum: 24.10.2019

Fachkorrektoren:

Forsting. ETH Hansueli Bucher

ibW Bildungszentrum Wald

Bovel, 7304 Maienfeld

Dr. Peter Bebi

WSL Institut für Schnee und Lawinenforschung SLF

Forschungsgruppe Gebirgsökosysteme

Flüelastrasse 11, 7260 Davos Dorf



Impressum

Autorin	Mirjam Marty Bachelorstudiengang 2016 Umweltingenieurwesen martymir@students.zhaw.ch
Hochschule	Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften ZHAW Departement Life Sciences und Facility Management LSFM Institut für Umwelt und natürliche Ressourcen IUNR Campus Grüental CH-8820 Wädenswil
Zitiervorschlag	Marty, M. (2019). Lawinenschutz und Waldentwicklung auf der Windwurffläche Disentis 29 Jahre nach Vivian. In <i>Bachelorarbeit ZHAW</i> , unveröffentlicht.
Keywords	Windwurf, Schutzwald, Lawinen, Totholz, Waldentwicklung, Verjüngung, Moderholzverjüngung, Wirkhöhen, Rauigkeit
Foto Titelseite	Totholz und Folgebestand auf der Windwurffläche Disentis im Jahr 2019 (Quelle: eigene Aufnahme)

Zusammenfassung

Schutzwälder leisten in der Schweiz einen wichtigen Beitrag zur Sicherheit von Bevölkerung und Infrastruktur. Sie wirken gegen Lawinen, indem sie für einen unregelmässigen Aufbau der Schneedecke sorgen, die Schneedecke stützen und damit die Entstehung von Lawinen verhindern. Wird ein Schutzwald durch einen Sturm stark beschädigt, ist dessen Funktion für Jahrzehnte in Frage gestellt. Liegengelassenes Totholz kann in der ersten Zeit nach dem Sturm Schutz bieten. Dieser lässt mit zunehmender Vermoderung des Holzes nach und der durch Verjüngung entstandene Folgebestand sollte übernehmen. Dazwischen kann ein Zeitfenster mit reduzierter Schutzwirkung entstehen. In dieser Bachelorarbeit wird die Schutzwirkung gegen Lawinen und die Waldentwicklung auf der belassenen Windwurffläche Disentis, Kanton Graubünden, 29 Jahre nach dem Totalschaden durch den Sturm Vivian untersucht.

Die Fläche ist eine langfristige Versuchsfläche der Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) und befindet sich auf 1400 bis 1550 m ü.M. Es wurde die Wirkhöhe (Höhe über Grund von Totholz und gewachsenen Bäumen) mit einem Vegetationshöhenmodell auf der ganzen Fläche analysiert. Die Entwicklung der Rauigkeit wurde zu vier Zeitpunkten (1991, 2001, 2009, 2019) mit Hilfe von digitalen Oberflächenmodellen berechnet. Vor Ort wurden auf 25 permanent eingerichteten Plots à 50 m² das belassene Totholz und die aufkommende Verjüngung untersucht. Diese Erhebung setzte eine langjährige Datenreihe fort und liess eine Analyse der zeitlichen Entwicklung zu.

Die flächigen Wirkhöhen waren, mit Ausnahme von zwei Lücken, wirksam für einen 30- bis 100-jährlichen Schneefall. Die Rauigkeit veränderte sich deutlich über die Jahre mit einem Tiefpunkt im Jahr 2001. Im Jahr 2019 war die Rauigkeit wieder fast so hoch wie direkt nach dem Sturm, jedoch weniger gleichmässig verteilt über die Fläche. Das Totholz hatte durch die fortgeschrittene Vermoderung erwartungsgemäss weiter an Höhe verloren und erreichte die Höhe eines 30-jährlichen Schneefalles nicht mehr. Trotzdem könnte es in einem durchschnittlichen Winter noch gut gegen Lawinenanrisse wirken. Bei den Bäumen über 130 cm Höhe wurde ein deutlicher Zuwachs seit 2005 festgestellt. Sie hatten sich in weiten Teilen der Fläche zu einem schutzwirksamen Folgebestand entwickelt. Verjüngung zwischen 20-130 cm Höhe war bei allen Baumarten (Birke, Fichte, Vogelbeere und Weide) vorhanden. An Standorte mit starkem Hochstaudenbewuchs fehlte sie jedoch gänzlich. Moderholzverjüngung (auf Totholz wachsend) hatte im Vergleich zu 2010 deutlich zugenommen, trug aber noch nichts zur Schutzwirkung gegen Lawinen bei. In Zukunft könnte sie entscheidend sein für die Verjüngung in Bereichen mit dicht wachsenden Hochstauden.

Gesamthaft gesehen, erfüllt die Windwurffläche Disentis die Schutzfunktion gegen Lawinen weitgehend gut. Die Schutzwirkung des Totholzes hat erwartungsgemäss abgenommen und der Folgebestand an Bedeutung gewonnen. Dazwischen gibt es noch kleinere Lücken mit ungenügender Schutzwirkung, so dass im Jahr 2019 stellenweise noch ein gewisses Schutzdefizit besteht.

Abstract

Protection forests are important for the safety of Switzerland's people and infrastructure, as they offer wide-ranging protection against natural hazards. In particular, they can prevent the formation and release of snow avalanches by creating a rough ground and stabilizing the snowpack. However, this protection is often lost if a storm destroys such a forest. In the initial period after a storm event, dead wood left in place can assume the protective function normally provided by live forests. This effect decreases over time as these lying logs decay. Meanwhile, tree regeneration should begin and lead to an effective protection forest again. If this process is delayed, there is likely a period with insufficient protection against avalanches. This bachelor thesis examines an area destroyed by windthrow in Disentis, canton Grisons in southeast Switzerland 29 years after the complete blowdown of the forest by the storm "Vivian". The study area remained uncleared (i.e. all the deadwood was left in place). The aims are to analyse how the protective function developed since the storm and what degree of protection the study area provides today.

This area is a long-term study site of the Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research (WSL). It is situated at an altitude of 1400-1550 m a.s.l. I analysed height above ground of deadwood elements and growing trees with a canopy height model over the whole study area. Furthermore, I calculated roughness of the ground from digital surface models at four timepoints (1991, 2001, 2009, 2019). In the field, I assessed deadwood and tree regeneration on 25 permanent plots in July 2019. Together with a long-time data set, these data allow us to analyse the development since the storm.

Height above ground of deadwood and living trees exceed 30- to 100-year snowfall heights in the majority of the study area. This suggests that the release of an avalanche is unlikely for such a snowfall. However, there are still two gaps of more than 40 m length, where an avalanche might be possible in case of heavy snowfall. Roughness changed considerably over time, with the lowest value observed in 2001. Today, the terrain is almost as rough again as directly after the storm. However, distribution of roughness elements is less equal than in the first years after windthrow. As expected, height of deadwood elements decreased over time and did not reach the 30-year snowfall height. Furthermore, the wood is largely decayed. Nevertheless, lying logs and root plates could still contribute to terrain roughness and therefore provide avalanche protection in a winter with average snowfall. Measured trees over 130 cm height had grown clearly since the last measurement in 2005. They developed into an effective stock of trees in large parts of the study area. Seedlings of 20-130 cm height are present for all four tree species found in the study area (birch, rowan, spruce, and willow). There are, however, parts of the study area with extensive growth of ground vegetation, thus making tree regeneration seemingly impossible. The occurrence of seedlings growing on deadwood has increased since it was first examined in 2010, although much more is needed before contributing to the protective effect. In the future, however, this growth could play an important role for regeneration in areas with dense ground vegetation.

On the whole, the protective function against avalanches of the study area in Disentis is now sufficient in most parts. The effective heights of deadwood have decreased as expected and the heights of regrown trees have increased considerably. There are still some smaller gaps between the grown trees that lead to a small deficiency of protective function in certain parts of the Disentis study site as recorded in 2019. Nevertheless, the study area would already offer a rather good protection to a village or infrastructure situated down slope.

Dank

An dieser Stelle möchte ich mich herzlich bei meinen beiden Betreuern, Hansueli Bucher und Peter Bebi, für die grosse Unterstützung bedanken. Sie waren stets da bei Fragen, haben sich mit konstruktiven Rückmeldungen eingebracht und mich dazwischen frei arbeiten lassen.

Ein grosses Dankeschön geht ans SLF für den Arbeitsplatz und die Unterkunft über den Sommer 2019.

Vielen Dank an Ueli Wasem für den spannenden Tag im Feld und die tollen Fotos von früher & heute und an Mauro Marty für die präzisen Koordinaten. Ein weiteres Dankeschön geht an die Academia Vivian für die gute Infrastruktur während der Feldarbeit und an Beat fürs geduldige Messen und Schreiben zwischen Brennesseln und nassen Hochstauden.

Weiter möchte ich mich bei Natalie für die gute Zusammenarbeit, Alex und Till für die Drohnenaufnahme und Hilfe bei Fernerkundungs- & GIS-Fragen und Frank für die Unterstützung bei der statistischen Auswertung bedanken.

Fürs Korrekturlesen danke ich Vroni, Suraiya und Nathalie herzlich. Merci an Alena und Tobi für die inhaltliche und moralische Unterstützung während dem Studium und bei der Bachelorarbeit.

Zuletzt ein herzliches Dankeschön an die Gruppe Gebirgsökosysteme und meine Mitbewohner der SLF-WG für die angenehme Zeit im Sommer 2019 und an meine Familie & Freunde für den guten Rückhalt bei allem was ich mache.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	- 1 -
1.1	Schutzwirkung gegen Lawinen	- 1 -
1.2	Vergangene Untersuchungen in Disentis.....	- 3 -
1.3	Zielsetzung und Forschungsfragen.....	- 4 -
2	Material und Methoden	- 5 -
2.1	Untersuchungsgebiet.....	- 5 -
2.2	Orthofoto & digitales Oberflächenmodell.....	- 6 -
2.2.1	Wirkhöhen flächig 2019	- 7 -
2.2.2	Rauigkeit 1991-2019.....	- 9 -
2.3	Feldaufnahme.....	- 9 -
2.3.1	Totholz.....	- 11 -
2.3.2	Folgebestand.....	- 12 -
2.3.3	Auswertung Felddaten	- 13 -
2.4	Schneehöhe & BSH.....	- 14 -
3	Resultate	- 15 -
3.1	Wirkhöhen flächig 2019	- 15 -
3.2	Rauigkeit 1991-2019.....	- 17 -
3.3	Feldaufnahme.....	- 20 -
3.3.1	Totholz.....	- 24 -
3.3.2	Folgebestand.....	- 26 -
4	Diskussion	- 33 -
4.1	Wirkhöhen flächig 2019	- 33 -
4.2	Rauigkeit 1991-2019.....	- 34 -
4.3	Feldaufnahme.....	- 35 -
4.3.1	Totholz.....	- 35 -
4.3.2	Folgebestand.....	- 36 -
5	Schlussfolgerung	- 39 -
5.1	Ausblick.....	- 40 -
6	Literaturverzeichnis.....	- 41 -

Abkürzungen

BHD	Durchmesser des Baumstammes auf Brusthöhe
BSH	Verhältnis Baumoberhöhe (h_{dom}) zu Schneehöhe eines 30-jährlichen Ereignis
CHM	engl.: canopy height model
DOM	digitales Oberflächenmodell
DSM	engl.: digital surface model (= DOM)
DTM	digitales Terrainmodell, engl.: digital terrain model
GCP	ground control points
GIS	geografisches Informationssystem
GNSS	globales Navigationssatellitensystem
hE	höchstes Totholzelement pro Plot
LFI	Schweizer Landesforstinventar
Lidar	engl.: light detection and ranging
n	Stichprobengrösse
NaiS	Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald: Wegleitung für Pflegemasnahmen in Wäldern mit Schutzfunktion
RTK	real-time-kinematik, deut.: Echtzeitkorrektur via Mobilfunk
SLF	WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung, Davos, Schweiz
St	Totholzstamm
VHM	Vegetationshöhenmodell
VRM	Vector Ruggedness Measure, deut.: Vektoren-Rauigkeits Mass
WSL	Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, Birmensdorf, Schweiz

1 Einleitung

Wälder können Lebewesen, Sachwerte und Infrastrukturen vor Naturgefahren schützen. Das ist möglich, indem sie die Entstehung von Prozessen wie Lawinen und Steinschlag verhindern oder deren Einfluss reduzieren (Frehner et al., 2005). Wälder mit dieser Funktion werden in der Schweiz als Schutzwälder ausgeschieden. Das sind gemäss dem Bundesamt für Umwelt 49% des Schweizer Gesamtwaldes (Losey & Wehrli, 2013). Windwürfe verändern die Waldstruktur schlagartig und oft auf einer grossen Fläche (Bebi et al., 2015). Stürme, insbesondere im Winterhalbjahr, stellen die grössten Störungen für Wälder in Europa dar (Wohlgemuth et al., 2017). Wenn ein Schutzwald betroffen ist, kann dies seine Funktionstüchtigkeit stark verändern (Bebi et al., 2015).

Im Februar 1990 richtete der Wintersturm Vivian grosse Schäden in West- und Mitteleuropa an. Vivian gehörte zu den grössten Störungen im Schweizer Wald in den letzten 150 Jahren (Usbeck et al., 2010). Mit 92% der Schadenflächen in den Alpen und Voralpen, waren viele Gebirgswälder betroffen (Schmidtke & Scherrer, 1997). Beinahe 50 km² Windwurffläche entstanden, wovon 59% Wälder mit Schutzfunktion betrafen (Wohlgemuth et al., 2017).

Der Umgang mit den enormen Schäden stellte Praktiker und Forscher vor neue Herausforderungen. Es fehlte an wissenschaftlichen Grundlagen zur Wirkung von liegendem Sturmholz und nötige Zeitdauer für die Wiederbewaldung. Die geeignete Behandlungsmethode zu finden, führte zu regen Diskussionen. Daher richtete die Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) vier Versuchsflächen in Disentis, Pfäfers, Schwanden und Zweisimmen ein. Dort wurden drei Behandlungsvarianten (Räumung des Sturmholzes, Pflanzung mit jungen Bäumen und Belassen des Totholzes, siehe Abb. 2) über längere Zeit untersucht (Schwitter et al., 2015). In dieser Bachelorarbeit wird die Schutzwirkung gegen Lawinen und die Waldentwicklung im belassenen Teil der Untersuchungsfläche Disentis angeschaut.

1.1 Schutzwirkung gegen Lawinen

Potenzielle Lawinenschutzwälder befinden sich in Gebieten und Höhenlagen mit genügend grossen Schneemengen und an Hängen mit über 30° Neigung. Dabei kann der Wald gemäss NaiS (Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald: Wegleitung für Pflegemassnahmen in Wäldern mit Schutzfunktion) besonders im Entstehungsgebiet gegen Lawinen wirken. In Gebieten mit Nadelwäldern und in 1600 - 2200 m Höhe reissen trockene Schneebretter eher an Hängen mit Nordost bis Nordwest Exposition an. In Laub- und Mischwäldern unterhalb von 1200 m ü.M. entstehen vermehrt Gleitschnee- und feuchte Lockerschneelawinen an sonnigen Expositionen (Frehner et al., 2005). Nach dem Sturm ist in nicht geräumten Windwurfflächen ein gewisser Schutz gegen Naturgefahren, und damit auch Lawinen, durch das belassene Totholz gegeben (Bebi et al., 2015). Dieser nimmt mit zunehmender Zersetzung ab und sollte idealerweise vom aufkommenden Folgebestand übernommen werden (siehe Abb. 1). Dazwischen kann je nach Entwicklung jedoch ein Zeitfenster mit reduzierter Schutzwirkung entstehen. Langjährige Untersuchungen zu dieser Problematik gibt es bisher wenige (Wohlgemuth et al., 2017), weshalb die fortführende Beobachtung von grosser Bedeutung ist.

Belassenes Totholz

Das liegende Totholz wirkt gegen Lawinenanrisse, indem es die Bodenrauigkeit stark erhöht, einen gleichmässigen Aufbau der Schneedecke verhindert und die Schneedecke stützt (BAFU, 2008). Diese Schutzwirkung ist besonders gross, wenn die Wirkhöhen (lotrechte Höhe der Totholzelemente über Grund) und Stammdurchmesser gross sind und die Stämme schräg zur Falllinie liegen. Sie nimmt aber im Laufe der Zeit ab und erfüllte in den Untersuchungen von Bebi et al. (2015) nach 20 Jahren die Schutzfunktion nicht mehr vollständig. Die Zersetzungsgeschwindigkeit ist abhängig von der Baumart und dem Durchmesser des Stammes (Lachat et al., 2019). Zudem läuft der Prozess schneller ab an warmen und feuchten Standorten und wenn das Totholz mit dem Boden in Kontakt ist. Die Zersetzung von Fichtenholz läuft gemäss Lachat et al. (2019) schnell ab und nach 80 Jahren sind rund 95% abgebaut. Bei sehr steilen Windwurf Flächen mit Neigung über 45° kann sich das Totholz mit dem Schnee selber in Bewegung setzen, was wiederum eine Gefahrenquelle darstellt (BAFU, 2008).

Bestockung

Wald beeinflusst den Aufbau der Schneedecke durch Interzeption (Zwischenlagerung des Schnees auf den Kronen), ein günstiges Mikroklima und eine hohe Bodenrauigkeit (Frehner et al., 2005). Damit kann er die Wahrscheinlichkeit von Lawinenanrissen vermindern. Damit Bäume einen Beitrag leisten können, müssen sie die Schneedecke um mindestens das Doppelte überragen. Auch wirken wintergrüne Arten durch die höhere Interzeption besser als winterkahle Arten. Bei geringen Fliesshöhen von ein bis zwei Metern kann der Wald auch eine bremsende Wirkung auf abgehende Lawinen haben, bei grösseren Fliesshöhen und Geschwindigkeiten wird er von der Lawine zerstört (Frehner et al., 2005). Nach einem Windwurf ist entscheidend, dass sich die Verjüngung möglichst rasch zu einem wirksamen Bestand entwickeln kann. Ist dies nicht der Fall, muss unter Umständen mit temporären oder festen Schutzbauwerken nachgeholfen werden (BAFU, 2008). Künstliche Pflanzungen können dabei in Gebirgswäldern einen Vorsprung von rund zehn Jahren gegenüber der natürlichen Verjüngung bewirken (Schönenberger, 2002a). Zudem können damit die Verteilung und die Artenzusammensetzung beeinflusst und allenfalls Lücken vermieden werden (Brang et al., 2015).

Auf vermodernden Baumstämmen kann sich ebenfalls Verjüngung, Moderholzverjüngung genannt, entwickeln. Dabei ist das Moderholz ein eher nährstoffarmes Substrat, das der Verjüngung aber andere Vorteile bieten kann: Schutz vor Vegetationskonkurrenz, einen ausgeglichenen Wasserhaushalt durch Freisetzung von Feuchtigkeit beim Vermoderungsprozess, eine schnelle Ausaperung im Frühling und Schutz vor Kriechschnee. Idealerweise liegt das Moderholz dafür nahe am Boden. Etabliert sich die Verjüngung auf einem hohen Moderholzstück, kann sie später schlecht im Boden weiterwurzeln und ist stärker von Austrocknung bedroht (Ott et al., 1997). Bäume können jedoch nicht direkt auf frischem Totholz ansamen, eine gewisse Zersetzung des Holzes ist dafür notwendig (Netzer, 2010). Die in der Literatur genannten Zeitfenster sind unterschiedlich, Zielonka (2006) fand rund 30 Jahre nach dem Absterben des Baumes ein günstiges Substrat für die Fichte vor. Auf den Versuchsflächen der WSL wurde bereits sieben Jahre nach dem Sturm Fichtenverjüngung auf Totholz gefunden (Wohlgemuth et al., 2002).

1.2 Vergangene Untersuchungen in Disentis

Die Versuchsfläche in Disentis, Kanton Graubünden, wurde nach dem Vivian Sturm 1990 eingerichtet (Schönenberger, 2002b). Siehe dazu Abb. 3. Während der ersten zehn Jahre wurden verschiedenste Untersuchungen durchgeführt. Die Schwerpunkte beinhalteten Boden, Dynamik der Bodenvegetation, Waldverjüngung, Mykorrhiza, Wildverbiss, die Ausbreitung des Borkenkäfers, Lawinen, Veränderung des liegend gelassenen Totholzes und weiteres. Das Ziel der Projekte war, die drei Behandlungsmethoden zu vergleichen und Schlüsse für die Praxis zu ziehen, um in Zukunft besser mit Sturmereignissen umgehen zu können (Schönenberger, 2002b). In den folgenden Jahren wurden weitere Untersuchungen gemacht. Hier werden diejenigen beschrieben, welche sich mit dem Totholz und der Verjüngung auf dem belassenen Teil der Disentis-Fläche befassten.

Totholz

Gemäss Bebi et al. (2015) wurden folgende Aspekte des Totholzes untersucht:

- Flächige Wirkhöhen der liegenden Stämme mit Hilfe eines Orthofotos und daraus des generierten Höhenmodells
- Verschiebung, Bruchstellen und Wirkhöhen ausgewählter Stämme im Feld

Diese Untersuchungen wurden in den Jahren 1992 und 2001 (Frey & Thee, 2002) sowie im Jahr 2010 (Putallaz, 2010) durchgeführt. Zudem wurde 2001 und 2010 die benötigte Kraft, um Stämme in Bewegung zu bringen, mit Hilfe von Zugversuchen an 10 Stämmen ermittelt. Weiter wurde 2010 mit einer GIS-Analyse der Einfluss von verschiedenen Standortfaktoren auf die Bewegung der Stämme untersucht (Putallaz, 2010).

Verjüngung

Die Verjüngung wurde in 25 kreisförmigen Plots à 50 m² erhoben. Dies geschah in den Jahren 1992, 1993, 1995, 1998, 2000 und 2005 (Schönenberger & Brang, 2006). Dabei wurden die Bäume mit Azimut und Distanz zum Plotzentrum eingemessen, damit sie über die Jahre wieder auffindbar waren (Schönenberger, 2002a). Neben Baumart und Höhe wurden auch das Einwuchsjahr, Typ der Begleitpflanze, Vitalität, Verbiss und andere Schäden aufgenommen.

Netzer (2010) untersuchte die Moderholzverjüngung auf verschiedenen Vivian-Sturmflächen. Zwei Probenahmen wurden im belassenen Teil der Untersuchungsfläche in Disentis durchgeführt. Dabei wurde jeweils auf einer Grösse von zehn mal zehn Meter sämtliche Oberflächen des Totholzes erfasst, bis mindestens 10 m² enthalten waren. Von diesem wurde der Vermoderungsgrad, die Moderholzverjüngung mit Art und Höhe und weitere Parameter zu Vegetationstypen erhoben. Zusätzlich wurde die Verjüngung auf Kontrollflächen neben dem Totholz erfasst.

1.3 Zielsetzung und Forschungsfragen

In dieser Bachelorarbeit wird die Schutzwirkung gegen Lawinen und die Waldentwicklung auf der Windwurffläche Disentis 29 Jahre nach dem Sturm untersucht. Wie in 1.1 beschrieben, ist sie sowohl vom liegenden Totholz, als auch von der aufkommenden Verjüngung abhängig. Beide Grössen verändern sich im Laufe der Zeit (Bebi et al., 2015), wie in Abb. 1 zu sehen ist. Das Ziel ist es, der Zustand und die Entwicklung der Windwurffläche Disentis in der untenstehenden Grafik einzuordnen. Dazu werden folgende Fragen aufgegriffen:

- Frage 1:** Wie sind die Wirkhöhe und Rauigkeit auf der ganzen Fläche? Gibt es Lücken zwischen den wirksamen Elementen?
- Frage 2:** Wie hoch sind die Wirkhöhen des belassenen Totholzes noch? Wie weit ist die Vermoderung fortgeschritten?
- Frage 3:** Hat sich die Verjüngung zu einem schutzwirksamen Folgebestand entwickelt? Trägt die Moderholzverjüngung bereits dazu bei?

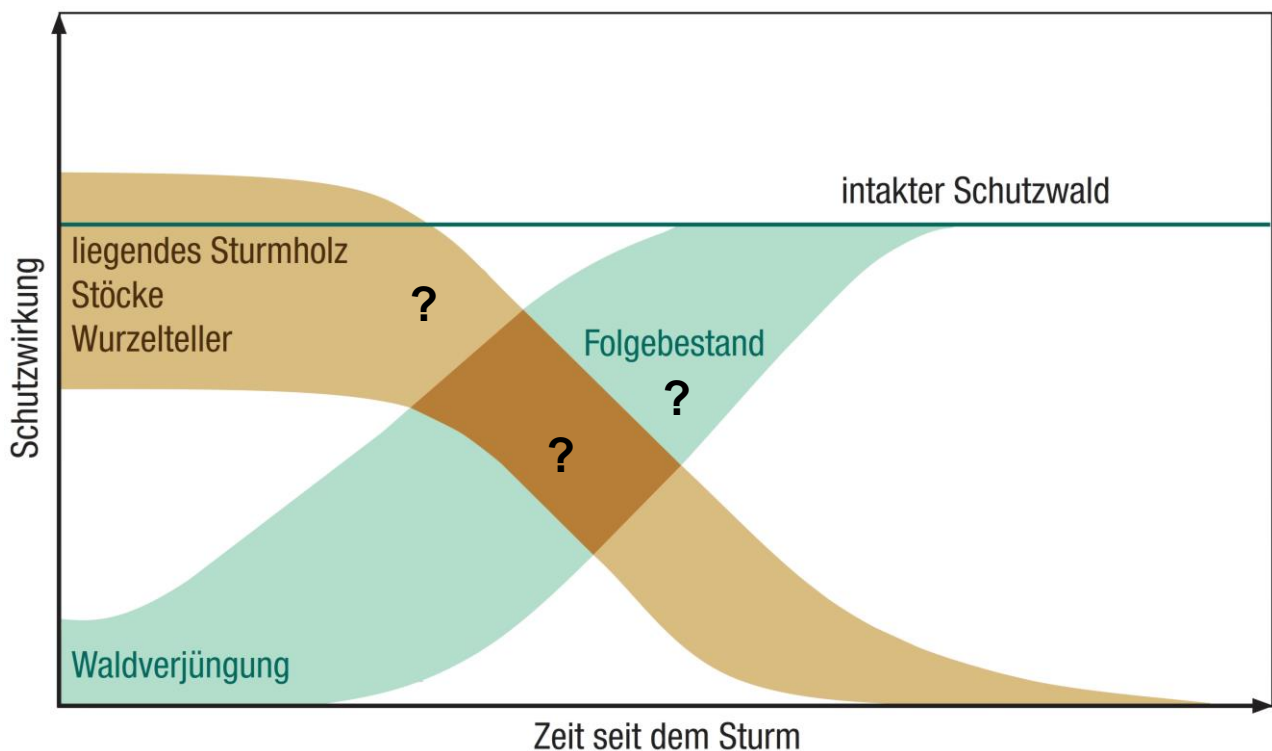


Abb. 1: Entwicklung der Schutzwirkung auf Windwurfflächen im Laufe der Zeit (Quelle: Bebi et al., 2015; verändert)

2 Material und Methoden

2.1 Untersuchungsgebiet

Diese Arbeit fand auf dem belassenen Teil der Vivian-Versuchsfläche bei Disentis statt. Die Fläche liegt zwischen Disentis und Curaglia im Uval Cavorgia Su (siehe Abb. 3) auf 1400-1550 m über Meer an einem Nordwesthang. Vor dem Sturm bestand der Wald aus 110- bis 150-jährigen Fichten (*Picea abies*) (Schönenberger, 2002b). Die Neigung der Fläche liegt zwischen 30-45° und ist somit potenzielles Lawinengelände, sowohl für die Entstehung als auch während des Transits. Der Boden besteht aus Cambi- und Podsol und liegt auf Gneis, Granit und Schiefer. Nach dem Vivian-Sturm 1990 befand sich die Fläche inmitten eines 100 ha grossen Sturmschadens mit dem nächsten Samenbaum in 250-500 m Distanz (Schönenberger, 2002b). Der Jahresniederschlag am Standort liegt bei durchschnittlich 1250 mm und die Jahrestemperatur bei 4°C (Schönenberger, 2002a). Der belassene Teil der Fläche ist rund 2.5 ha gross und befindet sich zwischen den beiden anderen Teilflächen, wie in Abb. 2 zu sehen ist. Die Stammzahl vor dem Sturm betrug rund 320/ha mit einem Vorrat von 780 m³/ha (Schönenberger, 2002a). Die Vorverjüngung im belassenen Teil war spärlich mit 8 Fichten und 48 Vogelbeeren /ha (Schönenberger et al., 2005). Die Schneehöhe wurde auf der Fläche in Disentis von 1990/91 bis 2000/01 gemessen und betrug in dieser Zeitspanne im Mittel 114 cm mit einem Maximum von 165 cm. In dieser Messreihe war auch der schneereiche Winter 1998/99 enthalten (Frey & Thee, 2002). Die Höhenstufe ist unter subalpin und der natürliche Waldstandort ein Hochstauden-Tannen-Fichtenwald (Brang et al., 2015).



Abb. 2: Ansicht der drei Teilflächen mit unterschiedlicher Behandlung, diese Arbeit untersuchte nur den belassenen Teil (rotes Rechteck), (Quelle: U. Wasem, WSL; verändert)



Abb. 3: Karte mit dem Untersuchungsgebiet (rotes Rechteck) im Uaul Cavorgia Su zwischen Disentis und Curaglia im Kanton Graubünden (Quelle: Swisstopo, ohne Datum; verändert)

2.2 Orthofoto & digitales Oberflächenmodell

Für diese Arbeit wurden ein Orthofoto und ein digitales Oberflächenmodell (DOM, engl.: digital surface model DSM) der Versuchsfäche erstellt. Die Planung und Befliegung erfolgte durch die Forschungsgruppe Gebirgsökosysteme des WSL-Instituts für Schnee und Lawinenforschung (SLF). Der Flugplan wurde mit der Software UgCS gemacht (Überlappung 80%, Flughöhe 142 m, 633 Bilder). Die Aufnahme erfolgte am 18. Juni 2019 mit einer Drohne von DJI, Typ Mavic 2 PRO mit Kamera L1D-20c (Brennweite 10.26 mm). Es wurden zehn Kontrollpunkte (ground control points GCP) mit einem GNSS (globales Navigationssatellitensystem) des Herstellers STONEX, Typ S800 mit Echtzeitkorrektur (RTK), eingemessen. Die photogrammetrische Erstellung des DOM und Orthofotos erfolgte mit der Software Agisoft Metashape (Version 1.5.3.8469). Das DOM wurde mit stereoskopischer Bearbeitung gemacht, indem sich überlappende, von verschiedenen Winkeln aufgenommene Bilder miteinander verbunden wurden (Hirt, 2014). Die Auflösung des DOM betrug 10 cm mit einer Dichte von 279 Punkten/m². Die Auflösung des Orthofotos betrug 3 cm.

2.2.1 Wirkhöhen flächig 2019

Alle Analysen in einem geografischen Informationssystem (GIS) wurden mit dem Programm ArcGIS Pro (Version 2.3.0) von ESRI ausgeführt. Die flächige Wirkhöhe wurde mit Hilfe eines Vegetationshöhenmodells (VHM, engl.: canopy height model CHM) analysiert. Um dieses Modell zu erstellen, wurde vom Oberflächenmodell der Drohne das digitale Terrainmodell (DTM) abgezogen, was die Höhe der Vegetation ergab. Siehe dazu Abb. 4.

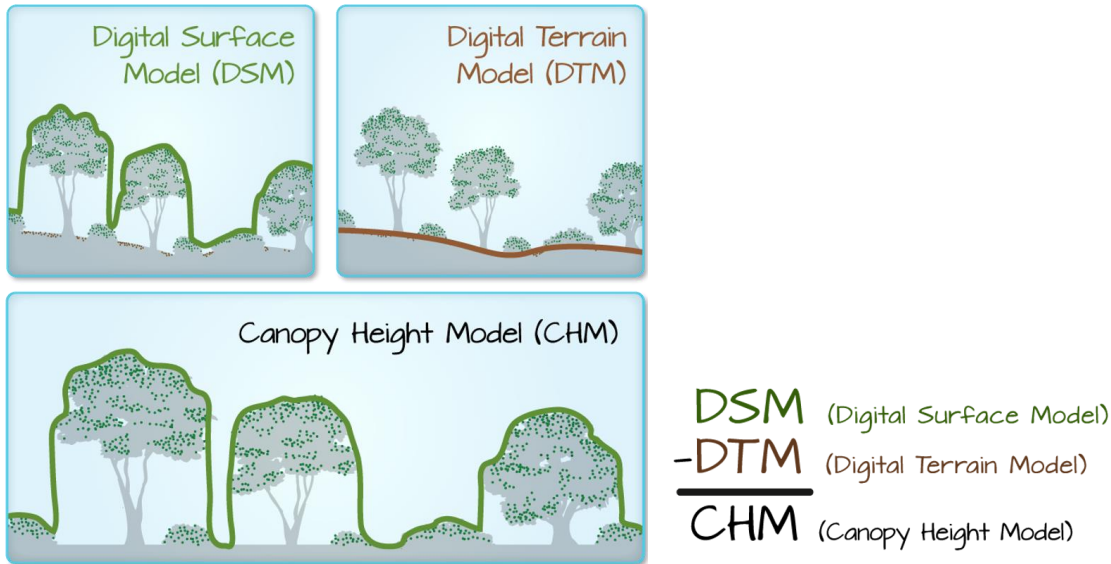


Abb. 4: Verschiedene Höhenmodelle in der Fernerkundung, DSM entspricht deutsch DOM, CHM entspricht deutsch VHM (Quelle: earthdatascience.org, ohne Datum)

Das verwendete DTM war einen Ausschnitt des schweizweiten Höhenmodells von Swisstopo, Swis-sALTI3D. Dies verfügt über eine Auflösung von 2 m. Deshalb wurde es mit dem Werkzeug *Resample* auf eine Auflösung von 10 cm gebracht, was der Auflösung des DOM entspricht. Dabei wurde die bilineare Methode verwendet, welche für kontinuierliche Daten wie ein Höhenmodell geeignet ist (ESRI, ohne Datum). Mit dem Werkzeug *Raster Calculator* wurde das DTM vom DOM abgezogen. Das resultierende VHM wurde auf drei unbewachsenen Kontrollflächen überprüft (Kiesstrassen oberhalb und unterhalb der Versuchsfläche). Auf diesen Flächen sollte die Höhe des VHM null betragen. Es wurde eine mittlere Höhe von +23 cm mit Median von +20 cm gefunden. Darum wurden mit dem *Raster Calculator* 22 cm vom ganzen VHM abgezogen.

Danach wurde das VHM mit den gemessenen Baumhöhen aus der Feldaufnahme verifiziert. Die Bäume wurden mit Azimut & Distanz zum Plotzentrum erhoben. Daraus konnten die Koordinaten der Bäume mit folgender Formel berechnet werden:

$$\begin{aligned} x' &= x + (d \times \sin(\alpha)) & d &= \text{Distanz (m) zum Plotzentrum} \\ y' &= y + (d \times \cos(\alpha)) & \alpha &= \text{Azimut (rad) zum Plotzentrum} \end{aligned}$$

Die Baumhöhen wurden im GIS mit der Höhe des VHM am jeweiligen Standort verglichen, wenn der Baum auf dem Orthofoto identifiziert werden konnte. Die Bäume waren aufgrund der stereoskopischen Bearbeitung auf dem Orthofoto und VHM im Vergleich zur Realität teils um einige Meter verschoben dargestellt. Diese Abweichung war nicht gleichbleibend gross und in eine bestimmte Richtung, weshalb die Verwendung eines starren Puffers als nicht zielführend erachtet wurde. Vielmehr wurden nur Baumhöhen gemessen, welche aufgrund der Art und des Standortes auf dem Orthofoto

mit Sicherheit optisch bestimmt werden konnten. Dabei wurden Bäume im Umkreis von drei Metern angeschaut. Von 64 im Feld gemessenen Bäumen konnten 29 auf dem Orthofoto identifiziert werden. Die Differenz zwischen Feldmessung und erstelltem VHM ist in Abb. 5 ersichtlich. Der Mittelwert lag bei $+0.49 \text{ m} \pm 1.8 \text{ m}$ und der Median bei 0.1 m . Die maximalen Abweichungen betragen $+7 \text{ m}$ und -2 m .

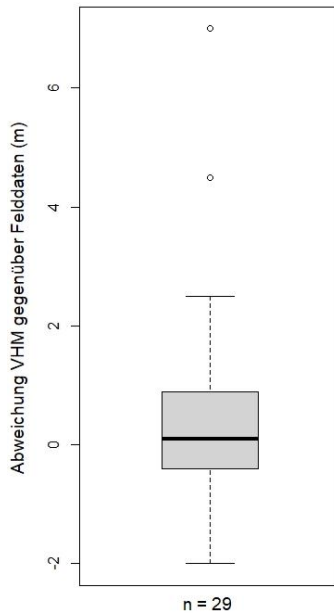


Abb. 5: Abweichung des Vegetationshöhenmodells (VHM) gegenüber der im Feld erhobenen Baumhöhen. Positive Werte bedeuten ein höheres VHM im Vergleich zur Realität

Aus dieser Abschätzung der Genauigkeit wurde das VHM in verschiedene Wirkhöhenklassen eingeteilt (siehe Tab. 1). Mehr zu den Anforderungen an die Wirkhöhe ist in Abschnitt 2.4. beschrieben.

Tab. 1: Wirkhöhenklassen des erstellten Vegetationsmodells, verwendet in Abb. 10

Wirkhöhe (m)	Kriterium	Effekt
< -0.5	Fehler im VHM	nicht verwendbar (mehr dazu in Abschnitt 4.1).
-0.5 bis 0.5	teils ungenau	keine Wirkung gegenüber Lawinen
0.5 bis 2.5	= Mittelwert + Standardabweichung aus Verifikation mit Felddaten	Totholz und kleinere Verjüngung enthalten, gewisse Rauigkeit vorhanden
2.5 bis 5	höher als Sollhöhe von 2.2 m, (BSH mit Faktor 1.5)	Verjüngung mit deutlicher Wirkung bei einem grossen Schneefall, siehe 2.4
5 bis 10		grössere Bäume, wirken auch bei maximalem Schneefall
> 10 m		grosse Bäume, Wiederbewaldung weit fortgeschritten

Für die Lawinenschutzwirkung ist auch die räumliche Verteilung der Wirkhöhen wichtig. Deshalb wurden Lücken zwischen Bereichen mit einer Wirkhöhe von $> 2.5 \text{ m}$ und von $> 5 \text{ m}$ ausfindig gemacht. Der Grenzwert für eine Lücke wurde bei 40 m in Falllinie gewählt (gemäss NaiS, Anforderungsprofil minimal für einen 40° steilen Hang (Frehner et al., 2005)). Der Unterschied zwischen der horizontalen Distanz und Lückenlänge am Hang wurde für eine durchschnittliche Neigung von 37.5° korrigiert (Korrekturfaktor 1.26).

2.2.2 Rauigkeit 1991-2019

Als Grundlage für die Beurteilung der Rauigkeit wurden digitale Oberflächenmodelle aus den Jahren 1991, 2001, 2009 und 2019 verwendet. Die DOM der ersten drei Zeitpunkte wurden durch Swisstopo erstellt und verfügen über eine Auflösung von 20 cm. Das DOM von 2019 verfügt über eine Auflösung von 10 cm (siehe 2.2). Alle vier DOM wurden während der Vegetationszeit erstellt (Mai bis August). Um eine gute Vergleichbarkeit herzustellen, wurde das DOM von 2019 auf die geringere Auflösung von 20 cm gebracht (Werkzeug *Resample*, Methode *bilinear*).

Zur Veranschaulichung der Oberfläche wurden Schattierungsbilder erstellt (Werkzeug *Hillshade*). Danach wurde die Rauigkeit gemäss Sappington et al. (2007) berechnet. Die verwendete Methode nennt sich Vector Ruggedness Measure (VRM, siehe Abb. 6 rechts). Diese berücksichtigt bei der Berechnung sowohl die Hangneigung als auch die Exposition des Hanges. So wird die Rauigkeit optimal wiedergegeben (Fall C in Abb. 6). Andere Methoden sind stärker abhängig von der Hangneigung und geben somit einen glatten, aber steilen Hang ebenfalls als rau an (Fall B in Abb. 6).

Das Ergebnis war einen Rauigkeitsindex von null bis eins für jede Rasterzelle. Ein Wert von mehr als 0.04 gilt als rau, alles über 0.08 als sehr rau (Brožová et al., 2019). Die Ergebnisse wurden gemäss dieser Skala eingefärbt und für jedes Jahr Mittelwert, Median und Standardabweichung berechnet.

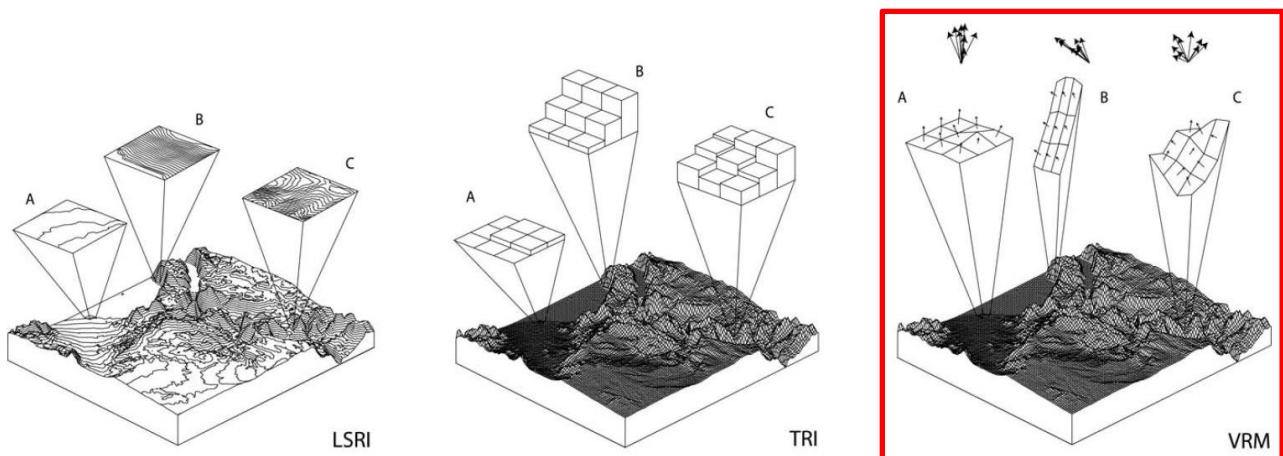


Abb. 6: Drei verschiedene Methoden um die Rauigkeit der Oberfläche zu berechnen. Hier wurde die Methode VRM verwendet (rotes Rechteck), welche Hangneigung und Exposition gemeinsam berücksichtigt (Quelle Sappington et al., 2007)

2.3 Feldaufnahme

Als Stichprobenflächen wurden die 25 permanenten Plots übernommen, auf welchen in der Vergangenheit die Verjüngung untersucht worden war, siehe 1.2 (Schönenberger & Brang, 2006). Diese waren in einem Netz von fünf mal fünf Plots mit 20 m Abstand angeordnet und jeweils 50 m² gross. Der Kronendeckungsgrad wurde im Jahr 2019 auf einer Fläche mit Radius von 10 m erhoben. Für die restlichen Variablen wurden mit 4 m Radius erhoben. Damit konnten 5% der 2.5 ha Versuchsfläche erfasst werden (siehe Abb. 7). Die Plotzentren waren 1992 mit einem rot bemalten Aluminiumpfosten markiert und vom Gegenhang eingemessen worden (Schönenberger et al., 2005). Dank diesen Koordinaten konnten die Plotzentren mit einem GNSS von Trimble, Typ GeoXH mit RTK, gefunden werden. Dies verfügt über eine Genauigkeit von rund 10 cm (Trimble, 2011). Wo kein Pfosten gefunden werden konnte, wurde das Plotzentrum mit dem GNSS bestimmt und ein neuer Pfosten gesetzt. Dieser wurde mit der Plotnummer, «2019» und gelber Sprayfarbe gekennzeichnet.

Die Feldaufnahme fand zwischen dem 3. und 9. Juli 2019 statt und dauerte rund vier Arbeitstage. Es wurde jeweils zu zweit gearbeitet. Die Aufnahmeprotokolle sind in Anhang 1 und 2 ersichtlich. Die gleichen Variablen wurden im Sommer 2019 ebenfalls für eine Bachelorarbeit in einer einjährigen Windwurffläche erhoben (Ott, 2019). Die Felddaten beider Arbeiten werden in die grössere Auswertung im Rahmen des Doktrats von Natalie Brožová am SLF einfließen.

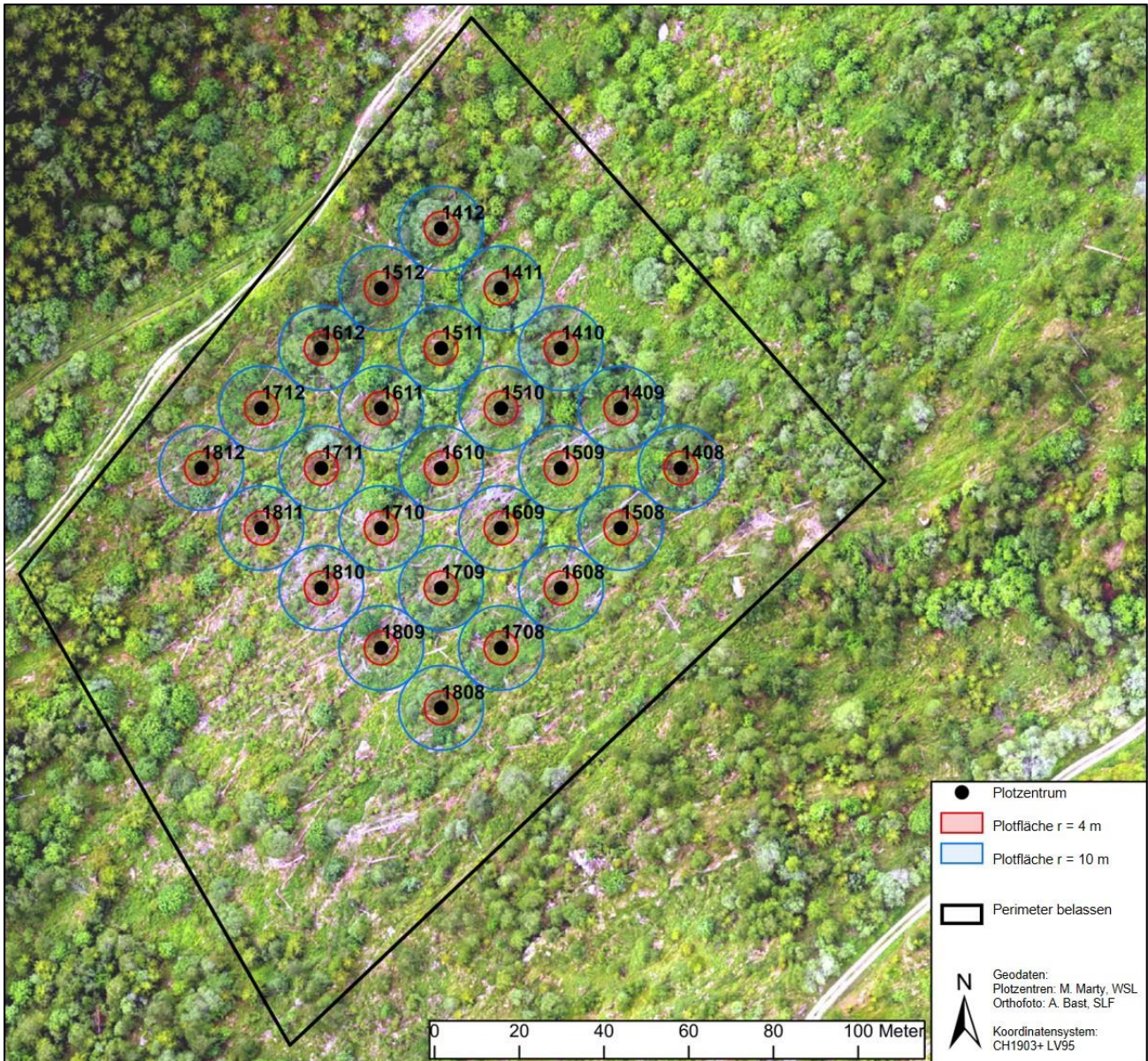


Abb. 7: Plots der Feldaufnahmen 2019, Fläche für Erhebung des Kronendeckungsgrad blau, restliche Variablen wurden auf der roten Fläche erhoben (Quelle: Koordinaten der Plotzentren von M. Marty, WSL; Orthofoto vom 18.06.2019 erstellt durch A. Bast, SLF; eigene Produktion)

Auf jedem Plot wurden zuerst folgende flächendeckende Variablen erfasst:

- Lücken
- Bodenvegetation
- Totholz: Deckungsgrad & Anteile in Höhenkategorien
- Kronendeckungsgrad & Struktur

Es wurde geschaut, ob sich die Stichprobenfläche mit einer Lücke überschneidet. Wenn sich hangabwärts auf mehr als 10 m kein Rauigkeitselement mit einer Höhe > 50 cm (Totholz / Felsen) oder einen Baum mit Brusthöhendurchmesser (BHD) von > 8 cm befand, wurde dies als Lücke gezählt. Der Schwellenwert von 10 m wurde gewählt, um keine Lücken zu verpassen und weil Lawinen gemäss CCA (2016) schon in Lücken von 10 mal 10 Metern anreissen können. Falls eine Lücke angetroffen wurde, wurden zusätzlich Länge und Breite notiert.

Bei der Bodenvegetation wurde der Deckungsgrad in % der Plotfläche geschätzt. Dabei wurde vom Plotzentrum die ganze Fläche überschaut und die Anteile von Auge abgeschätzt. Weiter wurden die dominanten Typen mit dem jeweiligen geschätzten Anteil am Deckungsgrad notiert. Es wurden maximal drei Typen erfasst. Die Typen wurden von Schönenberger et al. (2005) übernommen, einzig die Kategorie Rubus wurde ergänzt (siehe Tab. 2).

Tab. 2: Typen Bodenvegetation (gemäss Schönenberger et al., 2005; verändert)

Abkürzung	Kategorie	Beispiele
M	Moos	
F	Farn	Wald-Frauenfarn (<i>Athyrium filix-femina</i>)
G	Gras	Reitgräser (<i>Calamagrostis sp.</i>), Hainsimsen (<i>Luzula sp.</i>)
Z	Zwergstrauch	Heidelbeere (<i>Vaccinium myrtillus</i>), Besenheide (<i>Calluna vulgaris</i>)
Ho	Hochstauden	Alpendost (<i>Adenostyles sp.</i>), Weidenröschen (<i>Epilobium sp.</i>)
Ru	Rubus	Himbeere (<i>Rubus idaeus</i>)
K	Kraut	Brennnessel (<i>Urtica dioica</i>)
N	nicht bewachsen	

Für das Totholz wurde geschätzt, wie viel Prozent der Plotfläche damit bedeckt waren. Auch diese Schätzung erfolgte von der Mitte des Plots aus von Auge. Dies wurde weiter eingeteilt in fünf Höhenkategorien: < 50 cm, 50-100 cm, 100-150 cm, 150-200 cm, > 200 cm. Dabei wurde pro Kategorie der geschätzte Anteil in % am gesamten Totholz notiert.

Der Kronendeckungsgrad für den Radius 10 m wurde abgeschätzt, indem zuerst mit dem Laser-Distanzmesser (Typ Leica DistoTMX310) 10 m in mindestens zwei Richtungen bestimmt wurde, damit klar war, auf welcher Fläche die Schätzung zu erfolgen hatte. Die Schätzung selber erfolgte von Auge. Weiter wurde der Schlussgrad eingeteilt in die Kategorien: gedrängt, normal, locker, räumig, aufgelöst oder in Gruppen gedrängt. Dabei wurden die Schätzhilfen des vierten Landesforstinventars verwendet (Düggelin & Keller, 2017). Zudem wurde eine Skizze des Plots erstellt, um Totholzelemente und Bäume später zu referenzieren.

2.3.1 Totholz

- Höhe
- Durchmesser
- Vermoderungsgrad
- Moderholzverjüngung

Pro Stichprobenfläche wurde jeweils das höchste Element (hE) gesucht. Dies konnte ein Wurzelteller, -stock oder ein Stamm sein. Weiter wurden die drei nächstgelegenen Stämme erfasst. Das höchste Element konnte Teil der drei Stämme sein und wurde in diesem Fall doppelt notiert. Falls sich nicht genug Stämme auf dem Plot selber befanden, wurden auch weiter entfernte Stämme aufgenommen. Bei den vier Elementen wurde mit einem Messband oder Laser-Distanzmesser der Abstand zum Zentrum gemessen. Mit einem Kompass wurde das Azimut in Grad bestimmt. Dies diente zur späteren Lokalisierung der Elemente (siehe 2.2.1).

Die Höhe über Grund wurde mit einem Doppelmeter an der nächstgelegenen Stelle zum Plotzentrum und jeweils oberkant des Elementes gemessen. Die Daten erweiterten eine Zeitreihe seit Beginn der Untersuchung. Dabei wurden in den Jahren 1991 bis 2010 jeweils die gleichen 98 Stämme gemessen. Dies wurde im Jahr 2019 nicht mehr versucht, da die Stämme schon 2010 schwer aufzufinden waren (gemäss Peter Bebi in einer Besprechung am 13.06.2019). Der Durchmesser wurde am dickeren Ende des Stammes gemessen. Bei Wurzeltellern wurde der Durchmesser in der Mitte genommen. Der Vermoderungsgrad wurde mit einem Sackmesser nach der Methode des Schweizer Landesforstinventars (LFI) beurteilt (Lachat et al., 2019). Dies geschah an derselben Stelle wo auch die Höhe des Elementes gemessen wurde. Die fünf Vermoderungsgrade sind in Abb. 8 ersichtlich.

Zudem wurde auf jedem Element nach Moderholzverjüngung gesucht. Falls Verjüngung vorhanden war, wurde notiert um welche Baumarten es sich handelte und pro Art Anzahl und Höhe der höchsten Verjüngung mit dem Doppelmeter gemessen. Da sich teilweise viele kleine Verjüngungen auf den Stämmen befanden, wurde es als zu detailliert erachtet, von jedem Pflänzchen die Höhe zu erheben.

Frischholz
saftführend



Hartholz
saftlos, fest; das Messer dringt in Faserrichtung nur sehr schwer ein



Morschholz
weniger fest; das Messer dringt in Faserrichtung leicht ein, nicht aber quer



Moderholz
weich; das Messer dringt in jeder Richtung leicht ein



Mulmholz
sehr locker oder pulverig;
kaum noch zusammenhängend



Abb. 8: Sackmesseremethode zur Bestimmung des Zersetzungsgrades von Totholz (Quelle: Lachat et al., 2019)

2.3.2 Folgebestand

- Baumart
- Höhe
- BHD
- Verbiss und andere Schäden

In früheren Untersuchungen bereits gemessene Bäume (siehe 1.2) wurden soweit möglich mit Distanz und Azimut referenziert. Seit 2005 gewachsene Bäume wurden neu erfasst. Dabei wurde zwischen Bäumen über 130 cm Höhe und Verjüngung mit Höhen darunter unterschieden. Bei den Bäumen wurde die Höhe ohne den Endtrieb von 2019 (wie bei Schönenberger et al., 2005) und der BHD gemessen. Beide Grössen wurden mit dem Doppelmeter aufgenommen. Falls der Baum zu hoch war, wurde ein Vertex des Herstellers Haglöf Sweden AB (Typ Vertex IV und Transponder T3) verwendet. Der BHD wurde jeweils hangaufwärts des Baumes stehend gemessen. Zudem wurde notiert, ob Verbiss vorhanden und wie stark der Schaden war. Verbiss durch Wildtiere betrifft vor allem Bäume bis 130 cm, bei viel Schnee teilweise auch grössere Bäume (BAFU, 2010). Deshalb wurde bei der Auswertung der Verbiss von allen Bäumen unter 4 m Höhe angeschaut. Weitere Schäden wurden auch aufgenommen. Die Schwere der Schäden wurde in fünf Klassen beurteilt, siehe dazu Tab. 3. Die Verjüngung wurde gleich aufgenommen, aber ohne Distanz, Azimut und BHD.

Tab. 3: Schadengrad Verbiss und andere Schäden (Quelle: Schönenberger et al., 2005)

Schadengrad	Beschreibung
0	keine Schäden
1	bis 1/3 geschädigt = schwach
2	1/3 bis 2/3 geschädigt = mittel
3	über 2/3 geschädigt = stark
4	letal

2.3.3 Auswertung Felddaten

Die Visualisierung der Felddaten erfolgte in Microsoft Excel (Version 1907) und RStudio (Version 1.2.1335). Es wurden dazu Boxplots, Histogramme, Säulendiagramme und ein Mosaik-Plot verwendet. Die statistische Auswertung erfolgte in RStudio. Für metrische Daten mit zwei Stichproben wurde der Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test (nachfolgend Wilcoxon-Test genannt) verwendet, da keiner der Datensätze normalverteilt war (Crawley, 2007). Die Normalverteilung wurde mit dem Shapiro-Test überprüft (normalverteilt, falls $p\text{-Wert} > \alpha = 5\%$). Für dichotome Daten wurde anstelle des üblichen Chi-Quadrat-Tests der Fisher-Test genommen. Dieser ist besser geeignet für kleine Stichprobengrössen ($n < 5$, Crawley, 2007). Beim paarweisen Fisher-Test wurde die moderatere Holm-Korrektur (Standard in R) und die strengere Bonferroni-Korrektur angewendet und die Ergebnisse miteinander verglichen. In den Resultaten sind zu jedem Test der p-Wert und die Stichprobengrösse n angegeben. Die Signifikanz der Resultate wurde wie folgt bewertet (siehe Tab. 4).

Tab. 4: Signifikanz-Levels zur Interpretation der statistischen Ergebnisse

α	p-Wert	Signifikanz-Level
-	> 0.05	nicht signifikant
5%	< 0.05	signifikant
1%	< 0.01	hoch signifikant
0.1%	< 0.001	höchst signifikant

2.4 Schneehöhe & BSH

Gemäss NaiS wird im Wald bei Lawinen mit einer statistische Wiederkehrdauer von 30 Jahren gerechnet (Frehner et al., 2005). Man geht davon aus, dass innerhalb dieser Zeitspanne viele Lücken, in welchen Lawinen möglicherweise anreissen, wieder zuwachsen können. Im Freiland wird mit einer Wiederkehrperiode von 100 Jahren gerechnet, wenn es um die Konstruktion von Lawinenverbauungen geht (Frehner et al., 2005). Die Schneehöhe eines 30-jährlichen Ereignisses auf der Versuchsfläche Disentis wurde nach dem Leitfaden «Berücksichtigung der Lawinen- und Schneedruckgefährdung bei Seilbahnen», Anhang A.4, berechnet (Margreth et al., 2015). Die Berechnung ist in Tab. 5 ersichtlich. Als Ausgangswert wurde die maximale Schneehöhe eines 100-jährlichen Ereignisses der nächstgelegenen Messstation genommen. Dies war ein Messfeld im rund 2 km entfernten Curaglia, welches seit 43 Jahren in Betrieb ist. Die Schneehöhe betrug 111 cm \pm 11% (Angabe von C. Marty, SLF). Diese wurde mit einem Gradienten gemäss dem Hydrologischen Atlas der Schweiz auf die mittlere Höhe der Stichprobenzentren umgerechnet. Der Gradient betrug 24.8 cm pro 100 m für die Region bei Disentis (Martinec et al., 1992). Exposition und Hangneigung wurden mit einem Faktor von 1.1 berücksichtigt, da an steileren Hängen mit Nordexposition mehr Schnee liegt. Weiter wurde mit dem Faktor 1.1 eingerechnet, dass in Waldlichtungen 10-20% mehr Schnee liegt als im Offenland. Die Rückrechnung auf ein 30-jährliches Ereignis erfolgte mit dem Faktor von 0.8. Dies ergab für die Versuchsfläche in Disentis eine 30-jährliche Schneehöhe von 144 cm.

Tab. 5: Berechnung der 30-jährlichen maximalen Schneehöhe auf der Versuchsfläche Disentis (gemäss Margreth et al., 2015)

Höhen über Meer		
Curaglia Station	1330 m ü.M.	
Disentis Versuchsfläche	1460 m ü.M.	Durchschnitt aus Plotzentren
Differenz	+130 m	
Schneehöhe 100-jährlich		
Curaglia Station	111 cm	+/-11%, gemäss C. Marty, SLF
Korrekturfaktor	24.8 cm/100m	nach HADES Tafel 3.2
<i>Disentis Versuchsfläche</i>	<i>143 cm</i>	
Exposition & Hangneigung		
Korrekturfaktor	1.1	NW und >15°
<i>Disentis Versuchsfläche</i>	<i>158 cm</i>	
Einfluss Wald		
Korrekturfaktor	1.1	in Waldlichtungen 10-20% höher
<i>Disentis Versuchsfläche</i>	<i>173 cm</i>	
Schneehöhe 30-jährlich		
Korrekturfaktor	0.8	
<i>Disentis Versuchsfläche</i>	144 cm	

Unter BSH wird das Verhältnis der Baumoberhöhe (h_{dom}) zur Schneehöhe eines 30-jährlichen Ereignisses verstanden. Damit ein stehender Wald das Anreissen einer Lawine verhindern kann, ist ein BSH-Faktor von zwei notwendig (Frehner et al., 2005). Liegen gelassenes Totholz auf Windwurfflächen bietet aber eine höhere Stabilität und Rauigkeit als lebende stehende Bäume. Deshalb wurde für die Versuchsfläche Disentis einen BSH-Faktor von 1.5 als genügend erachtet (gemäss Bebi et al., 2015). Dies ergab eine Sollhöhe der Totholzelemente von 216 cm.

3 Resultate

3.1 Wirkhöhen flächig 2019

Mit dem Vegetationshöhenmodell konnten die Wirkhöhen auf der Untersuchungsfläche bestimmt werden (siehe Abb. 10). Darin waren sowohl Bäume, als auch Sträucher und Tothholzelemente enthalten. Dabei lag das Maximum im Perimeter bei 19 m Wirkhöhe, das Minimum bei -5.4 m. Werte unter 0 entsprachen nicht der Realität und gingen aus Fehlern in der Erhebung und Bearbeitung der Drohnendaten hervor, mehr dazu ist in Kapitel 4.1 beschrieben. Die Anteile der einzelnen Höhenklassen an der Gesamtfläche sind in Quadratmeter und Prozent in Tab. 6 und Abb. 9 ersichtlich. Rund 9'600 m² oder 39% hatten eine Wirkhöhe von über 2.5 m. Rund 6700 m² oder 28% der Fläche hatten eine Wirkhöhe von über 5 m. In Abb. 10 sind die Lücken mit einer Länge von 40 m und mehr in Falllinie eingezeichnet. Es wurden zwei Lücken zwischen Elementen mit Wirkhöhen über 2.5 m und vier Lücken zwischen Wirkhöhen über 5 m gefunden. Fünf von sechs Lücken befanden sich in der südwestlichen Hälfte der Fläche. In der nordöstlichen Hälfte hatte es mehr Bäume mit Wirkhöhen bis 10 m und höher.

Tab. 6: Wirkhöhen auf der belassenen Fläche in m² und Anteil am untersuchten Perimeter

Höhe	Fläche (m ²)	Anteil (%)
≤ -0.5 m	802	3
≤ 0.5 m	6995	29
≤ 2.5 m	6909	28
≤ 5 m	2890	12
≤ 10 m	5332	22
> 10 m	1365	6
Total	24294	100

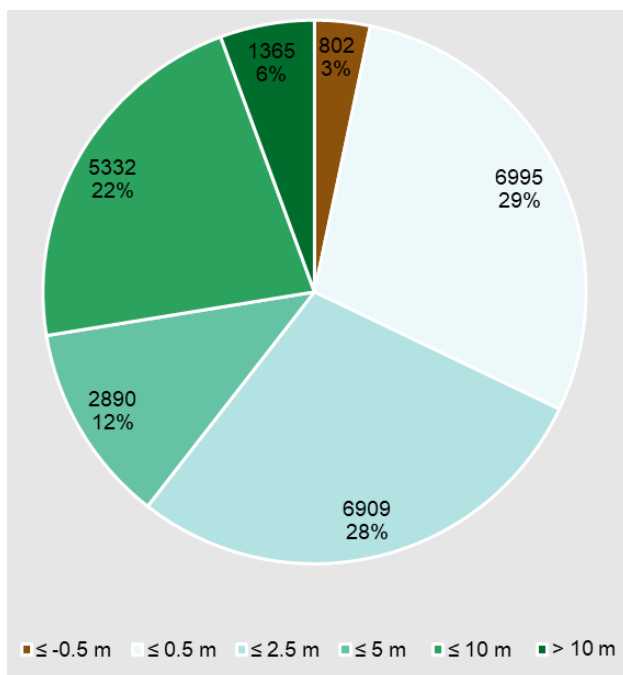


Abb. 9: Kreisdiagramm der Wirkhöhen auf der belassenen Fläche in m² und deren Anteil in %

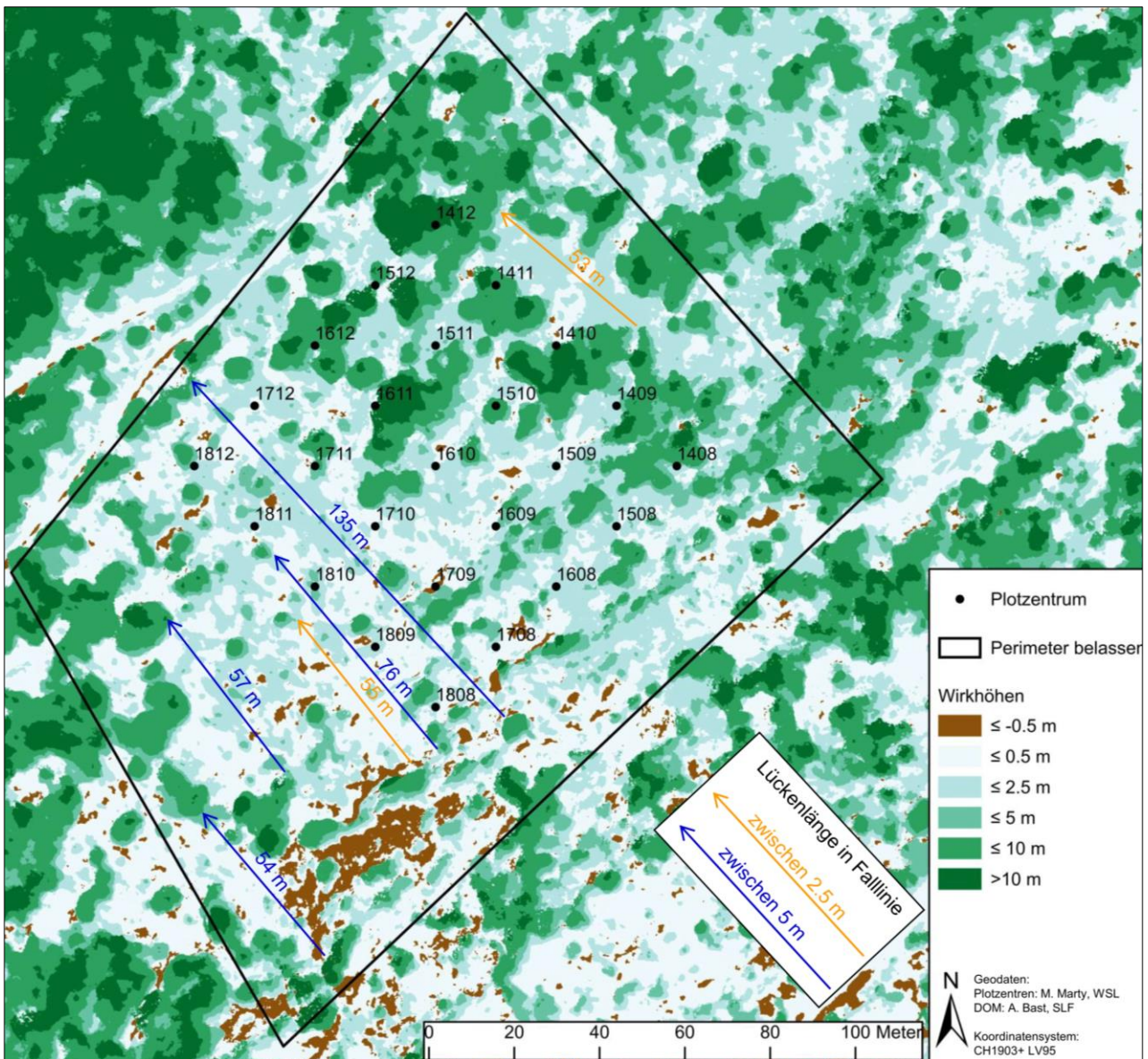


Abb. 10: Wirkhöhen basierend auf dem VHM, Lücken von mehr als 40 m Länge in Falllinie sind eingezeichnet (gemäss NaiS, Anforderungsprofil minimal, Frehner et al., 2005), Lücken zwischen Wirkhöhen von 2.5 m in orange und Lücken zwischen Wirkhöhen von 5 m in blau (Quelle: Koordinaten der Plotzentren von M. Marty, WSL; DOM als Ausgangsdaten erstellt durch A. Bast, SLF; eigene Produktion)

3.2 Rauigkeit 1991-2019

Abb. 11 zeigt Schattierungsbilder, welche die Oberfläche sichtbar machen. Im ersten Bild von 1991 dominierte das Totholz als Rauigkeitselement. Im Jahr 2001 war bereits erste Verjüngung zwischen dem Totholz zu sehen. Diese nahm in den Jahren 2009 bis 2019 deutlich zu, während das Totholz immer weniger sichtbar wurde. Im letzten Oberflächenmodell waren die gewachsenen Bäume die dominierenden Rauigkeitselemente.

In Abb. 12 sind die Rauigkeiten der Oberflächenmodelle der Jahre 1991, 2001, 2009 und 2019 dargestellt. Rein visuell ist ein Rückgang der Rauigkeit zwischen 1991 und 2001 zu sehen. In den Jahren 2009 und 2019 nahm die Rauigkeit wieder zu, jedoch weniger gleichmässig verteilt über die ganze Fläche wie 1991. Im Jahr 2019 waren Stellen mit sehr hoher Rauigkeit (dunkelrot) zu sehen, dazwischen gab es aber mehr Lücken mit geringer Rauigkeit (dunkelgrau). Im Vergleich zum Anfang war die Rauigkeit weniger gleichmässig verteilt, dafür an einzelnen Stellen höher.

Die Lage- und Streumasse der berechneten Rauigkeitsindizes sind in Tab. 7 ersichtlich. Die tiefsten Werte wurden fürs Jahr 2001 (Mittel 0.023 ± 0.033) berechnet und widerspiegeln damit auch den visuellen Eindruck. Die höchsten Werte wurden für das Jahr 2009 (Mittel 0.068 ± 0.074) berechnet. Das Jahr 2019 lag ähnlich tief mit im Mittel 0.055 und der höchsten Standardabweichung von ± 0.077 . Das Jahr 1991 (Mittel 0.062 ± 0.075) lag damit etwas höher als der Rauigkeitsindex des Jahres 2019.

Tab. 7: Rauigkeitsindex der Jahre 1991, 2001, 2009 und 2019 als Mittelwert, Median und Standardabweichung

Jahr	Monat der Aufnahme	Rauigkeitsindex (0-1)		
		Mittelwert	Median	Standardabweichung
1991	August	0.062	0.035	0.075
2001	Mai	0.023	0.014	0.033
2009	August	0.068	0.044	0.074
2019	Juni	0.055	0.027	0.077

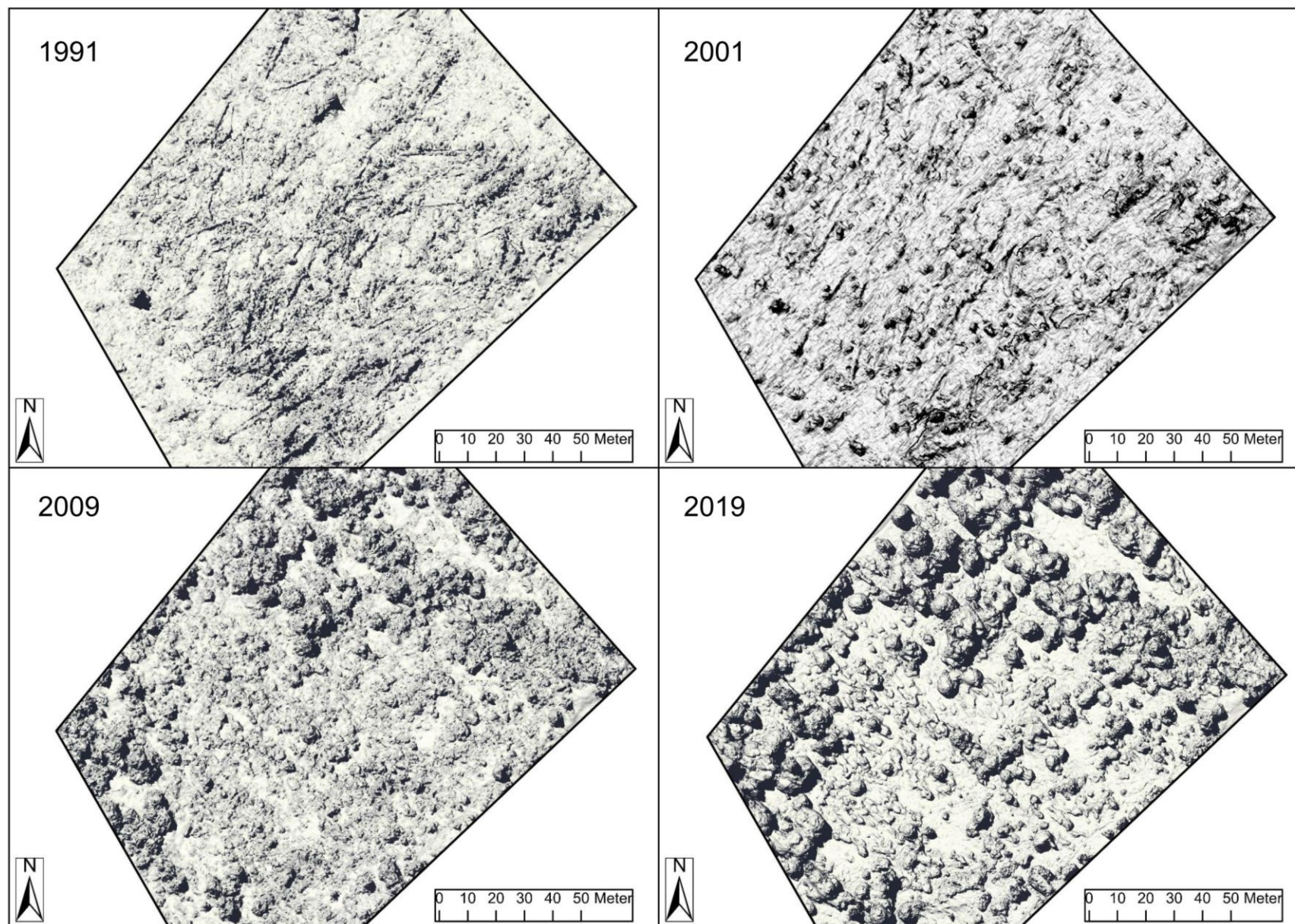


Abb. 11: Schattierungsbilder der Versuchsfläche in den Jahren 1991, 2001, 2009 und 2019
 (Quelle Oberflächenmodelle: 1991-2009 erstellt durch Swisstopo; 2019 erstellt durch A. Bast, SLF; eigene Produktion)

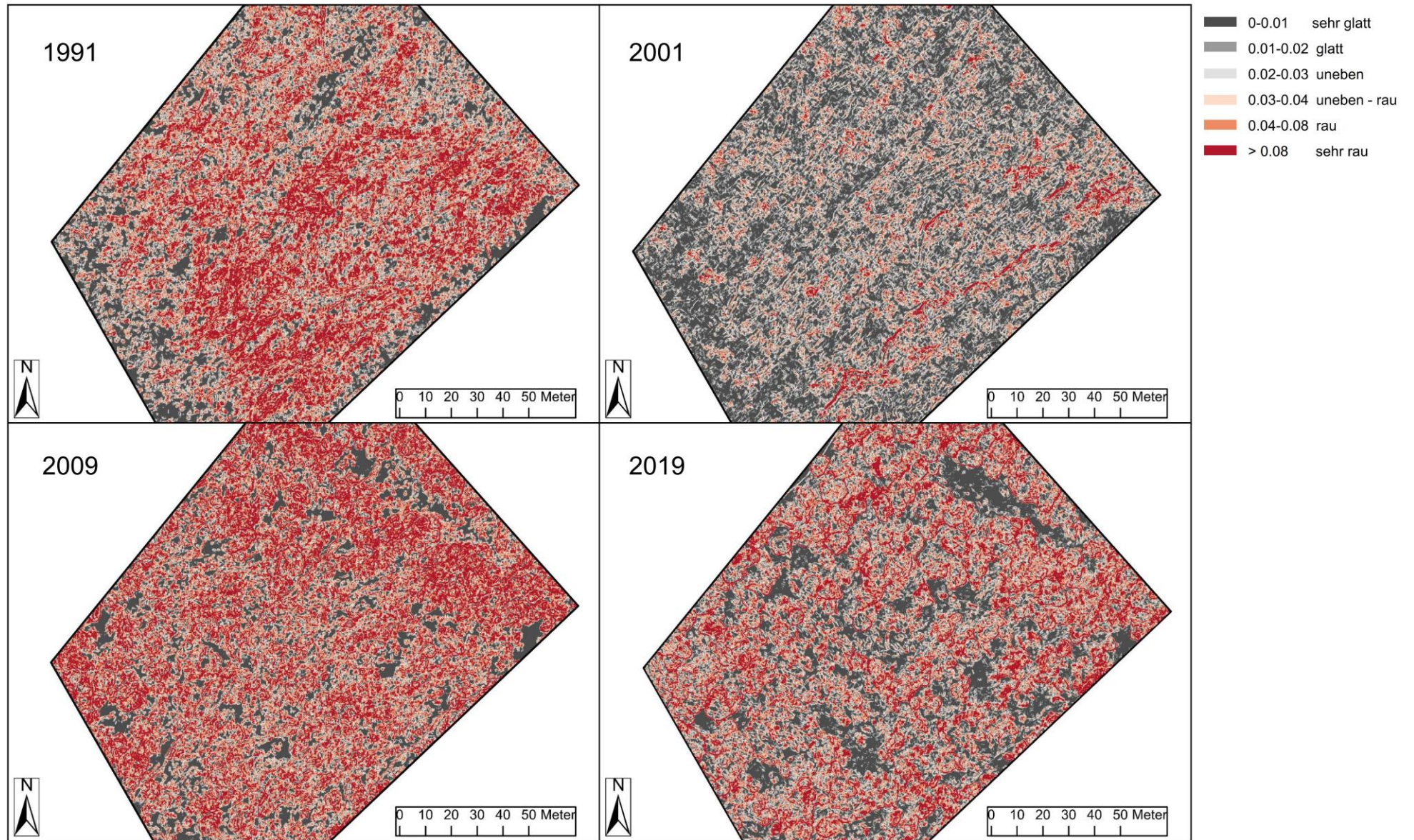


Abb. 12: Rauigkeit der Versuchsfläche in den Jahren 1991, 2001, 2009, 2019
 (Quelle Oberflächenmodelle: 1991-2009 erstellt durch Swisstopo; 2019 erstellt durch A. Bast, SLF; eigene Produktion)

3.3 Feldaufnahme

Seit dem Sturm Vivian im Jahr 1990 hatte sich auf der Versuchsfläche Disentis viel verändert (siehe Abb. 13). Das belassene Totholz hatte sich zwischen 1992 und 1997 gesetzt und war seither weiter vermodert. Aus der Ferne war es heute teils kaum noch zu sehen (siehe Abb. 14). Bodenvegetation gab es bereits 1992 und 1997. Verjüngung und Bestockung war zu dieser Zeit noch kaum vorhanden. 2019 jedoch waren Bäume und Sträucher von weitem gut zu erkennen, mit einer weiterhin dominanten Bodenvegetation in Teilen mit wenig Bestockung.



1991



2019

Abb. 13: Entwicklung der Windwurffläche Disentis im belassenen und naturverjüngten Teil; oben direkt nach dem Sturm 1990, unten Zustand 2019 (Quelle: U. Wasem, WSL)

1992



1997



2019

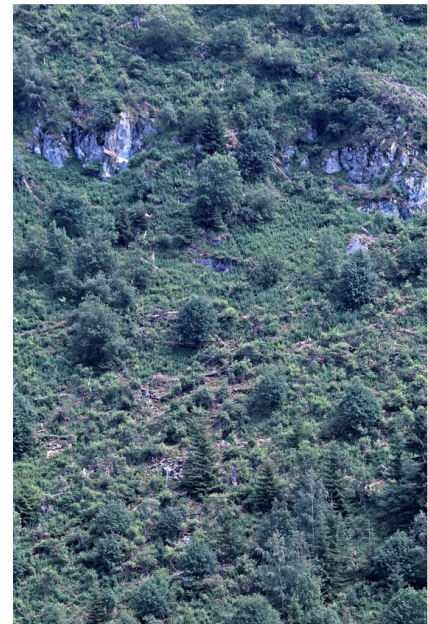


Abb. 14: Entwicklung der Windwurffläche Disentis im belassenen Teil (Quelle: U. Wasem, WSL)

Auf der Fläche war die hohe Bodenvegetation nicht zu übersehen. In Teilen mit sehr dichter Vegetation wurde praktisch keine Verjüngung gefunden. Einzelne Totholzelemente hatten immer noch eine beachtliche Höhe über Grund, wie in Abb. 15 zu sehen ist. Dies war vor allem bei Elementen der Fall, welche die Bodenvegetation überragten. Mehrheitlich waren die liegenden Stämme schon weit vermodert und gesetzt (siehe Abb. 16). An einigen Orten waren deutliche Liegeplätze von Wild zu sehen, vorwiegend in den Plots weiter unten am Hang. Diese waren durch die heruntergedrückte Vegetation und die Losung erkennbar. Da die Fläche an einem Nordwesthang liegt, lag sie auch im Hochsommer bis nach dem Mittag im Schatten. Während der Feldaufnahme regnete es an einem Tag, danach blieb die Fläche für weitere zwei Tage sehr feucht.



Abb. 15: Totholz und Vegetation bei der Feldaufnahme im Juli 2019



Abb. 16: Liegende Stämme bei der Feldaufnahme im Juli 2019

In Abb. 17 sind die erhobenen Deckungsgrade (Totholz, Bodenvegetation und Bäume über 1.3 m) auf den 25 Plotflächen ersichtlich. Alle Flächen wiesen einen Totholz Deckungsgrad von unter 70% auf, wobei ein Maximum von 13 Plots in die Kategorie 5-10% Deckungsgrad fiel. Die Mehrheit der Flächen war zu einem Drittel oder weniger mit Totholz bedeckt. Bei der Bodenvegetation waren die Deckungsgrade höher: Die meisten Plotflächen waren zu 50% oder mehr mit Vegetation bedeckt. Das Maximum lag mit zehn Flächen bei 90%. Der Kronendeckungsgrad lag eher im tieferen Bereich, mit praktisch allen Flächen zwischen 0 und 60% Kronendeckung. Trotzdem war auf allen Plots zumindest etwas Kronendeckung vorhanden und es befanden sich nur fünf Flächen in der Kategorie 5-10% Deckungsgrad. Der Schlussgrad wurde grösstenteils (23 von 25 Plots) in den Kategorien «aufgelöst» und «in Gruppen gedrängt» vorgefunden.

Beim Deckungsgrad Totholz wurde die Fläche in Höhenkategorien eingeteilt (Abb. 18). Ein grosser Teil des Totholzes war unter 50 cm hoch. Weiter befand sich viel in der Kategorie 50-100 cm. Die Werte unterlagen aber einer starken Streuung, sprich das Totholz war je nach Fläche in sehr unterschiedlichen Höhen vorhanden. Im Mittel waren rund 40% unter 50 cm und 20% bis 100 cm hoch.

Beim Deckungsgrad Bodenvegetation wurden verschiedene Typen unterschieden. Die Bodenvegetation bestand oft aus Hochstauden (v.a. *Epilobium angustifolium* und *Adenostyles alliaria*) mit einem mittleren Anteil von 48%. Weiter waren 22% mit Farn und rund 12% mit Gras, Kraut oder Brombeeren bedeckt. Auf den restlichen 18% war keine Vegetation vorhanden. Bei den Sträuchern war Holunder mit Abstand am meisten vorhanden (118 gezählte Pflanzen auf 24 von 25 Plots), gefolgt von Geissblatt (71 Pflanzen auf 21 von 25 Plots) und wenigen Haselsträuchern (8 Pflanzen auf 7 von 25 Plots) bzw. Heckenrosen (5 Pflanzen auf einem Plot).

Insgesamt wurde vier Mal eine Lücke nach den Kriterien in 2.3 festgestellt. Dies war für die Plots 1508, 1509, 1608 und 1712 der Fall; wobei es sich bei Plot 1508 und Plot 1608 um die gleiche Lücke handelte, welche auf beiden Seiten einen Plot berührte.

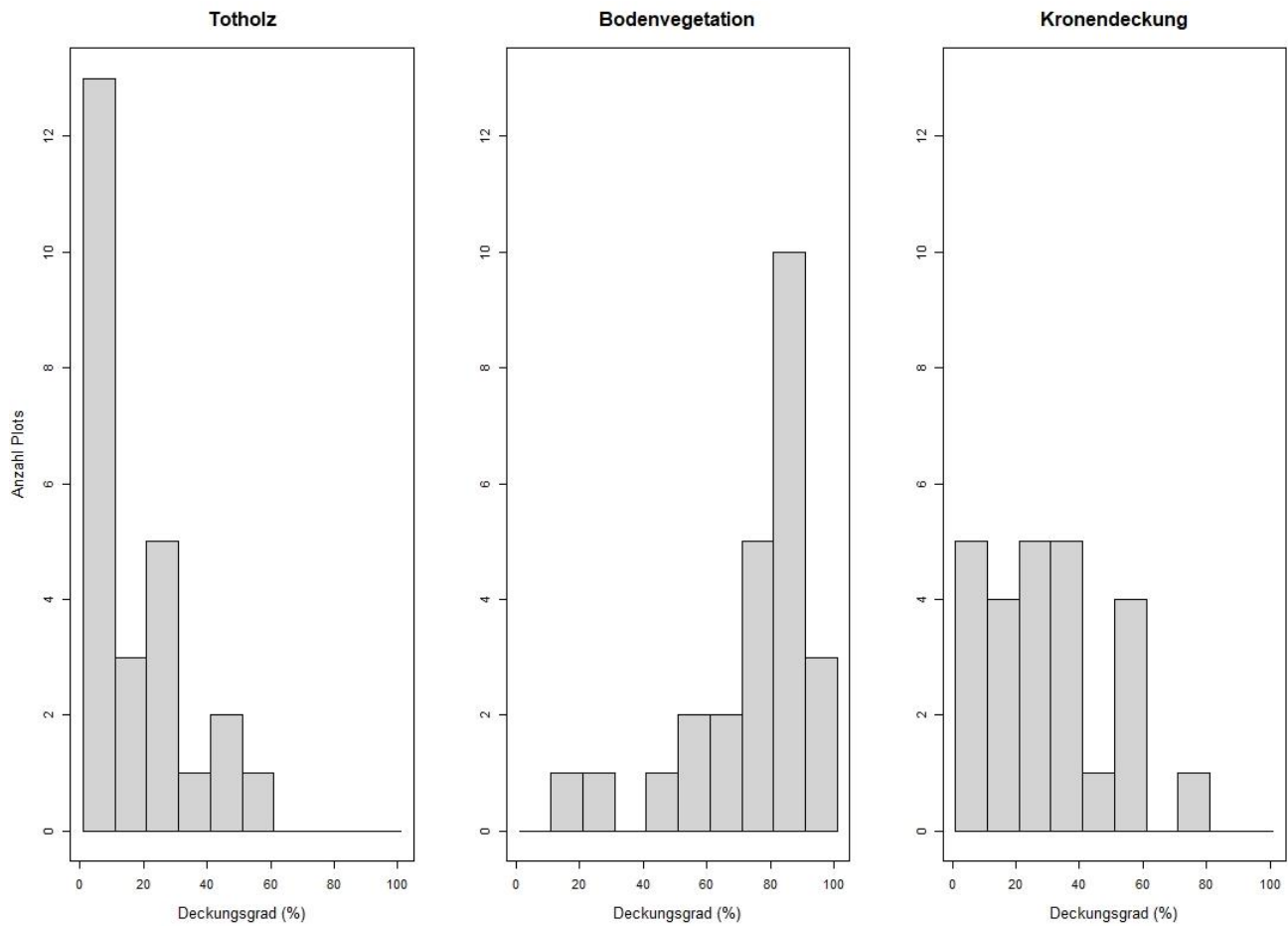


Abb. 17: Übersicht verschiedener Deckungsgrade in % der erhobenen Plotflächen; links Totholz (r = 4 m), Mitte Bodenvegetation (r = 4 m), rechts Kronendeckungsgrad (r = 10 m)

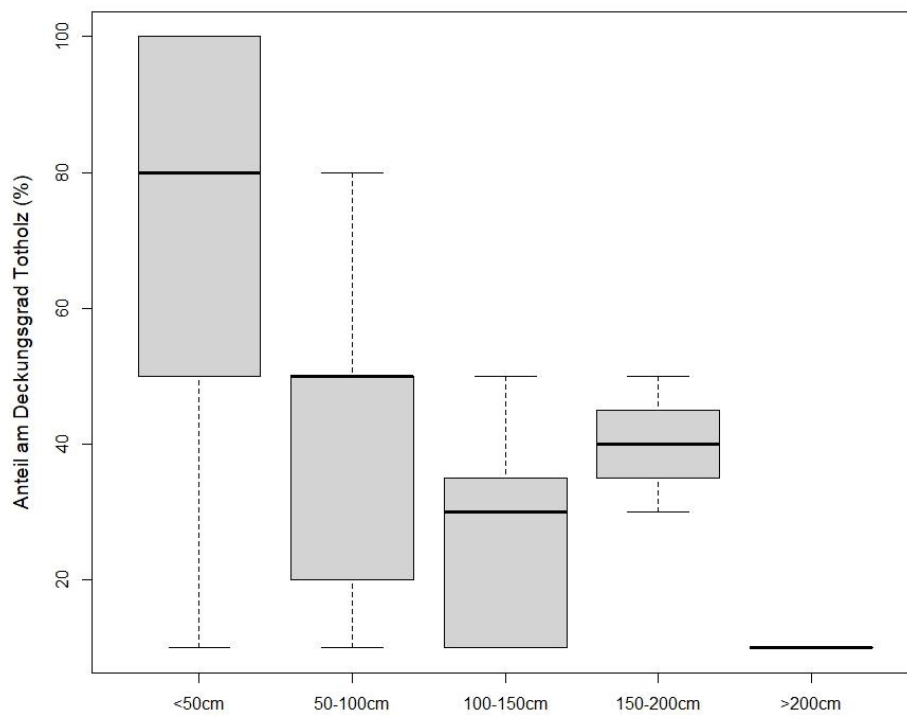


Abb. 18: Totholz in Höhenkategorien als Anteile am Deckungsgrad Totholz

3.3.1 Totholz

Die Wirkhöhen der Totholzstämmen zeigte eine kontinuierliche Abnahme über die Jahre und der Median lag 2019 noch bei 30 cm (siehe Abb. 19). Die Abnahme von 2010 zu 2019 war statistisch höchst signifikant ($p\text{-Wert} = 1.908e^{-11}$, Wilcoxon-Test, $n = 98$ & 75). Zudem wurde 2019 pro Plot das höchste Element gezielt gesucht und ausgemessen. Dieses hatte eine bedeutend grössere Wirkhöhe mit einem Median von 110 cm. Die höchsten Elemente beinhalteten oft Wurzelteller und -stöcke.

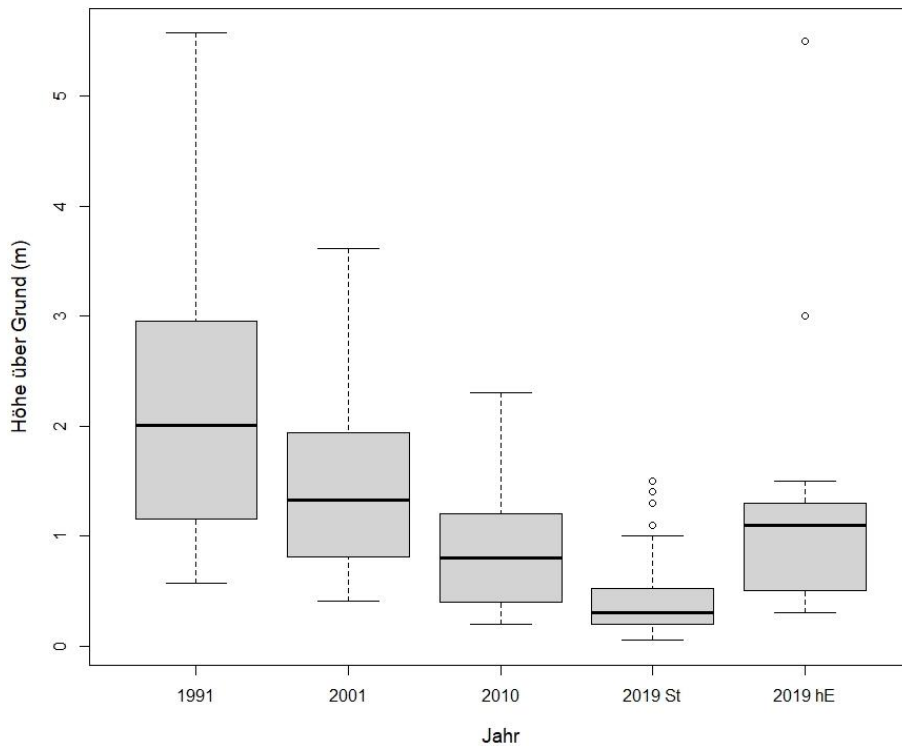


Abb. 19: Höhe über dem Grund von liegenden Stämmen (1991, 2001, 2010, 2019 St) und höchsten Elementen (2019 hE); Anzahl Stichproben: 1991-2010 $n = 98$ (wiederholte Aufnahme, Daten von Wohlgemuth et al., 2017), 2019 St $n = 75$ (neue Stichprobe), 2019 hE $n = 25$ (neue Stichprobe)

Die Wirkhöhen von 2019 im Vergleich zu der Schneehöhe eines 30-jährlichen Ereignisses und der Sollhöhe sind in Abb. 20 ersichtlich. Sie zeigen, dass alle Stämme und der grösste Teil der höchsten Elemente die Sollhöhe nicht mehr erreichten.

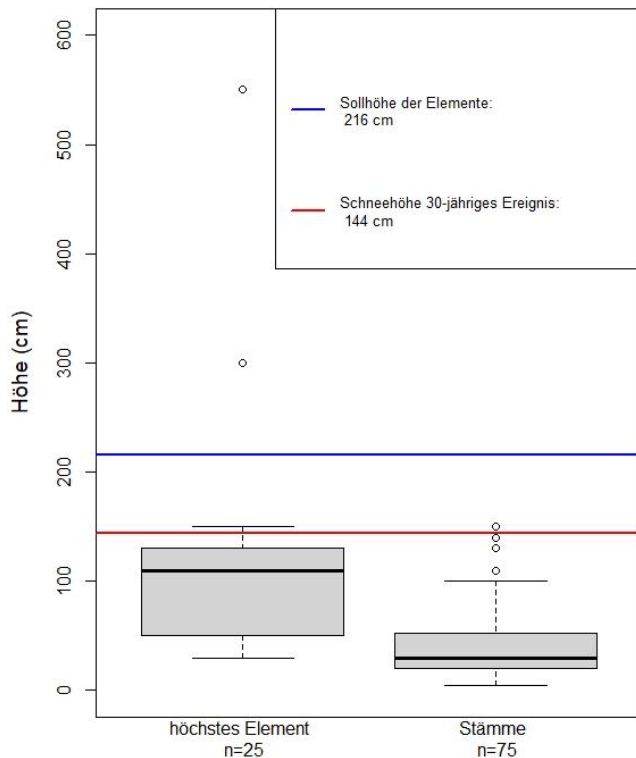


Abb. 20: Wirkhöhe in cm der im Feld gemessenen Totholzstrukturen, aufgeteilt in höchste Elemente und Stämme, im Vergleich zur maximalen Schneehöhe eines 30-jährlichen Ereignisses (rote Linie, berechnet nach Margreth et al., 2015) und Sollhöhe (blaue Linie, BSH mit Faktor 1.5x gemäss Bebi et al., 2015)

Die Erhebung des Vermoderungsgrades ergab 2019 einen Anteil von 58% in der stärksten vermoderten Kategorie, dem Mulmholz (siehe Tab. 8). Weiter wurden 38% in der zweit stärksten vermoderten Kategorie, dem Moderholz gefunden. Im Vergleich zu 36 im Jahr 2010 erhobenen Totholzstücken war der Vermoderungsprozess 2019 weiter fortgeschritten. Es befanden sich deutlich höhere Anteile in den stärker vermoderten Klassen, wie in Tab. 8 dargestellt (Daten von Netzer, 2010).

Die Höhe der Elemente nahm mit zunehmendem Vermoderungsgrad ab, wie in Abb. 21 zu sehen ist. Dabei war die Abnahme der Höhe zwischen Stufe 4 (Moderholz) und 5 (Mulmholz) höchst signifikant ($p\text{-Wert} = 2.563e^{-05}$, Wilcoxon-Test, $n = 38 \& 58$). In Abb. 21 wurden für die bessere Lesbarkeit drei Stichproben entfernt: Einmal mit Vermoderungsgrad 1, da das Totholz nicht vom Vivian-Sturm stammte, zweimal für Elemente mit Höhen über 150 cm.

Tab. 8: Anzahl und prozentuale Anteile von Totholzelementen aufgeteilt nach Vermoderungsgrad in den Jahren 2010 (Netzer, 2010) und 2019 (eigene Erhebung)

Vermoderungsgrad	2010		2019	
	Anzahl	Anteil	Anzahl	Anteil
1 = Frischholz	-	-	1	1%
2 = Hartholz	3	8%	-	-
3 = Morschholz	21	58%	3	3%
4 = Moderholz	8	22%	38	38%
5 = Mulmholz	4	11%	58	58%
total	36	100%	100	100%

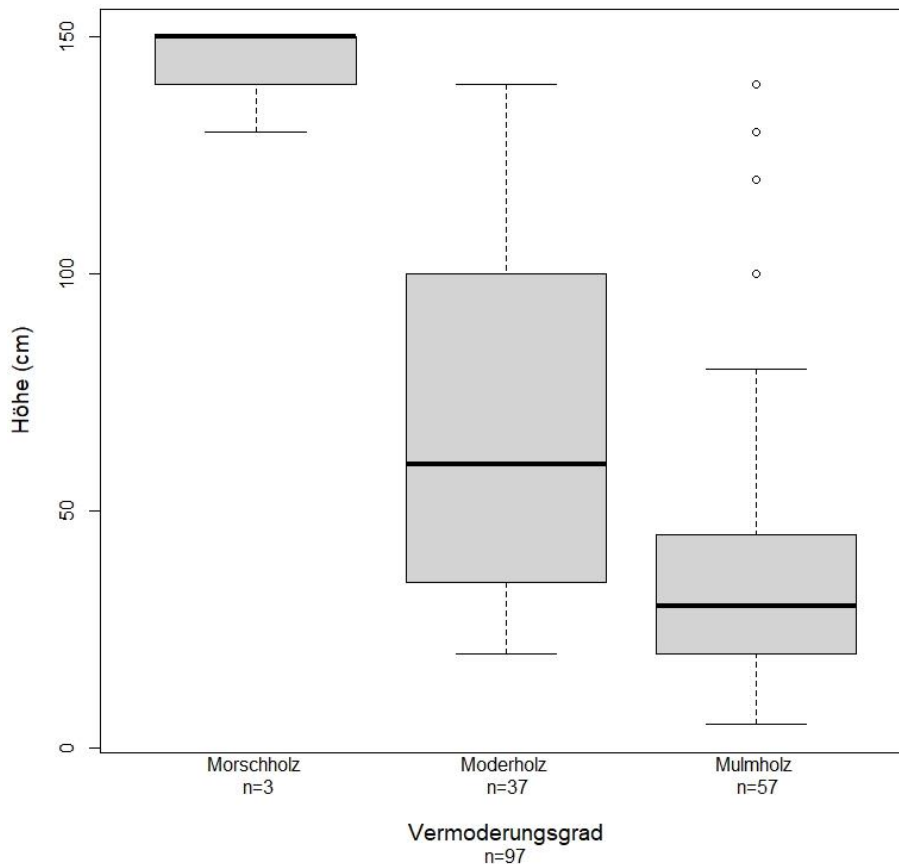


Abb. 21: Höhe der Elemente nach Vermoderungsgrad, ohne Totholz nach Vivian und Höhen über 150 cm

3.3.2 Folgebestand

Bäume über 130 cm

Die Baumhöhen sind in Abb. 22 dargestellt. Es wurden vier Arten festgestellt: Birke (*Betula pendula*), Fichte (*Picea abies*), Vogelbeere (*Sorbus aucuparia*) und Weide (*Salix sp.*). Die beiden letzteren dominierten sowohl in der Anzahl als auch in der Höhe deutlich. Der Median beider lag bei rund 500 cm, wobei es bei der Weide mehr Exemplare mit grösseren Höhen hatte. Der Median von Birke und Fichte lag etwas unter 200 cm mit einer Streuung nach oben.

Zwischen 2005 und 2019 konnten 40 Bäume als Wiederholung aufgenommen werden. Die mittleren Höhen sind in Abb. 23 dargestellt. Bei allen vier Arten wurde ein deutlicher Zuwachs festgestellt. Besonders markant war der Zuwachs der Fichte mit einem Plus von im Mittel 220 cm. Die Werte aller vier Arten verfügten über eine hohe Standardabweichung (siehe rote Balken).

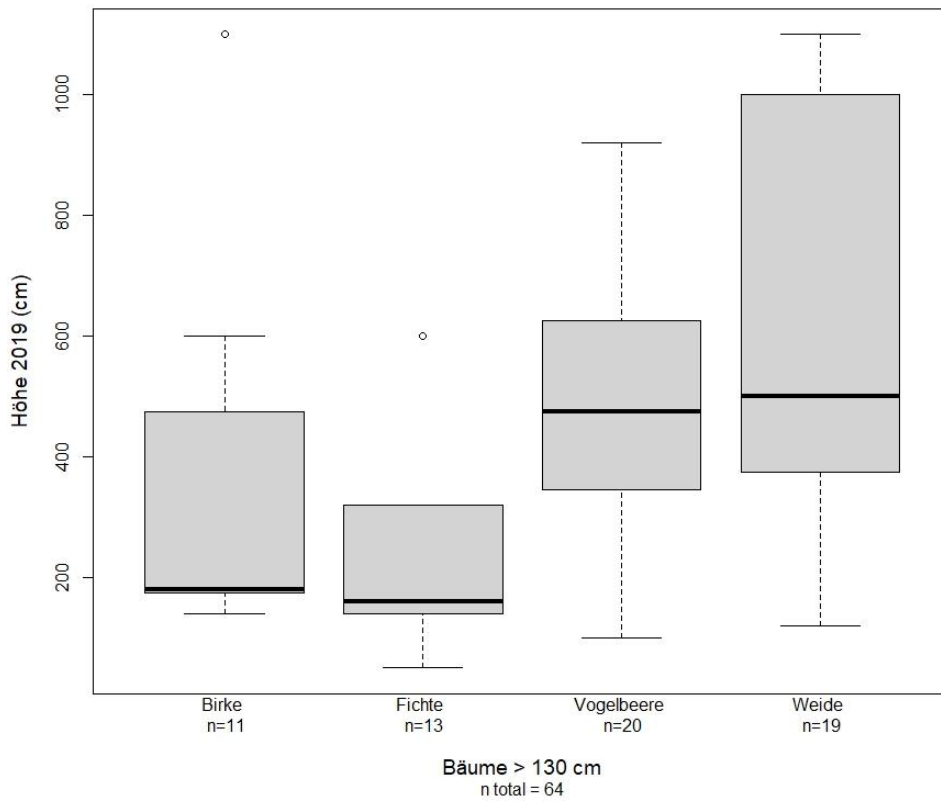


Abb. 22: Mittlere Höhe 2019 in cm nach Baumart

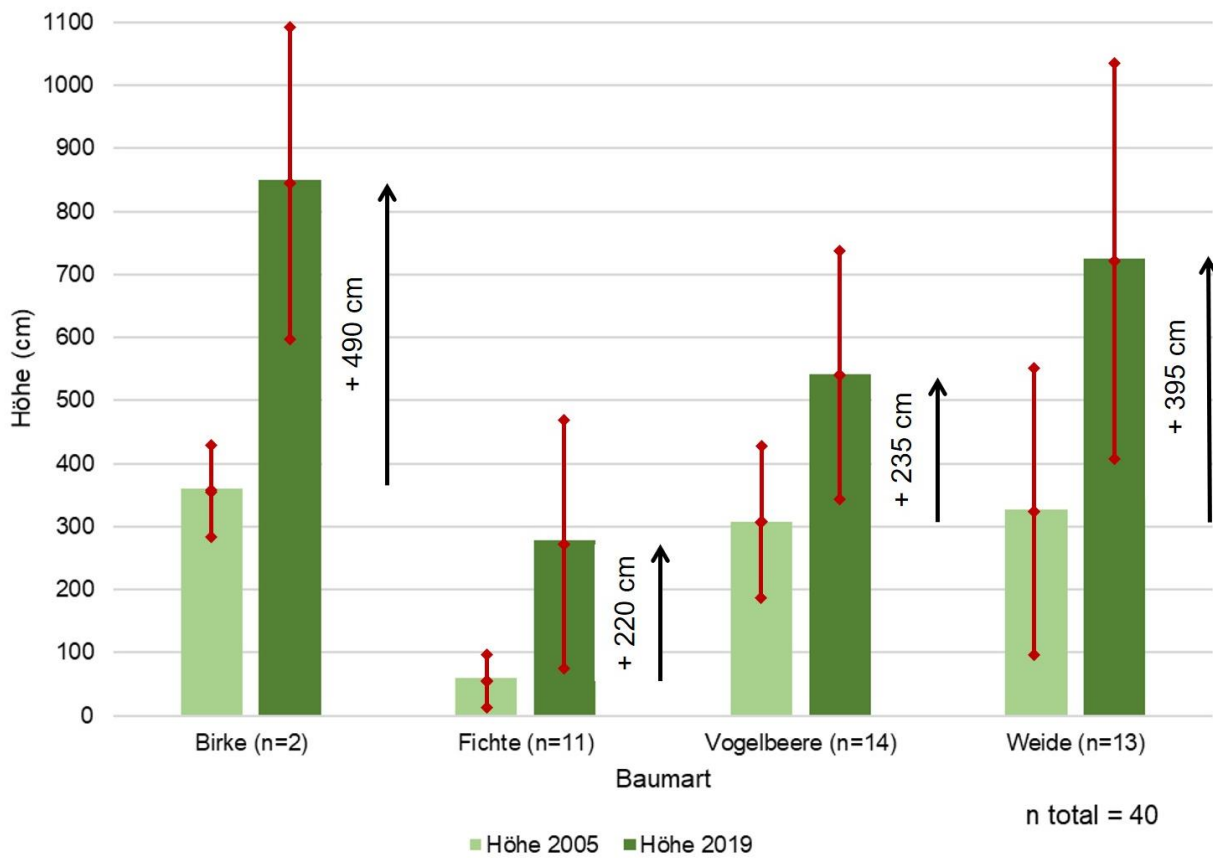


Abb. 23: Mittlere Höhen 2005, 2019 und mittlerer Zuwachs nach Baumart; rote Balken zeigen Standardabweichung (Quelle: Daten 2005 von U. Wasem, WSL; eigene Produktion)

Verjüngung 20-130 cm

In Abb. 24 ist die Anzahl an Verjüngungen pro Baumart ersichtlich. Total wurden 57 Verjüngungen aufgenommen. Die Vogelbeeren dominierten mit 26 gemessenen Individuen gefolgt von Birken, Fichten und wenigen Weiden. Die Höhen der vier festgestellten Arten waren im ähnlichen Bereich mit einem Median bei ca. 50 cm (siehe Abb. 25). Die Werte der Vogelbeeren streuten am stärksten.

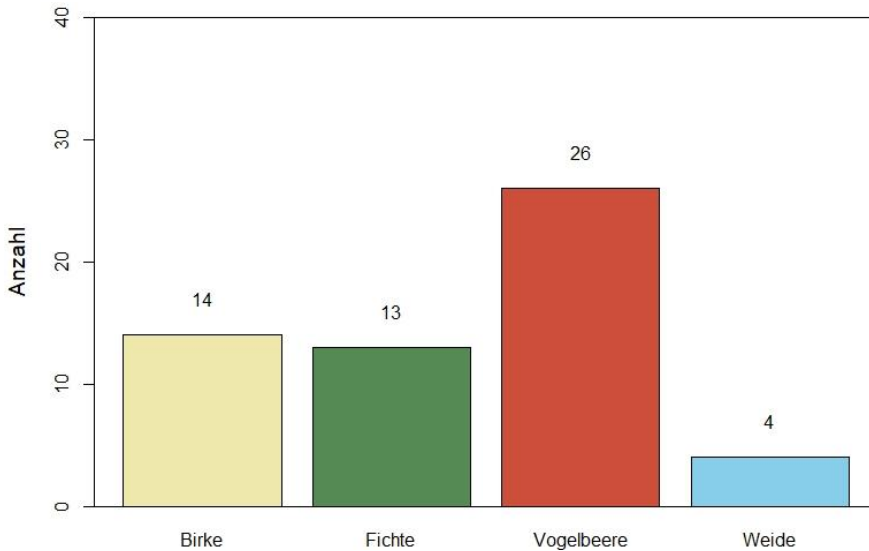


Abb. 24: Anzahl erhobene Verjüngung in der Höhe 20-130 cm nach Baumart (n total = 57)

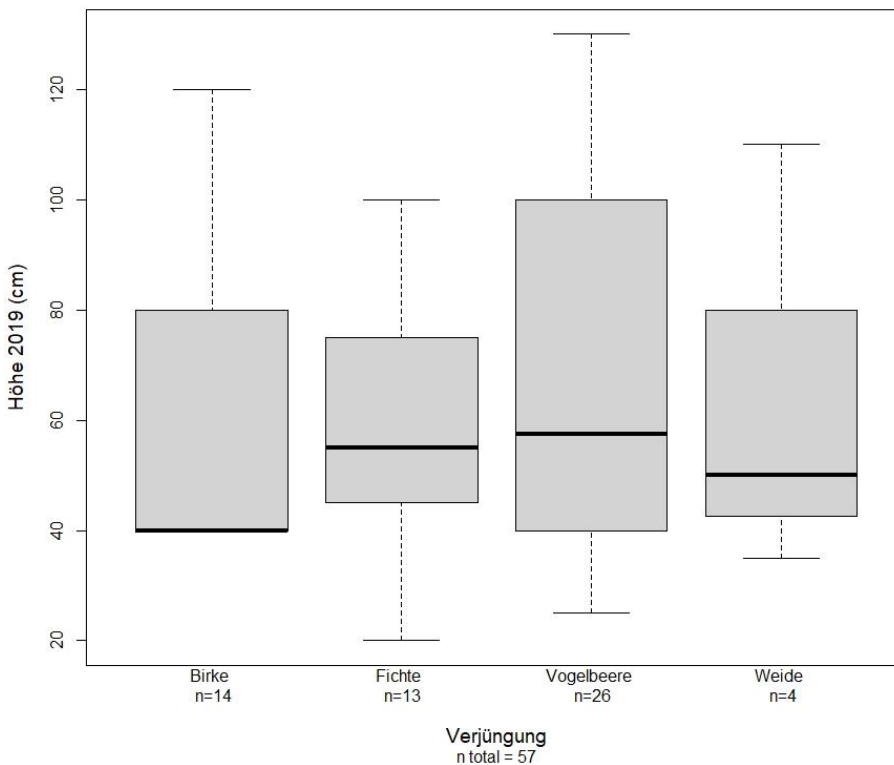


Abb. 25: Höhe 2019 der erhobenen Verjüngung in cm nach Baumart

Verbiss

Der Verbiss von Bäumen bis vier Meter Höhe ist in Abb. 27 ersichtlich. Fichten (siehe Abb. 26) und Vogelbeere waren stärker von Verbiss betroffen mit etwas mehr als der Hälfte aller Individuen. Birke und Weide waren dagegen weniger oft verbissen mit rund einem Viertel verbissener Individuen. Beim Verbiss wurde auch der Schadengrad aufgenommen. Fast alle Fälle von Verbiss befanden sich im Schadengrad 1, was bedeutet, dass ein Drittel der Pflanze verbissen war (siehe Tab. 3)



Abb. 26: Verbiss an einer Fichte auf der Versuchsfläche Disentis

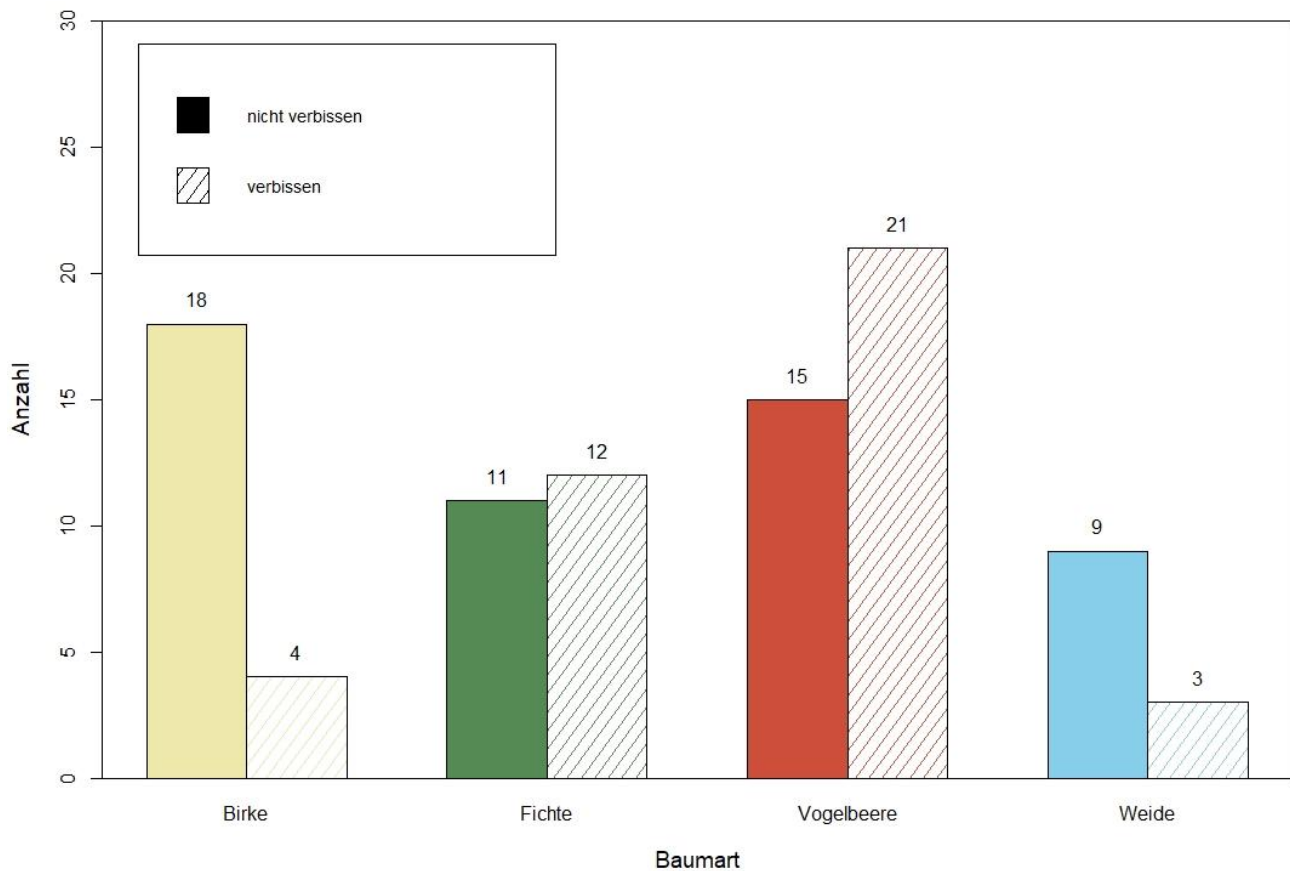


Abb. 27: Verbiss nach Art von Bäumen und Verjüngung bis 4 m Höhe

Moderholzverjüngung

Moderholzverjüngung (siehe Abb. 28) wurde auf fast der Hälfte der Tothholzelemente angetroffen (46 von 100). Die Höhe der grössten Moderholzverjüngung ist in Abb. 29 ersichtlich. Es gab bedeutende Unterschiede in den Höhen der einzelnen Arten. Am grössten waren die Weiden mit einem Median bei 250 cm, wobei jedoch die kleine Stichprobengrösse von nur vier Individuen beachtet werden muss. Danach kamen die Birken mit einem Median bei 50 cm und einer starken Streuung nach oben, gefolgt von Fichte und Vogelbeere. 2010 wurde in Disentis lediglich auf 6 von 38 Tothholzstücken Verjüngung gefunden mit Höhen zwischen 4 und 15 cm. Vertreten waren die Arten Fichte, Vogelbeere und Bergahorn (*Acer pseudoplatanus*) (Daten von Netzer, 2010).

Der Durchmesser der Tothholzelemente spielte eine signifikante Rolle, ob Moderholzverjüngung vorhanden war. Je dicker das Element, desto eher wurde Moderholzverjüngung angetroffen (p -Wert = 0.0039, Wilcoxon-Test, $n = 54$ & 46). Der Durchmesser von Tothholz mit Verjüngung lag im Median bei 45 cm. Weil bei den höchsten Elementen auch einige Wurzelstöcke mit einem höheren Durchmesser enthalten waren, wurde die Abhängigkeit vom Typ des Tothholzes untersucht. Auf den höchsten Elementen wurden 67, auf den Stämmen 173 Verjüngungen gezählt. Damit waren die Anteile verhältnismässig ähnlich und es wurde kein signifikanter Unterschied festgestellt, ob Moderholzverjüngung eher auf den Stämmen oder den höchsten Elementen vorkam.



Abb. 28: Moderholzverjüngung einer Fichte auf der Versuchsfläche Disentis 2019

Beim Vermoderungsgrad und dem Vorkommen von Verjüngung gab es hoch signifikante Unterschiede (p -Wert = 0.005, Fisher-Test, n total = 241), wenn die Baumarten einzeln betrachtet wurden. Diese sind in Abb. 30 dargestellt. Einzig bei der Birke war mehr auf Moder- anstatt Mulmholz vertreten. Bei den drei anderen Arten war jeweils mehr Verjüngung auf dem stärker vermoderten Mulmholz vorhanden. Im Mosaik-Plot (siehe Abb. 31) sind diese Anteile dargestellt. Darin ist ersichtlich, dass lediglich die Fichte unterdurchschnittlich auf Vermoderungsgrad 4 (Moderholz) vertreten ist. Unterschiede zwischen zwei Baumarten wurden mit dem paarweisen Fisher-Test angeschaut. Je nach Korrekturmethode wurden signifikante Unterschiede zwischen Birke & Fichte und Fichte & Vogelbeere (moderatere Holm-Korrektur) oder nur zwischen Birke & Fichte (strengere Bonferroni-Korrektur) gefunden.

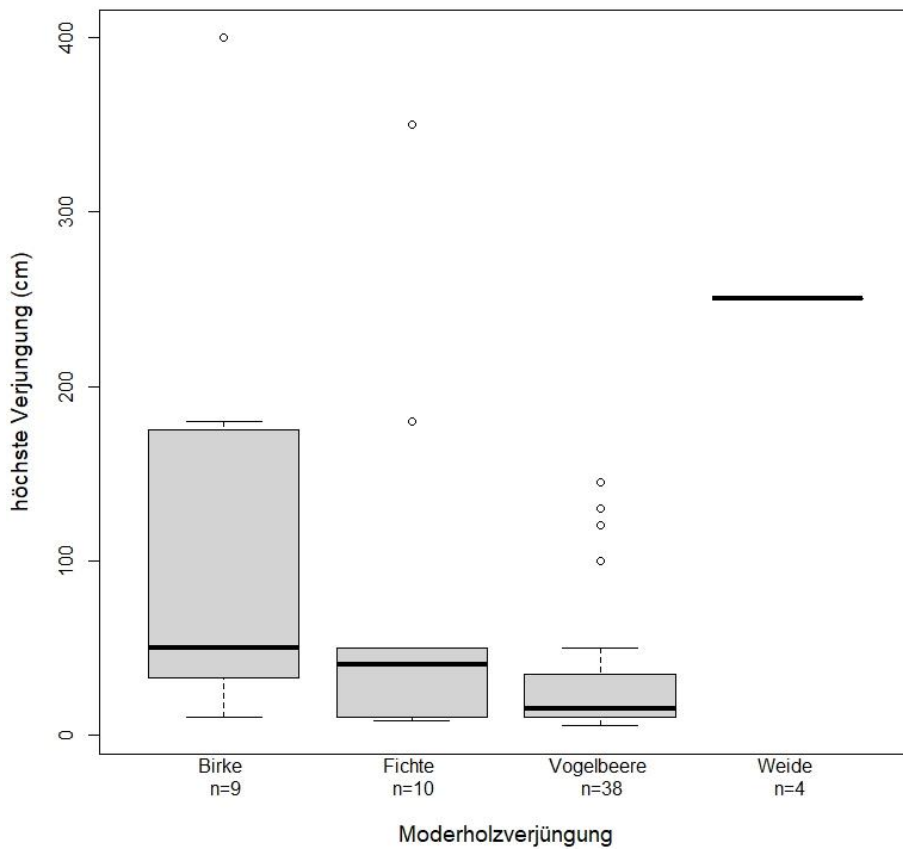


Abb. 29: Höhe der grössten Moderholzverjüngung pro Baumart

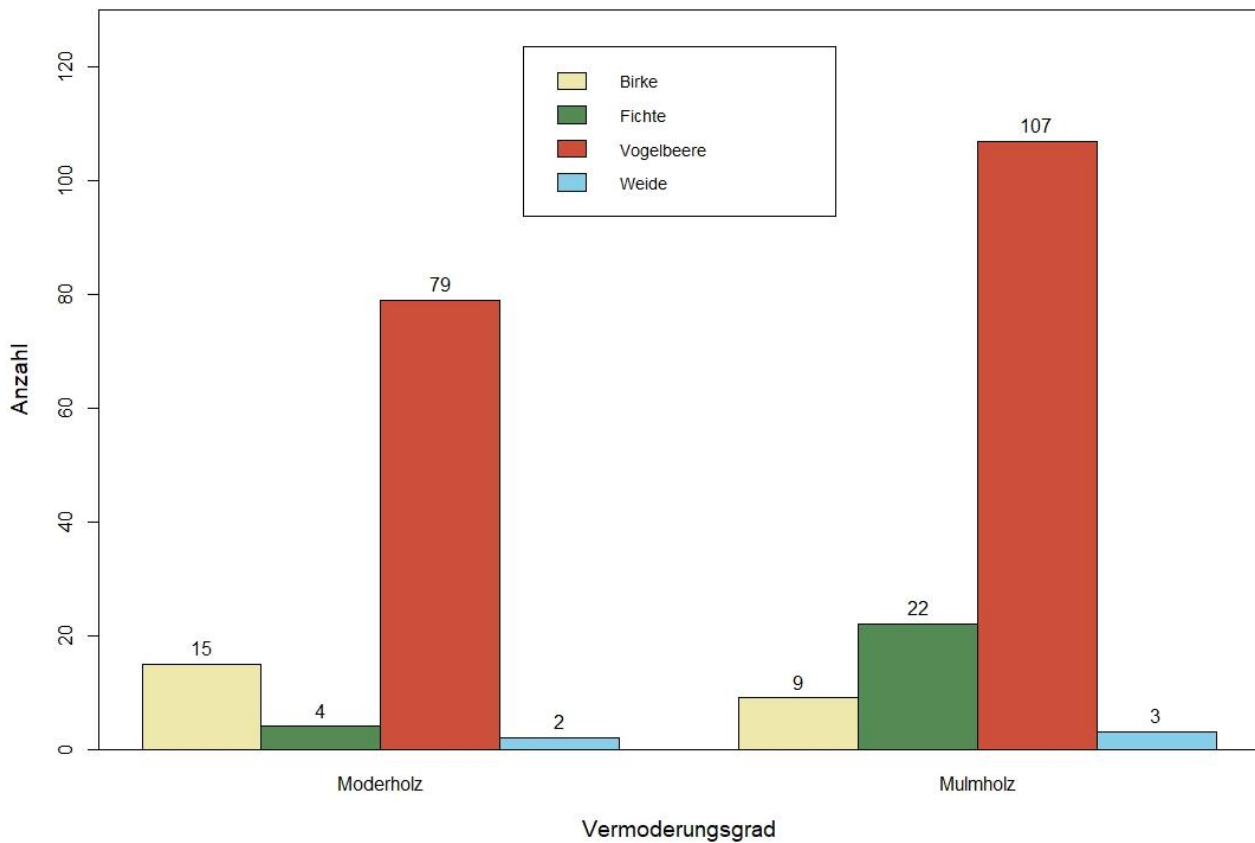


Abb. 30: Anzahl Moderholzverjüngung nach Baumart auf Moder- und Mulmholz

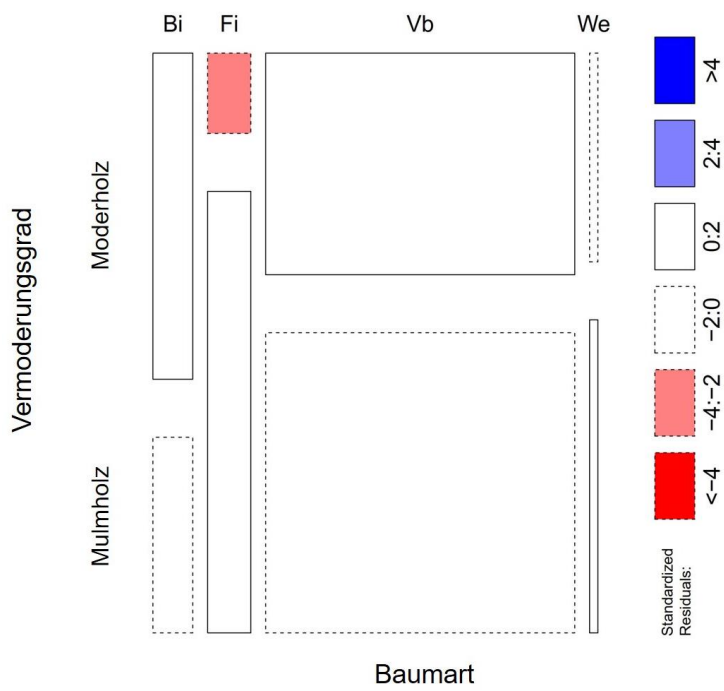


Abb. 31: Mosaik-Plot mit dem Vermoderungsgrad und der Baumart der Moderholzverjüngung; die Grösse der Quadrate gibt die Anteile in den Klassen Moder- und Mulmholz wieder; einzig Fichte ist auf Moderholz statistisch signifikant untervertreten (hellrotes Quadrat).

4 Diskussion

4.1 Wirkhöhen flächig 2019

Die Wirkhöhen auf der Untersuchungsfläche waren bezüglich des Flächenanteiles im Durchschnitt eher tief. Wirkhöhen von über 2.5 m, welche auf dem Perimeter mit knapp 40% vertreten waren, weisen eine Schutzwirkung bei einem 30- bis 100-jährlichen Schneefall auf. Wirkhöhen über 5 m waren auf 28% der Fläche vorhanden und sind wirksam bei einem noch grösseren Ereignis. Hierbei darf nicht vergessen werden, dass 68% der Fläche über eine Wirkhöhe von über 0.5 m verfügten und damit bei durchschnittlichen Schneehöhen durchaus Wirkung zeigen können.

Gemäss Frehner et al (2005) ist nicht unbedingt die Fläche über einer gewissen Wirkhöhe entscheidend, sondern auch die Lückengrösse zwischen den Elementen. Als Kriterium für eine Lücke wurden hier mindestens 40 m in Falllinie gewählt, gemäss des minimalen Anforderungsprofils von NaiS für einen 40° steilen Hang (Frehner et al., 2005). Die Anzahl Lücken zwischen Elementen von 2.5 m Höhe war mit zwei klein und beide Lücken überschritten die 40 m Länge nur wenig (siehe Abb. 10). So gesehen war die Schutzwirkung für einen 30- bis 100-jährlichen Schneefall fast genügend. Zwischen Elementen mit 5 m Höhe wurden weitere vier Lücken gefunden, zwei davon mit deutlich über 40 m Länge (76 m und 135 m). Die breiteste Stelle dieser zwei grösseren Lücken betrug 30 m. Dies ist nach Vorgaben von NaiS nicht optimal, da Lücken nicht breiter als 15 m sein sollten (Frehner et al., 2005). An den meisten Stellen waren die Lücken aber deutlich schmaler. Auch gab es in diesen Lücken Elemente mit Wirkhöhen bis 2.5 m. Dies deutet darauf hin, dass die Schutzwirkung für ein mehr als 100-jährliches Ereignis (noch) nicht überall komplett erfüllt war. Auch war die Verteilung der Wirkhöhen auf der Fläche nicht gleichmässig, es befanden sich deutlich mehr Lücken auf der südwestlichen Hälfte der Fläche, während mehr Elemente bis und über 10 m Höhe im nordöstlichen Teil standen.

Im Jahr 2010 wurde in zwei Bereichen der Versuchsfläche Disentis die Schutzwirksamkeit gegen Lawinen beurteilt. Damals war keines der Kriterien erfüllt, auch nicht BSH und Lückenlänge (Fankhauser, 2010), wobei dort die Lücken nach dem idealen Anforderungsprofil von NaiS beurteilt wurden, welches für eine Hang von 40° Neigung eine Lückenlänge von nur 30 m vorgibt (Frehner et al., 2005). Mit der gleichen Lückenlänge von 30 m betrachtet, würde die Untersuchungsfläche die Lawinenschutzwirksamkeit für dieses Kriterium auch heute nicht erfüllen.

Die Analyse der Wirkhöhen mit dem Vegetationshöhenmodell war mit einigen Unsicherheiten behaftet. Das hochaufgelöste Modell der Drohne (Auflösung 10 cm) wurde mit einem weniger fein aufgelösten Terrainmodell verrechnet (Auflösung 2 m). Obwohl das DTM auf eine feinere Auflösung gebracht wurde, entsprachen die dadurch generierten Werte nicht der Realität, sondern wurden künstlich berechnet.

Weitere Fehlerquellen bestanden bei der Erhebung der Drohnen Daten. An senkrechten Geländekanten mit abrupten Wechslen der Neigung können durch den ungünstigen Aufnahmewinkel Lücken entstehen, welche beim Erstellen des DOM mit falschen Werten gefüllt werden (Westoby, 2012). Dies könnte zum Beispiel rund um die Felsen im oberen Teil der Fläche passiert sein. Diese negativen Werte entsprachen nicht der Wirklichkeit, da eine negative Vegetationshöhe nicht möglich ist. Zudem wurde die Drohne bereits nach Beginn der Vegetationsperiode geflogen, wodurch eine Unterscheidung der Elemente in Vegetation und Totholz nicht mehr möglich war. Diesen Unsicherheiten wurde bei der Wahl der Wirkhöhenklassen Rechnung getragen. Sie wurden auf Grund der Genauigkeit im Vergleich zu den Felddaten gewählt (siehe 2.2.1). Der Vergleich ergab keine klare Über-

oder Unterschätzung der Höhen, weshalb eine generelle Korrektur nicht zielführend war. Die Klassengrößen wurden dafür entsprechend gewählt. So wurde erst eine Wirkhöhe von 2.5 m als schutzwirksam betrachtet, obwohl die BSH schon bei rund 2.2 m erfüllt wäre. Weiter wurde das Kriterium der Lücken für einen Hang von 40° Neigung betrachtet, obwohl die Fläche im unteren Teil eine geringere Steigung von etwa 30° aufweist. So wurden die Lücken eher restriktiv beurteilt.

4.2 Rauigkeit 1991-2019

Die Oberfläche über vier Zeitpunkte (1991, 2001, 2009, 2019) betrachtet (siehe Abb. 11) zeigte die erwartete Entwicklung von liegendem Totholz in den ersten Bildern von 1991 & 2001 zu mehr aufkommenden Bäumen in den späteren Bildern von 2009 & 2019. Die Berechnung der Rauigkeit zeigte diese Entwicklung ebenfalls auf, wobei besonders das Jahr 2001 mit einer geringeren Rauigkeit auffiel. Dies deutet auf eine Periode von geringerer Rauigkeit und damit geringerer Schutzwirkung rund zehn Jahre nach dem Sturmereignis hin. Trotzdem wurde zwischen 1991 und 2001 keine Lawine im belassenen Teil der Fläche registriert. Selbst im Winter 1999, als mit 150 cm die Höhe eines 30-jährlichen Schneefalles erreicht wurde, gab es keine Lawine (Frey & Thee, 2002). Überraschend ist zudem, dass im Jahr 2009 gemäss den angewendeten Kriterien eine höhere Rauigkeit vorherrschte als 2019. Dies könnte auf die damals noch höheren Totholzelemente zurückzuführen sein. Zwar waren 2019 einzelne Bäume schon bedeutend höher als 2009, dazwischen gab es aber mehr Lücken mit geringerer Rauigkeit. Insgesamt gesehen, war die Rauigkeit 2019 sogar geringer als direkt nach dem Sturm 1991. Auch dies könnte auf die damals homogenere Verteilung des Totholzes gegenüber der aufkommenden Vegetation zurückgeführt werden.

Die Berechnung der Rauigkeit mithilfe von Fernerkundungsdaten und der Methode VRM (Sappington et al., 2007) wurde auf der Versuchsfläche Disentis zum ersten Mal durchgeführt und war mit einigen Unsicherheiten behaftet. Entscheidend für die Berechnung ist eine gleiche Auflösung der Datensätze. Da dies nicht der Fall war für die vorliegenden Daten, wurde der Datensatz von 2019 auf eine geringere Auflösung (10 cm zu 20 cm) gebracht. Damit wurden zwar keine Werte künstlich generiert, aber einen Teil der Daten weggelassen, was zu Fehlern geführt haben kann. Auch wurden die Daten unterschiedlich erhoben: 1991-2009 mit Flugzeugen und 2019 mit einer Drohne und damit deutlich tieferen Flughöhen über Grund. Zudem war unklar, welcher Einfluss die Bodenvegetation auf die Rauigkeit hatte, indem sie Teile des Totholzes verdeckte. Bisher wurde die Berechnung der Rauigkeit mehr für Winteraufnahmen mit Schnee verwendet, zum Beispiel von Brožová et al. (2019). Trotz der Unsicherheiten, war die Verteilung der Rauigkeitselemente gut zu erkennen und liess einen Vergleich über die Jahre zu. Die Einteilung der Rauigkeit in Klassen wurde gemäss Brožová et al. (2019) vorgenommen und sollte für eine nächste Untersuchung mit Felddaten verifiziert werden. Aus diesem Grund wurde ein Vergleich verschiedener Jahre ausgeführt und keine absolute Beurteilung der Rauigkeit zu einem bestimmten Zeitpunkt vorgenommen.

4.3 Feldaufnahme

Der Zustand der Fläche im Jahr 2019 war auf den Vergleichsfotos gut zu erkennen: Das Totholz hatte stark an Wirkhöhe verloren, Bäume und Sträucher waren bedeutend gewachsen und die Bodenvegetation immer noch dominierend in Teilen mit wenig Bestockung (siehe Abb. 17). Auch war der grössere Teil des Totholzes in der Kategorie unter 50 cm vertreten. Dies bestätigte die Annahme, dass mehr als 20 Jahre nach dem Sturm die Schutzwirkung von liegen gelassenem Totholz bedeutend nachlässt (Bebi et al., 2015). Trotzdem gab es erhebliche Unterschiede zwischen den Plots. Die dominierenden Hochstauden haben wahrscheinlich einen beschleunigenden Einfluss auf die Vermoderung des Totholzes, wenn dieses von Vegetation teils bedeckt und damit feucht gehalten wird (Lachat et al., 2019). Zudem hatte die Bodenvegetation sicherlich einen hemmenden Einfluss auf die aufkommende Verjüngung, was schon in früheren Untersuchungen der Verjüngung auf Windwurfflächen bemerkt (Brang et al., 2015) und auch in den Feldaufnahmen dieser Arbeit bestätigt wurde.

Die Lücken wurden auch im Feld erhoben, waren aber schwerer zu erkennen wegen der hohen Bodenvegetation. Deshalb wurde eine Analyse der Lücken mithilfe der Fernerkundung als zielführender erachtet (siehe Abb. 10). Der Deckungsgrad Totholz und der Kronendeckungsgrad wurden im Feld tendenziell eher überschätzt. Für eine nächste Erhebung könnten dazu Schätzhilfen, zum Beispiel aus dem Landesforstinventar, verwendet werden. Damit könnte die Genauigkeit der Schätzung erhöht werden. Erfreulich war, dass 19 von 25 Plotzentren gefunden werden konnten, obwohl die Einrichtung der Plots fast dreissig Jahre zurück liegt und sich die Fläche seitdem markant verändert hatte.

4.3.1 Totholz

Die mittlere Wirkhöhe der im Feld erhobenen Totholzstämme hatte erwartungsgemäss weiter abgenommen seit der letzten Erhebung im Jahr 2010 (Daten von Wohlgemuth et al., 2017) und erreichten eine 30-jährliche Schneehöhe bei weitem nicht mehr. Obwohl nicht genau die gleichen Stämme aufgenommen wurden, konnten die Höhen aufgrund der genügend grossen Stichprobenanzahl von $n = 75$ verglichen werden (Crawley, 2007). Interessant waren zudem die im Jahr 2019 erhobenen höchsten Totholzelemente. Dabei wurde gezielt nach hohen Elementen gesucht und damit aufgezeigt, dass noch höheres Totholz (meist Wurzelteller und -stöcke) als die stark gesackten Stämme vorhanden war. Diese hatten eine bedeutend grössere Wirkhöhe von im Mittel über einem Meter. Trotzdem erreichten auch sie die Schneehöhe eines 30-jährlichen Ereignisses nicht, geschweige denn die Sollhöhe gemäss BSH-Faktor 1.5. Was aber nicht bedeutete, dass sie bei einer Schneehöhe mit geringerer Jährlichkeit keine Wirkung zeigen können. Zudem sind Wurzelteller um einiges stabiler als liegende Stämme, welche sich unter Schneelast eher bewegen können. Elemente mit guter Verankerung im Boden könnten sogar bloss mit der maximalen Schneehöhe (im Wald mit 30 Jahren Wiederkehrperiode) verglichen werden, wie dies bei Lawinerverbauungen gemacht wird (BAFU & WSL, 2007). Zudem ist zu beachten, dass auch im Falle von grösseren Schneehöhen das Totholz einen Beitrag leistet indem es den Schnee dazwischen zurückhält. So kann bloss noch die Schneemenge über dem Totholz abrutschen. Deshalb kann hier wahrscheinlich mit einer besseren Schutzwirkung gerechnet werden, als Abb. 20 vermuten lässt.

Die Berechnung der Schneehöhe eines 30-jährlichen Ereignisses erfolgte nach aktuellen Richtlinien (Margreth et al., 2015) und mit den Daten einer langjährigen Messtation (43 Betriebsjahre). Da es

sich aber um eine Abschätzung handelt, war erheblicher Ermessensspielraum vorhanden. In vorhergehenden Untersuchungen wurden für den gleichen Standort 160 cm (Putallaz, 2010) und 250 cm (Frey & Thee, 2002) für ein 30-jährliches Ereignis berechnet. So wurde die Schneehöhe mit 144 cm in dieser Arbeit eher tiefer eingeschätzt.

Die Vermoderung des Totholzes war 2019 erwartungsgemäss weiter fortgeschritten. Insgesamt befanden sich 96% der erhobenen Stücke in der stärksten und zweitstärksten vermoderten Klasse (Moder- und Mulmholz). Auch der Vergleich mit den Daten von 2010 zeigte den Verlauf der Vermoderung auf. Damals befanden sich noch 58% in Vermoderungsstufe drei (Morschholz) (Netzer, 2010). Dass die Abnahme der Wirkhöhe mit dem Vermoderungsgrad des Holzes zusammenhing, war nicht weiter überraschend. Bei der Erhebung des Vermoderungsgrades muss jedoch erwähnt werden, dass jeweils nur eine Stelle des Holzes mit dem Sackmesser geprüft wurde und die Methode durchaus mit der Einschätzung der ausführenden Person gekoppelt war. Daher ist der Vergleich mit anderen Untersuchungen mit Unsicherheiten behaftet.

4.3.2 Folgebestand

Die Bäume über 130 cm Höhe hatten sich 2019 gut entwickelt. Es wurden vier Baumarten auf der Fläche gefunden, was eine deutliche Steigerung der Diversität im Vergleich zum Bestand von vor dem Sturm darstellte. Damals war es ein reiner Fichtenbestand (Schönenberger, 2002b), heute befanden sich auf der Fläche Birken, Fichten, Vogelbeeren und Weiden. Die Fichte spielte hierbei eine (noch) untergeordnete Rolle, während Vogelbeere und Weide in der Höhe dominierten. Besonders bei der Weide gab es viele Exemplare, die über eine grosse Krone verfügten und als «Protzweiden» viel Platz einnahmen. Es entspricht einer natürlichen Entwicklung, indem zuerst schneller wachsende Pionierbaumarten wie Weide und Vogelbeere dominieren. Dies wurde auch von Brang et al. (2015) im Jahr 2010 auf verschiedenen weiteren Vivian-Flächen in der Schweiz so vorgefunden. Es könnte gut sein, dass die Schlussbaumart Fichte in den Folgejahren die dominante Rolle übernehmen wird. Im Vergleich zu den Baumhöhen von 2005 wurde bei allen vier Arten ein deutlicher Zuwachs verzeichnet: bei Birke, Fichte und Weide um mehr als das Doppelte; bei der Vogelbeere rund ein Drittel mehr. Dies war ein erfreuliches Ergebnis. 2005 wurde Abb. 32 mit dem Beschrieb «Die Fläche wirkt noch beinahe unbestockt» versehen (Schönenberger & Brang, 2006). Das hatte sich in den letzten 15 Jahren deutlich verbessert. Die Artenzusammensetzung hatte sich seither nicht verändert mit ebenfalls Weide und Vogelbeere als dominante Arten (Schönenberger et al., 2005).

Es muss jedoch beachtet werden, dass insgesamt nur 40 Bäume mit Sicherheit gefunden und die Messung wiederholt werden konnte. Besonders beim Plot 1412 war es schwierig, die Bäume mit dem Azimut und Distanz aus den Vorjahren zu identifizieren. Damit ergaben sich kleine Stichprobengrössen pro Baumart, welche besonders bei der Birke mit zwei Individuen zu klein war für eine Interpretation. Zudem streuten die Werte zu beiden Zeitpunkten und bei allen Baumarten stark (siehe Abb. 23). Dies könnte jedoch auf den grundsätzlich grossen Unterschied zwischen naturverjüngten Bäumen zurückgeführt werden. Es gab noch eine Erhebung im Jahr 2009. Diese wurde wahrscheinlich aber auf eine andere Weise durchgeführt, da sich daraus auf der belassenen Fläche keine genügende Datenlage für einen Vergleich ergab.



Abb. 32: Zustand der belassenen Variante 2005 (Quelle: Schönenberger & Brang, 2006)

Bei der Verjüngung von 20-130 cm wurden die gleichen vier Baumarten gefunden. Fichte und Vogelbeere entsprachen in etwa dem Anteil, welchen sie auch bei den grösseren Bäumen einnahmen. Birken wurden interessanterweise im Verhältnis viel mehr in der Kategorie 20-130 cm gefunden als bei den höheren Bäumen. Bei den Weiden war es gerade umgekehrt. Ob von den Birken tatsächlich weniger Individuen durchkommen und grösser werden oder ob die Entwicklung naturgemäss so verläuft, ist schwer zu beurteilen. Wieso relativ wenig Verjüngung bei der Weide gefunden wurde, ist ebenfalls unklar. Von allen Baumarten kann gesagt werden, dass genügend Samenbäume vorhanden waren. Spannend war auch, dass keine Bergahorn-, Tannen oder Weisslerlenverjüngung gefunden wurde, obwohl diese 2005 auf den angrenzenden Teilflächen (geräumt und bepflanzt) als Bäume vorhanden waren (Schönenberger & Brang, 2006). In Disentis fehlten durch den grossen Windwurf nahestehende ältere Samenbäume weitgehend, was der Grund für das weitere Ausbleiben dieser Arten sein könnte. Die Höhe der Verjüngung mit im Mittel rund 50 cm über alle vier Arten hinweg wurde als genügend wahrgenommen. 2005 wurden viele Kleinstandorte als «verjüngungsunfreundlich» vorgefunden, insbesondere zwischen den sich noch teils hangabwärts bewegenden Totholzstämmen (Schönenberger et al., 2005). Im Jahr 2019 gab es auch ungünstige Standorte für die Verjüngung, jedoch weniger aufgrund des Totholzes, welches sich weiter gesetzt hatte und kaum mehr zu bewegen war. Als hinderlich wurde vielmehr die teils üppige Bedeckung durch Hochstauden wahrgenommen, wobei insbesondere die Weidenröschen sehr dicht wuchsen und Verjüngung dazwischen praktisch unmöglich machten.

Verbiss wurde relativ häufig festgestellt, insbesondere bei Fichte und Vogelbeere mit mehr als der Hälfte verbissenen Individuen. Dies ist insbesondere für die Fichte ein hoher Anteil, da gemäss des dritten Landesforstinventars in den Alpen nur rund 5% der Fichtenverjüngung von 10-129 cm verbissen wurden (Brändli, 2010). Bei den Laubhölzern, in welche Kategorie die Vogelbeere fällt, waren es doch schon 35%, was näher beim Ergebnis von Disentis liegt. Trotzdem kann davon ausgegangen werden, dass auch die verbissenen Individuen durchaus aufkommen können, da nur rund ein Drittel der Pflanze verbissen war (Schadengrad 1).

Moderholzverjüngung wurde im Vergleich zu 2010 deutlich öfters festgestellt. Auch die Höhe der gefundenen Verjüngung hatte zugenommen. Die Hypothese, dass mit stärkerem Vermoderungsgrad des Totholzes mehr Verjüngung vorhanden ist, konnte insgesamt angeschaut nicht signifikant bestätigt werden. Einzig die Fichte war deutlich untervertreten auf weniger stark vermodertem Holz. Gemäss Zielonka (2006), ist zwischen 30 und 60 Jahre altes Totholz ein optimales Substrat für die Fichte. Zudem fanden Tsvetanov et al. (2018) in älteren Windwurfflächen eine zweite Verjüngungsphase rund 15-30 Jahre nach dem Sturm vor, bei welcher das Totholz ein wichtiges Substrat für die Fichten- und Tannenverjüngung darstellte. Damit erscheint es logisch, dass Fichtenverjüngung auf der Versuchsfläche 29 Jahre nach dem Sturm vermehrt auf stärker vermodertem Totholz gefunden wurde. Die Auswertungen der Moderholzverjüngung in dieser Arbeit basierten jedoch teils auf sehr kleinen Stichproben und sind deshalb mit Vorsicht zu interpretieren.

Trotz häufigen Auffindens trug die Moderholzverjüngung mit den momentan geringen Höhen noch nichts zur Schutzwirkung gegen Lawinen bei. Dies könnte sich aber in den folgenden Jahren ändern. Zudem ist die Verjüngung auf Moderholz wohl die einzige Möglichkeit für Bäume in Teilen mit dichter Hochstaudenvegetation überhaupt aufzukommen. Dort durchbrach das Totholz die Hochstauden meistens (siehe Abb. 16). Damit könnte die Moderholzverjüngung zukünftig einen entscheidenden Beitrag leisten, um diese sonst ungünstigen Standorte zu bewachsen.

Die Verjüngung hatte sich 2019 in grossen Teilen der Fläche zu einem weitgehend schutzwirksamen Folgebestand entwickelt. Trotzdem waren die gewachsenen Bäume ungleichmässig auf die Fläche verteilt mit einem deutlichen Schwerpunkt auf der nordöstlichen Hälfte und im unteren Teil des Untersuchungsgebietes. Befände sich unterhalb der Versuchsfläche ein bedeutendes Schadenpotenzial wie beispielsweise eine Siedlung, würden diese Lücken ein gewisses Risiko darstellen. Sie könnten mit künstlichen Pflanzungen verbessert werden, was aber mit einigem Aufwand verbunden wäre. Wegen den üppigen Hochstauden müssten die Pflanzungen regelmässig ausgemäht und zum Schutz gegen Wildverbiss vielleicht sogar eingezäunt werden. Das Verbauen der Lücken wäre angesichts der eher kleinen Lückengrössen und der hohen Kosten von rund 625'000 CHF/ha keine verhältnismässige Option (Noack et al., 2004). Sinnvoller als ein flächiger Verbau wäre wahrscheinlich ein punktueller Verbau der exponiertesten Standorte, unter Umständen mit Pflanzungen kombiniert. Eine andere Möglichkeit wäre, zuzuwarten und das Aufkommen der Moderholzverjüngung in den Lücken zu beobachten. Dies wäre durchaus eine mögliche Variante, weil durch das liegende Totholz noch ein gewisser Lawinenschutz, zumindest für Winter mit durchschnittlichen Schneehöhen, gegeben ist.

5 Schlussfolgerung

Die Untersuchung der Schutzwirkung gegen Lawinen und der Waldentwicklung auf der Windwurffläche Disentis ergab 2019 Folgendes:

Die **Wirkhöhen** von Totholz und Bäumen auf der Fläche waren mit Ausnahme von zwei Lücken wirksam für einen 30- bis 100-jährlichen Schneefall. Für ein grösseres Ereignis wurden insgesamt sechs Lücken gefunden, womit die Schutzwirkung für einen noch extremen Schneefall nicht gegeben war. Trotzdem waren auf mehr als 65% der Fläche Elemente mit einer Wirkhöhe über 0.5 m vorhanden, welche bei einem durchschnittlichen Schneefall bereits Wirkung zeigen könnten.

Die **Rauigkeit** veränderte sich deutlich über die Jahre mit einem Tiefpunkt im Jahr 2001. Diese offenbar kritische Phase wurde in der Realität im Lawinenwinter 1999 jedoch nicht bestätigt, da keine Lawinen im belassenen Teil registriert wurden. Im Jahr 2019 war die Rauigkeit wieder fast so hoch wie direkt nach dem Sturm. Es gab aber Unterschiede in der Verteilung der Rauigkeit: Das Totholz führte in den ersten Jahren zu einer gleichmässigeren Verteilung über die Fläche als die später dominierende Bestockung, welche mehr Lücken aufwies.

Die Wirkhöhen des **Totholzes** hatten erwartungsgemäss weiter abgenommen seit der letzten Erhebung 2010 und erreichten die Höhe eines 30-jährlichen Schneefalles nicht mehr. Es wurden weitere Elemente wie Wurzelteller und -stöcke mit Höhen von im Mittel einem Meter gefunden. Diese zusammen mit den stark gesackten Totholzstämmen könnten in einem durchschnittlichen Winter noch eine gewisse Wirkung zeigen. Die Vermoderung des Totholzes war, wie vermutet, schon weit bis sehr weit fortgeschritten.

Die Bäume über 130 cm Höhe hatten sich in weiten Teilen der Fläche zu einem schutzwirksamen **Folgebestand** entwickelt. Bei den 40 wiederholt gemessenen Bäumen wurde ein deutlicher Zuwachs auf teils mehr als die doppelte Höhe seit 2005 verzeichnet, dies jedoch bei stark streuenden Werten. Im Vergleich zum Bestand von vor dem Sturm hatte auch die Anzahl Arten deutlich zugenommen: Von einem reinen Fichtenbestand zu einer Mischung aus Birken, Fichten, Vogelbeeren und Weiden. Verjüngung zwischen 20-130 cm Höhe war bei allen Baumarten vorhanden. Es gab jedoch einige Standorte mit starkem Hochstaudenbewuchs, an welchen das Aufkommen von Verjüngung unmöglich schien. Verbiss der Bäume bis 4 m Höhe war relativ häufig, meist aber in geringer Masse und somit nicht kritisch für das Aufkommen. Die Verteilung der Bäume war nicht gleichmässig über die Fläche hinweg und es gab Lücken mit mangelhaftem oder fehlendem Folgebestand.

Die **Moderholzverjüngung** hatte im Vergleich zu 2010 deutlich zugenommen. Besonders der Fichte schien das nun stärker vermoderte Totholz ein besseres Substrat zu bieten. Mit den momentan noch geringen Höhen trug die Moderholzverjüngung nichts zur Schutzwirkung gegen Lawinen bei. In Zukunft könnte sie aber entscheidend sein für einen Folgebestand auf Teilen der Flächen, die wegen vieler Hochstauden sonst ungünstig sind für die Verjüngung auf dem Boden.

Gesamthaft gesehen **erfüllte die Windwurffläche Disentis die Schutzfunktion gegen Lawinen weitgehend gut**. In Abb. 33 ist festgehalten, wie der Zustand der Fläche aufgrund dieser Arbeit eingeordnet werden könnte. Dabei handelt es sich um ein qualitatives Gedankenmodell und keine präzise Quantifizierung. Die Schutzwirkung des Totholzes hatte erwartungsgemäss auf der ganzen Fläche abgenommen (brauner Kreis in Abb. 33) und der Folgebestand an Bedeutung gewonnen (grünes Oval). Dazwischen gab es noch **kleinere Lücken** mit ungenügender Schutzwirkung, so dass im Jahr 2019 stellenweise ein **gewisses Schutzdefizit** bestand (rosa Kreis).

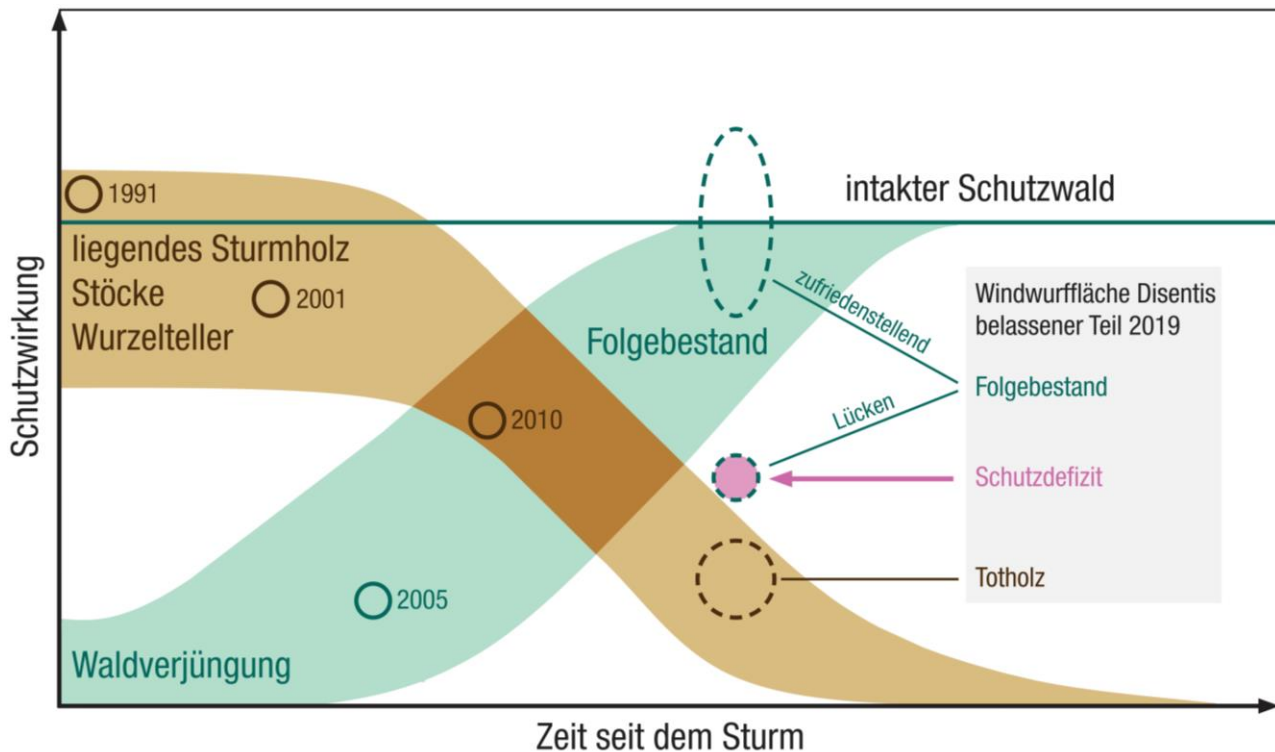


Abb. 33: Entwicklung der Schutzwirkung auf Windwurfflächen im Laufe der Zeit; Veränderungen und Zustand 2019 der Versuchsfläche Disentis wurde als Gedankenmodell ergänzt (Quelle: Bebi et al., 2015; verändert)

5.1 Ausblick

Es wäre spannend, die Entwicklung des Folgebestandes und dessen Verjüngung zu einem späteren Zeitpunkt anzuschauen. Der Folgebestand wird künftig entscheidend zur Schutzwirkung gegen Lawinen beitragen. Da Daten seit dem Sturm 1990 vorhanden sind, ist die weiterführende Beobachtung der Fläche besonders wertvoll. Speziell die Rolle der Moderholzverjüngung, welche jetzt langsam an Bedeutung gewonnen hat, wäre zukünftig interessant zu dokumentieren. Die Tothzelemente wurden mit Azimut und Distanz zum Plotzentrum aufgenommen. Damit könnte die Moderholzverjüngung später identifiziert und deren Wachstum untersucht werden. Wichtig wäre zu wissen, ob sie wirklich fähig ist, an Standorten mit starkem Hochstaudenbewuchs durchzukommen.

Das Totholz wird in Zukunft wahrscheinlich noch mehr vermodert sein und für die Schutzwirkung eine untergeordnete Rolle spielen. Daher ist eine erneute Untersuchung des Totholzes wahrscheinlich nicht zielführend.

Für die Erstellung eines Vegetationshöhenmodells wäre als Grundlage ein digitales Terrainmodell mit höherer Auflösung hilfreich. Dies könnte in Zukunft mit besser zugänglichen Lidar-Sensoren an Drohnen (engl.: light detection and ranging) gut möglich sein.

Für die Berechnung der Oberflächenrauigkeit gibt es weitere Methoden. Diese könnten für die Fläche in Disentis ebenfalls angewendet werden. Mit einem Vergleich könnte die Methode gesucht werden, welche am besten für Windwurfflächen geeignet ist.

In einem Winter mit aussergewöhnlichen Schneehöhen wäre es interessant, die Versuchsfläche zu beobachten. Im Falle einer Lawine wäre wichtig zu wissen, in welchem Teil der Fläche diese entstehen konnte.

6 Literaturverzeichnis

- BAFU. (2008). *Entscheidungshilfe bei Sturmschäden im Wald, Vollzugshilfe für die Wahl der Schadensbehandlung im Einzelbestand*. Bern: Bundesamt für Umwelt.
- BAFU. (2010). *Wald und Wild – Grundlagen für die Praxis*. Bern: Bundesamt für Umwelt.
- BAFU & WSL. (2007). *Lawinenverbau im Anbruchgebiet. Technische Richtlinie als Vollzugshilfe*. Bern: Bundesamt für Umwelt & Birmensdorf: Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL.
- Bebi, P., Putallaz, J.-M., Fankhauser, M., Schmid, U., Schwitter, R., & Gerber, W. (2015). Die Schutzfunktion in Windwurfflächen. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen*, 166(3), S. 168-176. <http://dx.doi.org/10.3188/szf.2015.0168>
- Brändli, U.-B. (2010). *Schweizerisches Landesforstinventar, Ergebnisse der dritten Erhebung 2004-2006*. Birmensdorf: Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL.
- Brang, P., Hilfiker, S., Wasem, U., Schwyzer, A., & Wohlgemuth, T. (2015). Langzeitforschung auf Sturmflächen zeigt Potenzial und Grenzen der Naturverjüngung. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen*, 166(3), S. 147–158. <http://dx.doi.org/10.3188/szf.2015.0147>
- Brožová, N., Fischer, J.-T., Bühler, Y., Bartelt, P. & Bebi, P. (2019). Determining forest parameters for avalanche simulation using remote sensing data. In *Cold Regions Science and Technology*, in Vorbereitung, unveröffentlicht.
- CCA. (2016). *Technical Aspects of Snow Avalanche Risk Management: Resources and Guidelines for Avalanche Practitioners in Canada*. Revelstoke: Canadian Avalanche Association.
- Crawley, M.J. (2007). *The R Book*. West Sussex: John Wiley & Sons Ltd.
- Düggelin, C., & Keller, M. (2017). *Schweizerisches Landesforstinventar: Feldaufnahme-Anleitung 2017*. Birmensdorf: Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL.
- earthdatascience.org. (ohne Datum). *Lesson 3. Canopy Height Models, Digital Surface Models & Digital Elevation Models - Work With LiDAR Data in Python*. Abgerufen am 30.08.2019 von <https://www.earthdatascience.org/courses/earth-analytics-python/lidar-raster-data/lidar-chm-dem-dsm/>
- ESRI. (ohne Datum). *ArcGIS Pro – Hilfe, Stichworte: Resampling*. Abgerufen am 26.08.2019 von <https://pro.arcgis.com/de/pro-app/help/main/welcome-to-the-arcgis-pro-app-help.htm>
- Fankhauser, M. (2010). Lawinenschutzwirksamkeit auf Vivian-Windwurfflächen. In *Bachelorarbeit SHL*, unveröffentlicht.
- Frehner, M., Wasser, B., & Schwitter, R. (2005). *NaiS - Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald: Wegleitung für Pflegemassnahmen in Wäldern mit Schutzfunktion*. 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 startin zones. *Forest Snow and Landscape Research*, 77(1), S. 89-107.

- Hirt, C. (2014). Digital Terrain Models. *Encyclopedia of Geodesy*. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-02370-0_31-1
- Lachat, T., Brang, P., Bolliger, M., Bollmann, K., Brändli, U.-B., Bütler, R., Herrmann, S., Schneider, O., & Wermelinger, B. (2019). *Totholz im Wald: Entstehung, Bedeutung und Förderung* (2. Auflage). Merkblatt für die Praxis 52. Birmensdorf: Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL.
- Losey, S., & Wehrli, A. (2013). *Schutzwald in der Schweiz. Vom Projekt SilvaProtect-CH zum harmonisierten Schutzwald*. Bern: Bundesamt für Umwelt.
- Margreth, S., Stoffel, L., Schaer, M. (2015). *Berücksichtigung der Lawinen- und Schneedruckgefährdung bei Seilbahnen. Ein Leitfaden für die Praxis*. WSL Bericht 28. Davos: WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF.
- Martinec, J., Lang, H., & Rohrer, M., (1992). *Hydrologischer Atlas der Schweiz. Tafel 3.2: Schneehöhen und Wasseräquivalente der Schneedecke, Neuschneehöhen extremer Schneefall-Ereignisse*. Wabern-Bern: Bundesamt für Landestopographie.
- Netzer, V. (2010). Langfristige Lawinenschutzwirksamkeit auf Windwurfflächen: Entwicklung der Verjüngung. In *Masterarbeit ETH*, unveröffentlicht.
- Noack, A., Schönenberger, W., & Thee, P. (2004). Schützen Windwurfflächen vor Lawinen und Steinschlag?. *Wald und Holz*, 10, S. 43-46.
- Ott, T. (2019). Schutzwirkung gegen Lawinen auf Vaia-Windwurfflächen im Val Tuors. In *Bachelorarbeit ZHAW*, unveröffentlicht.
- Ott, E., Frehner, M., Frey, H.-U., & Lüscher, P. (1997). *Gebirgsnadelwälder, Ein praxisorientierter Leitfaden für eine standortgerechte Waldbehandlung*. Bern, Stuttgart, Wien: Haupt Verlag.
- Putallaz, J.-M. (2010). Protection à long terme contre les avalanche sur les surface de chablis. In *Masterarbeit ETH*, unveröffentlicht.
- Sappington, J.M., Longshore, K., & Thompson, D.B. (2007). Quantifying Landscape Ruggedness for Animal Habitat Analysis: A Case Study Using Bighorn Sheep in the Mojave Desert. *Journal of Wildlife Management*, 71(5), S. 1419-1426. <https://doi.org/10.2193/2005-723>
- Schmidtke, H., & Scherrer, H.-U. (1997). *Sturmschäden im Wald*. Zürich: vdf Hochschulverlag AG der ETH Zürich.
- Schönenberger, W. (2002a). Post windthrow stand regeneration in Swiss mountain forests: The first ten years after the 1990 storm Vivian. *Forest Snow and Landscape Research*, 77(1), S. 61-80.
- Schönenberger, W. (2002b). Windthrow research after the 1990 storm Vivian in Switzerland: Objectives, study sites, and projects. *Forest Snow and Landscape Research*, 77(1), S. 9-16.
- Schönenberger, W., & Brang, P. (2006). Wiederbewaldung von «Vivian»-Windwurfflächen im Gebirgswald. *Wald und Holz*, 6, S. 38-41.
- Schönenberger, W., Brang, P., & Wasem, U. (2005). Wiederbewaldung der Vivian-Versuchsflächen Disentis, Pfäfers, Schwanden und Zweisimmen: 15 Jahre Entwicklung. Auswertung der Verjüngungsaufnahmen 1992-2005, Naturverjüngung und Pflanzung. In *WSL Schlussbericht Wiederbewaldung Vivian-Versuchsflächen 2005*, unveröffentlicht.

- Schwitter, R., Sandri, A., Bebi, P., Wohlgemuth, T., & Brang, P. (2015). Lehren aus Vivian für den Gebirgswald im Hinblick auf den nächsten Sturm. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen*, 166(3), S. 159–167. <http://dx.doi.org/10.3188/szf.2015.0159>
- Swisstopo. (ohne Datum). *Layer: Landeskarte PK25 mit Relief; SwissALTI3D* (Zugang durch Datenvereinbarung mit WSL). Abgerufen am 23.08.2019 von <https://map.geo.admin.ch/>
- Trimble. (2011). *User Guide, GeoExplorer 6000 series*. Abgerufen am 16.09.2019 von <https://www.manualslib.com/manual/617077/Trimble-Geoexplorer-6000-Series.html>
- Tsvetanov, N., Dountchev, A., Panayotov, M., Zhelev, P., Bebi, P., & Yurukov, S. (2018). Short- and long-term natural regeneration after windthrow disturbances in Norway spruce forests in Bulgaria. *iForest - Biogeosciences and Forestry*, 11, S. 675-684. <https://doi.org/10.3832/ifor2754-011>
- Usbeck, T., Wohlgemuth, T., Dobbertin, M., Pfister, C., Bürgi, A., & Rebetez, M. (2010). Increasing storm damage to forests in Switzerland from 1858 to 2007. *Agricultural and Forest Meteorology*, 150(1), S. 47–55. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2009.08.010>
- Westoby, M.J., Brasington, J., Glasser, N.F., Hambrey, M.J., & Reynolds, J.M. (2012). 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, 179, S. 300–314. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021>
- Wohlgemuth, T., Kull, P., & Wüthrich, H. (2002). Disturbance of microsites and early tree regeneration after windthrow in Swiss mountain forests due to the winter storm Vivian 1990. *Forest Snow and Landscape Research*, 77(1), S. 17-47.
- Wohlgemuth, P., Schwitter, R., Bebi, P., Sutter, F., & Brang, P. (2017). Post-windthrow management in protection forests of the Swiss Alps. *European Journal of Forest Research*, 136(5-6), S. 1029-1040. <https://doi.org/10.1007/s10342-017-1031-x>
- Zielonka, T. (2006). When does dead wood turn into a substrate for spruce replacement?. *Journal of Vegetation Science*, 17(6), S. 739-746. [https://doi.org/10.1658/1100-9233\(2006\)17\[739:WDDWTI\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1658/1100-9233(2006)17[739:WDDWTI]2.0.CO;2)

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Entwicklung der Schutzwirkung auf Windwurfflächen im Laufe der Zeit (Quelle: Bebi et al., 2015; verändert)	- 4 -
Abb. 2: Ansicht der drei Teilflächen mit unterschiedlicher Behandlung, diese Arbeit untersuchte nur den belassenen Teil (rotes Rechteck), (Quelle: U. Wasem, WSL; verändert).....	- 5 -
Abb. 3: Karte mit dem Untersuchungsgebiet (rotes Rechteck) im Uval Cavorgia Su zwischen Disentis und Curaglia im Kanton Graubünden (Quelle: Swisstopo, ohne Datum, verändert)	- 6 -
Abb. 4: Verschiedene Höhenmodelle in der Fernerkundung, DSM entspricht deutsch DOM, CHM entspricht deutsch VHM (Quelle: earthdatascience.org, ohne Datum)	- 7 -
Abb. 5: Abweichung des Vegetationshöhenmodells (VHM) gegenüber der im Feld erhobenen Baumhöhen. Positive Werte bedeuten ein höheres VHM im Vergleich zur Realität.....	- 8 -
Abb. 6: Drei verschiedene Methoden um die Rauigkeit der Oberfläche zu berechnen. Hier wurde die Methode VRM verwendet (rotes Rechteck), welche Hangneigung und Exposition gemeinsam berücksichtigt (Quelle Sappington et al., 2007)	- 9 -
Abb. 7: Plots der Feldaufnahmen 2019, Fläche für Erhebung des Kronendeckungsgrad blau, restliche Variablen auf der roten Fläche erhoben (Quelle: Koordinaten der Plotzentren von M. Marty, WSL; Orthofoto vom 18.06.2019 erstellt durch A. Bast, SLF; eigene Produktion)	- 10 -
Abb. 8: Sackmesseremethode zur Bestimmung des Zersetzungsgrades von Totholz (Quelle: Lachat et al., 2019).....	- 12 -
Abb. 9: Kreisdiagramm der Wirkhöhen auf der belassenen Fläche in m ² und deren Anteil in %-	15 -
Abb. 10: Wirkhöhen basierend auf dem VHM, Lücken von mehr als 40 m Länge in Falllinie sind eingezeichnet (gemäss NaiS, Anforderungsprofil minimal, Frehner et al., 2005), Lücken zwischen Wirkhöhen von 2.5 min orange und Lücken zwischen Wirkhöhen von 5 m in blau (Quelle: Koordinaten der Plotzentren von M. Marty, WSL; Oberflächenmodell als Ausgangsdaten erstellt durch A. Bast, SLF; eigene Produktion)	- 16 -
Abb. 11: Schattierungsbilder der Versuchsfläche in den Jahren 1991, 2001, 2009 und 2019 (Quelle Oberflächenmodelle: 1991-2009 erstellt durch Swisstopo; 2019 erstellt durch A. Bast, SLF; eigene Produktion)	- 18 -
Abb. 12: Rauigkeit der Versuchsfläche in den Jahren 1991, 2001, 2009, 2019 (Quelle Oberflächenmodelle: 1991-2009 erstellt durch Swisstopo; 2019 erstellt durch A. Bast, SLF; eigene Produktion)	- 19 -
Abb. 13: Entwicklung der Windwurffläche Disentis im belassenen und naturverjüngten Teil; oben direkt nach dem Sturm 1990, unten Zustand 2019 (Quelle: U. Wasem, WSL)	- 20 -
Abb. 14: Entwicklung der Windwurffläche Disentis im belassenen Teil (Quelle: U. Wasem, WSL)....	- 21 -
Abb. 15: Totholz und Vegetation bei der Feldaufnahme im Juli 2019.....	- 21 -
Abb. 16: Liegende Stämme bei der Feldaufnahme im Juli 2019.....	- 22 -

Abb. 17: Übersicht verschiedener Deckungsgrade in % der erhobenen Plotflächen; links Totholz (r = 4 m), Mitte Bodenvegetation (r = 4 m), rechts Kronendeckungsgrad (r = 10 m)	23 -
Abb. 18: Totholz in Höhenkategorien als Anteile am Deckungsgrad Totholz	23 -
Abb. 19: Höhe über dem Grund von liegenden Stämmen (1991, 2001, 2010, 2019 St) und höchsten Elementen (2019 hE); Anzahl Stichproben: 1991-2010 n = 98 (wiederholte Aufnahme, Daten von Wohlgemuth et al., 2017), 2019 St n = 75 (neue Stichprobe), 2019 hE n = 25 (neue Stichprobe)	24 -
Abb. 20: Wirkhöhe in cm der im Feld gemessenen Totholzstrukturen, aufgeteilt in höchste Elemente und Stämme, im Vergleich zur maximalen Schneehöhe eines 30-jährlichen Ereignisses (rote Linie, berechnet nach Margreth et al., 2015) und Sollhöhe (blaue Linie, BSH mit Faktor 1.5x gemäss Bebi et al., 2015).....	25 -
Abb. 21: Höhe der Elemente nach Vermoderungsgrad, ohne Totholz nach Vivian und Höhen über 150 cm.....	26 -
Abb. 22: Mittlere Höhe 2019 in cm nach Baumart	27 -
Abb. 23: Mittlere Höhen 2005, 2019 und mittlerer Zuwachs nach Baumart; rote Balken zeigen Standardabweichung (Quelle: Daten 2005 von U. Wasem, WSL; eigene Produktion)	27 -
Abb. 24: Anzahl erhobene Verjüngung in der Höhe 20-130cm nach Baumart (n total = 57)	28 -
Abb. 25: Höhe 2019 der erhobenen Verjüngung in cm nach Baumart.....	28 -
Abb. 26: Verbiss an einer Fichte auf der Versuchsfläche Disentis.....	29 -
Abb. 27: Verbiss nach Art von Bäumen und Verjüngung bis 4 m Höhe	29 -
Abb. 28: Moderholzverjüngung auf der Versuchsfläche Disentis 2019, hier eine Fichte	30 -
Abb. 29: Höhe der grössten Moderholzverjüngung pro Baumart	31 -
Abb. 30: Anzahl Moderholzverjüngung nach Baumart auf Moder- und Mulmholz.....	31 -
Abb. 31: Mosaik-Plot mit dem Vermoderungsgrad und der Baumart der Moderholzverjüngung; die Grösse der Quadrate gibt die Anteile in den Klassen Moder- und Mulmholz wieder; einzig Fichte ist auf Moderholz statistisch signifikant untervertreten (hellrotes Quadrat).....	32 -
Abb. 32: Zustand der belassenen Variante 2005 (Quelle: Schönenberger & Brang, 2006)	37 -
Abb. 33: Entwicklung der Schutzwirkung auf Windwurfflächen im Laufe der Zeit; Veränderungen und Zustand 2019 der Versuchsfläche Disentis wurde als Gedankenmodell ergänzt (Quelle: Bebi et al., 2015; verändert)	40 -

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Wirkhöhenklassen des erstellten Vegetationsmodells, verwendet in Abb. 10.....	- 8 -
Tab. 2: Typen Bodenvegetation (gemäss Schönenberger et al., 2005; verändert)	- 11 -
Tab. 3: Schadengrad Verbiss und andere Schäden (Quelle: Schönenberger et al., 2005)	- 13 -
Tab. 4: Signifikanz-Levels zur Interpretation der statistischen Ergebnisse	- 13 -
Tab. 5: Berechnung der 30-jährlichen maximalen Schneehöhe auf der Versuchsfläche Disentis (gemäss Margreth et al., 2015)	- 14 -
Tab. 6: Wirkhöhen auf der belassenen Fläche in m ² und Anteil am untersuchten Perimeter	- 15 -
Tab. 7: Rauigkeitsindex der Jahre 1991, 2001, 2009 und 2019 als Mittelwert, Median und Standardabweichung	- 17 -
Tab. 8: Anzahl und prozentuale Anteile von Tothholzelementen aufgeteilt nach Vermoderungsgrad in den Jahren 2010 (Netzer, 2010) und 2019 (eigene Erhebung)	- 25 -

Anhangsverzeichnis

Anhang 1: Legende Feld 2019

Anhang 2: Beispiel Aufnahmeprotokolle Feld 2019

Anhang 3: Selbständigkeitserklärung

Anhang 4: Poster

Anhang 1: Legende Feld

Legende Feldaufnahmen Disentis 2019, Cavorgia, Teilfläche «belassen»

SLF, Bachelorarbeit Mirjam Marty

Formular A = Allgemeine Plot-Parameter

Koordinaten in CH1903+/LV95

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

Bodenvegetation:

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

Kronendeckungsgrad: mit Radius 10m anschauen

Formular EV = Einzelparameter Verjüngung

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

Distanz Abstand der Pflanze vom Plot-Zentrum in dm

Baumart

Fi	Fichte	Ta	Tanne
Lä	Lärche	Fö	Föhre
Bu	Buche	Ba	Bergahorn
Es	Esche	Ei	Eiche
Bi	Birke	We	Weide
Er	Grauerle	Ki	Kirsche
Vb	Vogelbeere	Mb	Mehlbeere
Av	Arve		

Einwuchsjahr (in Höhe > 20 cm)

Höhe 2000 (letzte Aufnahme)

Höhe 2019 Schaftlänge in cm, ohne Neutrieb

Verbiss?

0 = nein

1 = ja

Andere Schäden?

0 = nein

1 = ja

Schadengrad

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

Vermoderungsgrad

Formular ET = Einzelparameter Totholz

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

Distanz Abstand der Pflanze vom Plot-Zentrum in dm

Höhe: vertikal über Grund

Durchmesser: nur bei Stämmen, dickeres Ende

Vermoderungsgrad: 5 Stufen

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

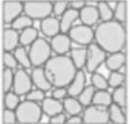
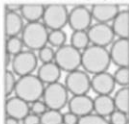
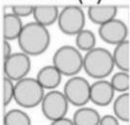
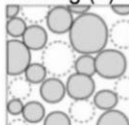
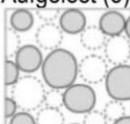
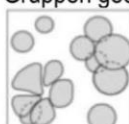
Fi	Fichte	Ta	Tanne
Lä	Lärche	Fö	Föhre
Bu	Buche	Ba	Bergahorn
Es	Esche	Ei	Eiche
Bi	Birke	We	Weide
Er	Grauerle	Ki	Kirsche
Vb	Vogelbeere	Mb	Mehlbeere
Av	Arve		

Anhang 2: Beispiel Aufnahmeprotokoll Feld

Feldprotokoll Disentis 2019
Cavorgia, Teilfläche «belassen»

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

Lücke Definition siehe Le-gende	Ja/nein? (0/1)		Länge (dm)		Breite (dm)		Bemerkungen	
Bodenvegetation Typen siehe Le-gende	Typ 1	Anteil %	Typ 2	Anteil %	Typ 3	Anteil %	Deckungsgrad (%)	
Totholz Plotfläche	Deckungsgrad (%)							
Totholz in Höhen-kategorien alle Elemente total 100%	<50cm (%)		50-100cm (%)		100-150cm (%)		150-200cm (%)	> 200cm (%)

Kronendeckungsgrad Radius 10m!	
Gedrängt (1) 	Normal (2) 
Locker (3) 	Räumig (4) 
Aufgelöst (5) 	Gruppen gedrängt (6) 

Bemerkungen / Skizze

Feldprotokoll Disentis 2019, Cavorgia Teilfläche "belassen"
Totholz / liegende Stämme

BearbeiterIn:		Datum / Uhrzeit:
Plot Nr. / Foto Nr.		

	Azimut (Grad°)	Distanz zu Mittelpunkt Plot (dm)	Höhe (cm)	Durchmesser (cm)	Vermoderungsgrad (5 Stufen)	Bewegung von Hand (0/1)	Moderholzverjüngung			Höhe höchste Verjüngung (cm)
							vorhanden ? (0/1)	Baumart Haupttyp	Anzahl pro Stamm	
höchstes Element										
Stamm 1										
Stamm 2										
Stamm 3										

Skizze

Anhang 3: Selbständigkeitserklärung

Erklärung betreffend das selbständige Verfassen einer Bachelorarbeit im Department 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:

Davos, 26.09.2019

Unterschrift:



Windwurffläche Disentis 29 Jahre nach Vivian Lawinenschutz & Waldentwicklung

Windwurf & Schutzwirkung

Schutzwälder leisten einen wichtigen Beitrag zur Sicherheit von Bevölkerung und Infrastruktur. Sie wirken gegen Lawinen, indem sie mit einem unregelmässigen Aufbau der Schneedecke deren Entstehung verhindern (Frehner et al., 2005). Wird ein Schutzwald durch einen Sturm stark beschädigt, ist dessen Funktion für Jahrzehnte in Frage gestellt. Liegendelassenes Totholz kann in der ersten Zeit nach dem Sturm Schutz bieten. Dieser lässt mit zunehmender Vermoderung des Holzes nach und der aufkommende Folgebestand sollte übernehmen (Bebi et al., 2015). Dazwischen kann ein Zeitfenster mit reduzierter Schutzwirkung entstehen (siehe Abb. 2).

Ziel & Forschungsfragen

Für die Beurteilung der Schutzwirkung gegen Lawinen auf der belassenen Windwurffläche Disentis 29 Jahre nach dem Sturm Vivian werden folgende Fragen angeschaut:

- Wie sind die Wirkhöhe und Rauigkeit auf der ganzen Fläche? Gibt es Lücken dazwischen?
- Wie hoch ist die Wirkhöhe des belassenen Totholzes noch? Wie weit ist die Vermoderung fortgeschritten?
- Hat sich die Verjüngung zu einem schutzwirksamen Folgebestand entwickelt? Trägt die Moderholzverjüngung (auf Totholz wachsend) dazu bei?

VHM & Felddaufnahme

Die langfristige Versuchsfläche der Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) befindet sich bei Disentis, Kanton Graubünden, auf 1400 - 1550 m ü.M. an einem Nordwesthang mit 30-45° Neigung. Der belassene Teil ist 2.5 ha gross. Mit einem Vegetationshöhenmodell (VHM) wurde Folgendes untersucht:

- Wirkhöhe (= Höhe über Grund) von Totholz und Bäumen
- Lücken zwischen verschiedenen Wirkhöhen (Lücke = über 40 m Länge in Fallrichtung, gemäss Frehner et al. (2005) für einen 40° steilen Hang).
- Entwicklung der Oberflächenrauigkeit zu vier Zeitpunkten (1991, 2001, 2009, 2019)

Auf 25 permanent eingerichteten Plots (je 50 m²) wurden Felddaufnahmen durchgeführt:

- Deckungsgrad Totholz & Bodenvegetation, Kronendeckung
- Totholz: Wirkhöhe, Breite, Vermoderungsgrad, Moderholzverjüngung des höchsten Elementes (hE) und von drei liegenden Stämmen (St)
- Folgebestand: Art, Höhe, BHD und Verbiss (Wiederholung von 2005)

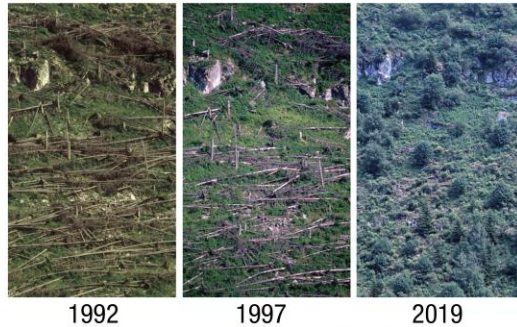


Abb. 1: Entwicklung der belassenen Windwurffläche Disentis von 1992 bis 2019 (U. Wasem, WSL)

Folgebestand

Bei 40 wiederholt gemessenen Bäumen wurde ein deutlicher Zuwachs festgestellt, besonders markant bei der Fichte (mehr als die vierfache Höhe von 2005).

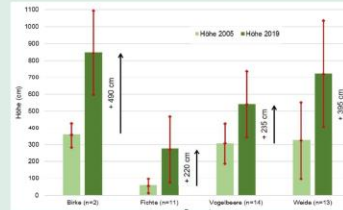


Abb. 4: mittlere Höhen 2005 & 2019 und Zuwachs, rote Balken zeigen Standardabweichung (Daten 2005: U. Wasem, WSL)

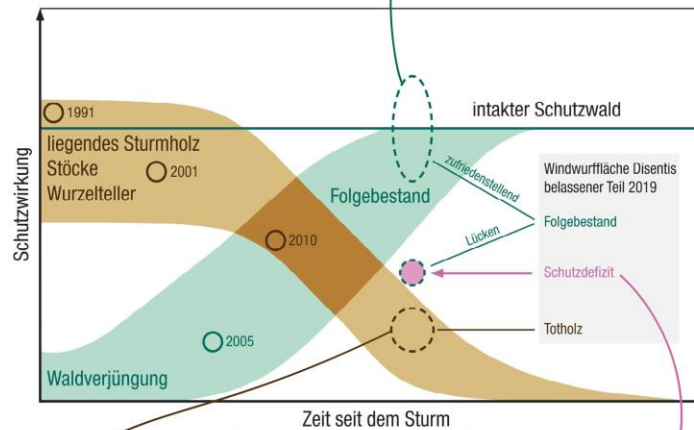


Abb. 2: Entwicklung der Schutzwirkung auf Windwurfflächen (Bebi et al., 2015; verändert)

Totholz

Die Wirkhöhe des Totholzes hatte seit dem Sturm kontinuierlich abgenommen und erreichte 2019 die Höhe eines 30-jährigen Schneefalls ($HS_{30} = 1.44$ cm, nach Margreth et al., 2015) nicht mehr.

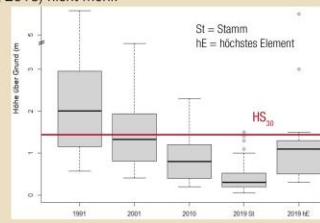


Abb. 3: Wirkhöhen (Daten 1991-2010: Wohlgemuth et al., 2017)

Lücken

Auf 39% der Fläche gab es Totholz und Bäume mit Wirkhöhe über 2.5 m, dazwischen wurden zwei Lücken gefunden. Auf 28% der Fläche wurden Wirkhöhen über 5 m festgestellt, mit vier Lücken dazwischen.

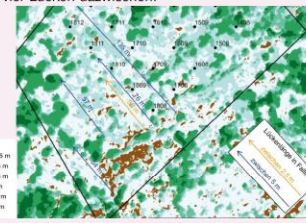


Abb. 5: flächige Wirkhöhen 2019 (Plots: M. Marty, WSL; DOM: A. Bast, SLF)

Entwicklung & Zustand 2019

Die Untersuchung der Lawinenschutzwirkung und der Waldentwicklung auf der Windwurffläche Disentis ergab Folgendes:

- **Wirkhöhen flächig:** mit Ausnahme von zwei Lücken, wirksam für einen 30- bis 100-jährigen Schneefall
- **Oberflächenrauigkeit:** Tiefpunkt im Jahr 2001; heute wieder fast so hoch wie nach dem Sturm, aber ungleichmässiger verteilt
- **Wirkhöhe des Totholzes:** mit fortgeschrittener Vermoderung erwartungsgemäss abgenommen; Wirkung in durchschnittlichem Winter möglich, nicht mehr bei grösseren Schneemengen
- **Folgebestand:** Bäume in weiten Teilen der Fläche zu einem schutzwirksamen Bestand entwickelt, Verjüngung vorhanden ausser an Stellen mit vielen Hochstäuden
- **Moderholzverjüngung:** deutlich zugenommen seit 2010, aber noch ohne Beitrag zur Schutzwirkung, in Zukunft entscheidend für Verjüngung zwischen dichten Hochstäuden

Fazit

Die Windwurffläche Disentis erfüllt die **Schutzfunktion gegen Lawinen weitgehend gut**. Dazwischen gibt es noch **kleinere Lücken** im Folgebestand, welche ein **gewisses Schutzdefizit** aufweisen.

Dank

Herzlichen Dank an die Fachkorrektoren Hansueli Bucher & Peter Bebi und an Natalie Brožová. Weiteren Dank an Ueli Wasem, Mauro Marty, Beat Pfund und die Academia Vivian für die Unterstützung bei der Feldarbeit. Danke an Alex Bast & Till Groh für die Hilfe bei Fernkundungs- & GIS-Fragen und an Frank Graf bei Statistik-Fragen. Merci an Alena Bareiss und Tobias Ott. Zuletzt ein grosses Dankeschön ans SLF für Arbeitsplatz und Unterkunft im Sommer 2019.

Bachelorarbeit von Mirjam Marty, ZHAW UI16
Abgabedatum: 24.10.2019

Fachkorrektoren: Hansueli Bucher & Dr. Peter Bebi



Quellen:
Bebi, P., Pfaller, J.-M., Fankhauser, M., Schmid, U., Schwitler, R., & Gerber, W. (2015). Die Schutzfunktion in Windwurflichen. Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen, 166(3), S. 168-176. <http://dx.doi.org/10.31883/zzf.2015.0168>
Frehner, M., Wasser, B., & Schwitler, R. (2005). NaS - Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald. Anleitung für Pflegemassnahmen in Wäldern mit Schutzfunktion. Bern: Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft.
Margreth, S., Stoffel, L., Scherer, M. (2015). Berücksichtigung der Lawinen- und Schneedruckgefährdung bei Seilbahnen. Ein Leitfaden für die Praxis. WSL, Bericht 28. Davos: WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF.
Wohlgemuth, P., Schwitler, R., Bebi, P., Suter, F., & Brang, P. (2017). Post-windthrow management in protection forests of the Swiss Alps. European Journal of Forest Research, 136(5-6), S. 1029-1040. <https://doi.org/10.1007/s10342-017-1031-x>