



EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

Datum

Unterschrift

Zusammenfassung

Der Wald ist in Österreich von großer Bedeutung u.a. für die Wirtschaft, die Erholung der Menschen und als Schutz vor Naturgefahren. Diese Funktionen des Waldes sind durch viele Einflußfaktoren, wie zum Beispiel durch Stürme, die großflächig Bäume umwerfen und entwurzeln, bedroht. Ob ein Schaden auftritt oder nicht, hängt dabei von verschiedenen Faktoren ab. Ein wesentlicher Aspekt in diesem Zusammenhang ist die Fragestellung, warum direkt neben geschädigten Bäumen ein Waldbestand unversehrt bleibt. Dieses Faktum wurde in zahlreichen Studien untersucht und war auch Motivation im Rahmen dieser Masterarbeit eine Untersuchung durchzuführen, wie man wenig stabile und somit gefährdete Bestände in einem Untersuchungsgebiet im Mür-Mürztal in der Steiermark identifizieren kann. Als Datengrundlage für die ins Modell einfließenden Parameter dienen Fernerkundungsdaten. Es wurden sehr hochauflösende Airborne Laserscannerdaten verwendet, um die für die Modellierung wichtigen Forstparameter abzuleiten. Die Stabilität der Waldgebiete wurde mit einem statistischen Modell mit einer Gewichtung durch Expertenwissen beurteilt. Das Ergebnis wurde analysiert und mit Kartierungen eines Sommersturmes validiert. Die Beurteilung der Stabilität liefert schon jetzt Schwerpunktgebiete für Sturmanfälligkeit, die bevorzugt in Bezug auf Maßnahmen überprüft werden sollten.

Abstract

Forest is of great importance i.e. for the Austrian economy, for recreation and as protection against natural hazards. These forest functions are threatened by many factors, such as storms, overturning and uprooting trees on a large scale. Various factors play a role in determining whether damage occurs or not. Often the forest remains intact directly next to damaged trees. This phenomenon was investigated in numerous studies and was also the motivation for this master thesis. An investigation was carried out on how to identify unstable and thus endangered forest stands in the research area in the Mür-Mürztal, Styria. Remote sensing data serve as the basis for the parameters entering the model. Very high resolution data from an airborne laserscanner were used to derive the important forest parameters for modelling. The stability of the area was assessed using a statistical model, weighted by expert knowledge. The result was analyzed and validated with damage mappings of a summer storm. The assessment of stability provides priority areas for storm susceptibility which should be inspected for necessary measures.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	1
Abstract	1
1 Einleitung und Problemstellung	5
2 Zielsetzung der Arbeit	7
3 Struktur der Arbeit	7
4.1 Stürme in Europa.....	8
4.2 Sturmschäden in den Alpen	11
4.3 Faktoren für erhöhte Gefährdung bei Sturm	13
4.3.1 Einzelbaumfaktoren	14
4.3.2 Bestandsfaktoren	14
4.3.3 Standortfaktoren.....	20
4.3.4 Externe Faktoren.....	23
4.4 Faktoren für größere Resilienz	24
5 Windrisikomodellierung und Sturmschadenvorhersage.....	25
6 State of the Art – Empirische Modelle	27
7.1 Untersuchungsgebiet und Datengrundlage	30
7.2 Berechnung der Vulnerabilitätsvariablen.....	33
7.3 Validierung der Parameter	43
7.4 Gesamtvulnerabilität.....	44
7.4.1 Gewichtung	44
7.4.2 Normierung/Standardisierung	45
7.4.3 Vergleich Standardisierungsmethoden und Klassenbildungen.....	48
8 Validierung der Ergebnisse	49
8.1 Diskussion der Ergebnisse und Verbesserungsmöglichkeiten	51
8.2 Einfluss der einzelnen Parameter auf die Stabilität	55
9 Zusammenfassung und Ausblick	56
Quellen	58
Anhang	62

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Waldflächenbilanz der Waldinventur 2007-2009 für die unterschiedlichen Seehöhenstufen (Quelle: Russ 2011, 4)	5
Abbildung 2: Gesamtschaden im europäischen Forst (in m^3) aufgrund unterschiedlicher Ursachen (in der Kategorie „other causes“ sind gemischte, nicht identifizierbare und anthropogene Störungen zusammengefasst; Quelle: Gardiner et al 2013a, 16 modifiziert von Schelhaas 2008)	6
Abbildung 3: Arbeitsablauf zur Stabilitätsbeurteilung des Waldes (Quelle: eigener Entwurf).....	7
Abbildung 4: Sturmschaden in Europa gegliedert nach Monaten (Quelle: Gardiner et al 2013a, 18 modifiziert von Gardiner et al 2010)	8
Abbildung 5: Zugrichtung von ausgewählten Tiefdruckgebieten (Quelle: Gardiner et al 2013a, 19)	9
Abbildung 6: Schematische Darstellung des Windes bei Gewittern mit der Böenfront (Quelle: eigener Entwurf)	10
Abbildung 7: Entwicklung von Holzvorrat im Wald in Relation zu Schaden durch Wind in Europa (Quelle: Gardiner et al 2013a, 17)	11
Abbildung 8: Waldzunahme am Eingang des Dischma- und des Flüelatal, Davos, Schweiz. Vergleich von 1900 (links) mit einer Aufnahme von 2010 (Quelle: Bebi et al 2017, 45).	12
Abbildung 9: Die gekippten Baumstümpfe im Vordergrund sind Zeugen eines vorangegangenen Windwurfs der dem Bestand im Hintergrund einen offenen Stammraum beschert hat, in den der Wind ungehindert eindringen kann (Weitentalgraben, St. Stefan ob Leoben, Steiermark; eigene Aufnahme 22.01.2018).....	16
Abbildung 10: Schematischer Querschnitt des Waldrandes mit unterschiedlichen Traufkantenwinkeln, der Wald schließt jeweils nach rechts an (Quelle: eigener Entwurf).....	17
Abbildung 11: Verlauf der Windbelastung in unmittelbarer Kronendachnähe ($z/H = 1.13$) von lichten Waldbeständen (BD25) mit unterschiedlichen luvseitigen Traufkanten: a) mittlere Windbelastung F_{mean} , b) maximale Windbelastung F_{max} , c) Verhältnis maximale zur mittleren Windbelastung F_{max}/F_{mean} ($g = 3.5$, $u_0 = 5.4$ m/s), auf der y-Achse ist der Abstand von der Waldkante als Verhältnis zur Baumhöhe aufgetragen(Quelle: Mayer et al 2010, 83).....	18
Abbildung 12: Windschaden durch einen Sturm 1945 in Neuseeland, die Schadflächen liegen vor allem hinter exponierten Bestandsrändern (Quelle: Sommerville et al 1989, 49).....	20
Abbildung 13: Variabilität und Ablenkung des Windes durch das Gelände. Bei diesem Beispiel von Freitag 29.12.2017 6h wird die Windgeschwindigkeit in km/h farbig anhand der Legende rechts und die Windrichtung anhand der Pfeile dargestellt. Die vorherrschende Windrichtung der Großwetterlage ist Nordwest. (Quelle: ZAMG 2017)	21
Abbildung 14: Anteil der geschädigten Flächen nach Windgeschwindigkeit in m/s für exponierten 60 Jahre alten Bestand (L60= niedriger Dichte, N60= normale Dichte, U60=ohne waldbauliche Maßnahmen; Quelle: Schelhaas 2008, 132)	22
Abbildung 15: Anteil der geschädigten Flächen nach Windgeschwindigkeit in m/s für geschützte 60 Jahre alte Bestände (L60= niedriger Dichte, N60= normale Dichte, U60=ohne waldbauliche Maßnahmen; Quelle: Schelhaas 2008, 133)	23
Abbildung 16: Methodische Ansätze zur Analyse der Entstehung, des Auftretens und der Ausprägungen von Sturmschäden in Wäldern (Quelle: Mayer et al 2010, 111 nach Gardiner et al 2008)	25
Abbildung 17: Schematische Darstellung des TOPEX-Werte s einer Kardinalrichtung für hohe Abschattung links und weniger Abschattung rechts (Quelle: Popkin 2011)	28
Abbildung 18: Das Untersuchungsgebiet und seine Lage in der Steiermark. Der gesamte Wald im Gebiet ist in dunkelgrün dargestellt (Quelle: eigener Entwurf).....	30
Abbildung 19: Darstellung des Holzvolumens in Vorratsfestmeter pro Hektar im steirischen Waldatlas (Quelle: Waldatlas 2011).....	32
Abbildung 20: Beispiele für Windwurfflächen im CIR Luftbild, die gelben Polygone stellen die Ränder der Polygone der Windwurfkartierung dar (Quelle: Aeromap, Niederöblarn, im Subauftrag von Joanneum Research)	33
Abbildung 21: Nadelwaldanteil (Quelle: eigener Entwurf).....	35
Abbildung 22: Vertikalstruktur (Quelle: eigener Entwurf).....	36
Abbildung 23: Kanten, also alle Pixel die nach der Neigungsberechnung aus dem geglätteten nDSM eine Neigung mindestens 75° aufweisen, drapiert über dem nDSM (Quelle: eigener Entwurf)	38

Abbildung 24: Kanten nach Exposition in die acht Kardinalrichtungen gegliedert drapiert über dem nDSM (Quelle: eigener Entwurf)	38
Abbildung 25: Nach Norden exponierte Kanten mit 100m Puffer drapiert über dem nDSM. (Quelle: eigener Entwurf)	39
Abbildung 26: Anzahl der 100m Puffer einer Kante, die das jeweilige Pixel potentiell gefährden könnte in der Zielauflösung von 10m x 10 m drapiert über dem nDSM. (Quelle: eigener Entwurf).....	39
Abbildung 27: Die detektierten Kanten aus dem nDSM sind nicht immer ident mit den Bestandsgrenzen (Quelle: eigener Entwurf).....	40
Abbildung 28: Exponiertheit und Abschattung durch das Gelände können durch den TOPEX berechnet werden (Quelle: eigener Entwurf)	42
Abbildung 29: Verteilung der TOPEX-Werte im Untersuchungsgebiet. Der Maximalwert liegt bei 418 (Quelle: eigener Entwurf).....	42
Abbildung 30: Gewichtung der Faktoren für die Gesamtvulnerabilität (Quelle: eigener Entwurf)	45
Abbildung 31: Ausschnitt der Gesamtvulnerabilität für den Wald (mit Standardisierung 1 bis 100; Quelle: eigener Entwurf).....	47
Abbildung 32: Verteilung der Klassen für die verschiedenen Standardisierungsmethoden (Quelle: eigener Entwurf)	49
Abbildung 33: Vergleich der Klassenverteilungen nach Standardisierungsmethode (Quelle: eigener Entwurf) ...	50
Abbildung 34: Schadflächen nach Klassen und Standardisierungsmethode (Quelle: eigener Entwurf).....	51
Abbildung 35: Vergleich des Schadens im gesamten Gebiet mit dem Schaden in den als stabil (1-3) und weniger stabil (4-5) eingestuften Gebieten (Standardisierungsmethode Normierung von 1 bis 100; Quelle: eigener Entwurf).	52
Abbildung 36: Vergleich der Klassifikation der Schadflächen bei unterschiedlicher Gewichtung der Kanten und des TOPEX (Quelle: eigener Entwurf).	53
Abbildung 37: Durch die Kleinstrukturiertheit des Waldes ergibt sich teils eine komplette Überlappung der Puffer von entgegengesetzten Himmelrichtungen (Quelle: eigener Entwurf).	54

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Schadholzanfall nach Windwurf und Windbruch in der Steiermark für 2013 bis 2017 (Quelle: Land Steiermark).....	6
Tabelle 2: Versuch der Klassifizierung der TOPEX-Werte (Quelle: Wilson 1984, 252).....	29
Tabelle 3: Gegenüberstellung der durchschnittlichen Werte von Schadflächen und dem restlichen Gebiet (Quelle: eigener Entwurf).....	43
Tabelle 4: Gegenüberstellung der durchschnittlichen Werte von Schadflächen und ihren nicht geschädigten Nachbarn (Quelle: eigener Entwurf)	44
Tabelle 5: Ausprägung der Parameter (Quelle: eigener Entwurf)	45

Formelverzeichnis

Formel 1: z-Standardisierung	46
Formel 2: Skalierung auf 0 bis 100	46

1 Einleitung und Problemstellung

Mit einer Waldbedeckung von 47,6% der Fläche zählt Österreich zu den Ländern mit dem höchsten Waldanteil in Europa (vgl. Sebauer 2013, 15ff und Russ 2011, 3). Innerhalb Österreichs weist die Steiermark mit 61,4% die höchste Waldbedeckung aller Bundesländer auf (vgl. Sebauer 2013, 15ff und Russ 2011, 3). Als Wald gilt in Österreich eine mit Bäumen bewachsene Fläche ab einer Größe von 1.000 m² und einer Durchschnittsbreite von 10 Metern (vgl. Sebauer 2013, 22). Der Waldanteil steigt, alleine seit Bestehen der Österreichischen Waldinventur (ÖWI) 1961 ist die Waldfläche in Österreich um 300.000 ha angewachsen (vgl. Russ 2011, 3). Die Zunahme ist nicht auf allen Höhenstufen und Hangneigungen gleich, am größten ist sie über 1800 m Seehöhe (sh. Abbildung 1).

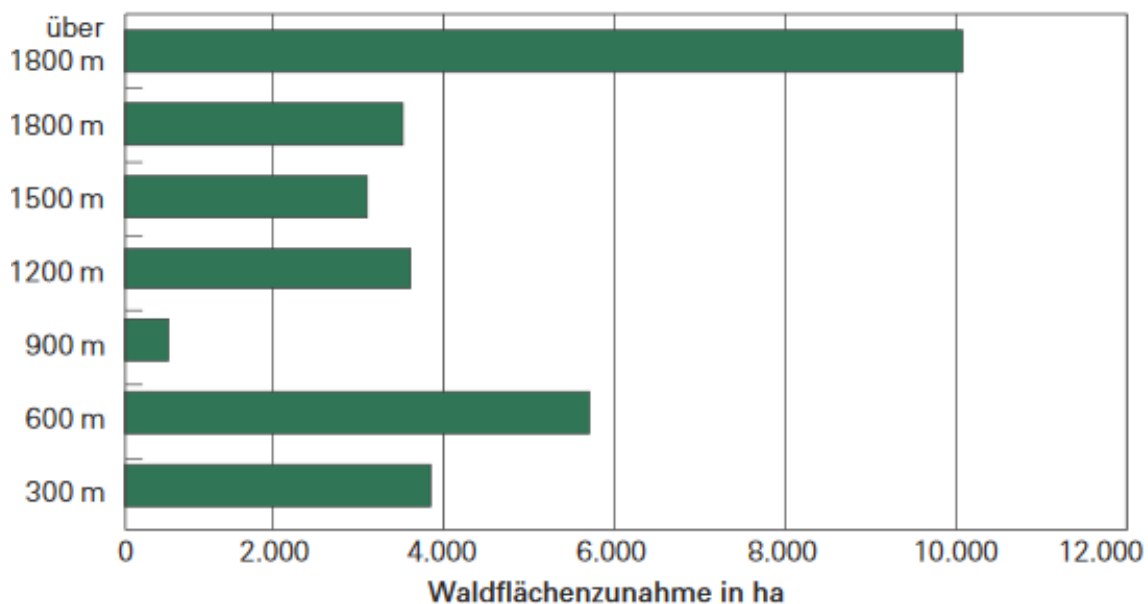


Abbildung 1: Waldflächenbilanz der Waldinventur 2007-2009 für die unterschiedlichen Seehöhenstufen (Quelle: Russ 2011, 4)

Der Wald ist Lebensraum für Tiere und Pflanzen sowie Erholungsraum für den Menschen. Die Wertstellung des Waldes in unserer Gesellschaft umfasst sowohl Schutz-, Erholungs-, Wirtschaftsfunktionen als auch ökologische Funktionen. In Österreich leben rund 300 000 Menschen vom Wirtschaftsfaktor Wald. Dieser Sektor, welcher von der Schlägerung bis zur Endverarbeitung reicht, ist für einen Produktionswert von jährlich 12 Milliarden Euro verantwortlich (Hausegger o.A.). Wald ist nicht nur für die Wirtschaft, sondern auch in seiner Funktion als Schutzwald relevant. Das Forstgesetz (§ 21 Forstgesetz 1975 idGF) unterscheidet dabei Standort- und Objektschutzwälder. Erstere sind Wälder, deren Standort durch die abtragenden Kräfte von Wind, Wasser oder Schwerkraft gefährdet ist und die eine besondere Behandlung zum Schutz des Bodens und des Bewuchses sowie zur Sicherung der Wiederbewaldung erfordern. Objektschutzwälder hingegen sind Wälder, die Menschen, menschliche Siedlungen bzw. Anlagen oder kultivierten Boden insbesondere vor Elementargefahren oder schädigenden Umwelteinflüssen schützen und die eine besondere Behandlung zur Erreichung und Sicherung ihrer Schutzwirkung erfordern. In der Steiermark beträgt der Schutzwaldanteil laut der Österreichischen Waldinventur (ÖWI 2007-2009)

172.000 ha bzw. 17 % der Gesamtwaldfläche (Amt der steiermärkischen Landesregierung 2016, 190).

Die Risiken für den Wald mit seinen Funktionen als Wirtschaftsfaktor, Erholungsraum usw. gliedern sich in abiotische und biotische Faktoren (vgl. Leibundgut 1985). Zu den abiotischen Schadfaktoren zählen Wind, Feuer, Dürre, Frost, Blitz, Schadstoffeintrag und Schnee. Zu den biotischen Schadfaktoren zählen Schadinsekten wie zum Beispiel der Borkenkäfer, Pilze oder Tiere. Der Schädigung durch abiotische Faktoren folgt oft auch eine Schädigung durch Lebewesen aufgrund der erhöhten Empfindlichkeit bzw. der erhöhten Verfügbarkeit von Material für Schadinsekten die in Holz oder Rinde brüten. Der Schaden im Wald schwankt jährlich und ist für Europa nach Störungsquellen in Abbildung 2 dargestellt. Der meiste abiotische Schaden wird durch Wind, der meiste biotische durch Borkenkäfer verursacht, weshalb diese zwei in der Abbildung getrennt von den restlichen abiotischen und biotischen Faktoren dargestellt wurden.

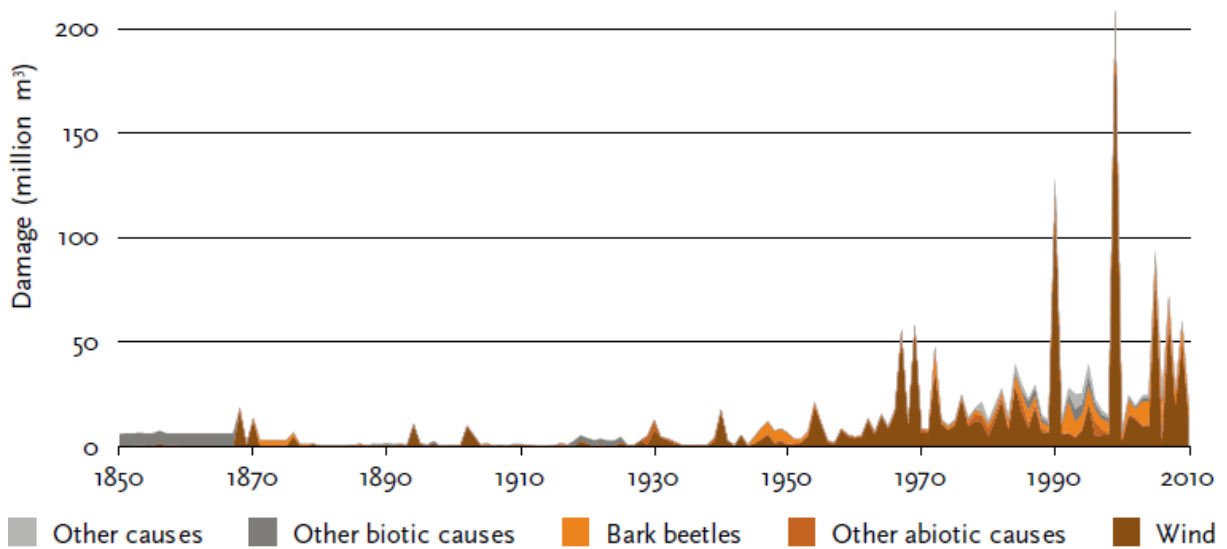


Abbildung 2: Gesamtschaden im europäischen Forst (in m^3) aufgrund unterschiedlicher Ursachen (in der Kategorie „other causes“ sind gemischte, nicht identifizierbare und anthropogene Störungen zusammengefasst; Quelle: Gardiner et al 2013a, 16 modifiziert von Schelhaas 2008)

In der Steiermark wurden zwischen 2013 und 2017 jährlich zwischen 191 220 und 851 100 Festmeter (fm) an Holz geworfen oder gebrochen (sh. Tabelle 1). 2017 betrug der Schaden somit 17% der durchschnittlichen jährlichen Erntemenge die in der Steiermark bei 5 Millionen Erntefestmetern liegt. Ein Schaden in dieser Größenordnung ist auch wirtschaftlich von Bedeutung. Aus diesem Grund ist es naheliegend, dass Waldbesitzer den Schaden gerne verhindern würden und eine flächendeckende Information über gefährdete Bereiche in den Waldgebieten von großem Informationswert ist.

Tabelle 1: Schadholzanfall nach Windwurf und Windbruch in der Steiermark für 2013 bis 2017 (Quelle: Land Steiermark)

Jahr	Festmeter
2013	428 300
2014	297 500
2015	493 660

2016	191 220
2017	851 100

2 Zielsetzung der Arbeit

Ziel dieser Arbeit ist es ein Modell zu entwickeln, um die Stabilität bzw. Vulnerabilität von Waldbeständen zu beurteilen. Dabei sollen folgende Forschungsfragen beantwortet werden:

- Welche Parameter sind für ein solches Modell entscheidend?
- Können diese Parameter aus Fernerkundungsdaten, im speziellen Laserscannerdaten, (automatisiert) abgeleitet werden?
- Ist eine Modellierung mit natürlichen Faktoren wie Windrichtung und Windgeschwindigkeit möglich?
- Ist es möglich, durch die Kombination dieser Parameter die Stabilität von Waldbeständen in Hinblick auf Windwürfe großflächig zu beurteilen?
- Wie kann das entwickelte Modell validiert werden und wie gut bildet es die Wirklichkeit ab?

3 Struktur der Arbeit

Die Vorgehensweise bzw. die Arbeitsschritte, die zur Erreichung der oben angeführten Zielsetzungen notwendig waren, sind in Abbildung 3 dargestellt. Die Identifikation der relevanten Faktoren erfolgt auf Basis einer Literaturrecherche und die Extraktion/ Berechnung der Faktoren wird durch die Datenverfügbarkeit bestimmt. Eine Standardisierung ist notwendig, da nicht alle Faktoren die gleiche Ausprägung haben und eine Gewichtung notwendig, weil nicht alle Faktoren die gleiche Erklärungskraft haben. Die berechnete Gesamtvulnerabilität wird mit Windwurfdaten validiert und das Modell so auf seine Relevanz getestet.



Abbildung 3: Arbeitsablauf zur Stabilitätsbeurteilung des Waldes (Quelle: eigener Entwurf)

4.1 Stürme in Europa

Stürme zählen zu den meteorologischen Naturgefahren. Sie gehören zu den Prozessen in der Atmosphäre mit dem höchsten Schadenspotential (Gebhardt et al 2011, 1122). In Zentraleuropa sind Stürme mit starken Winden entweder auf Gewitter, Föhnlagen oder intensive Tiefdrucksysteme zurückzuführen. Die betroffene Fläche ist bei Gewittern mit 2 bis 50 km² im Vergleich zu außertropischen Zyklonen mit einem Durchmesser von 1000 bis 3000 km verhältnismäßig klein (vgl. Schindler et al 2012, 57). Zyklone entstehen als Folge von großen Luftdruckgradienten unter Beteiligung großer Temperaturunterschiede zwischen der Warmluft der Subtropen und der polaren Kaltluft (vgl. Usbeck 2015, 184 und Gebhardt et al 2011, 1124). Die Luftdruckdifferenz ist dabei aufgrund der Strahlungs-, Temperatur- und Luftdruckverhältnisse im Winter potentiell viel größer als im Sommer. Daher ist das Auftreten europäischer Winterstürme auf die Monate Oktober bis März beschränkt. Beeinflusst wird die Luftdruckdifferenz auch durch die aperiodische Schwankung der Nordatlantischen Oszillation (NAO). Ist der NAO-Index hoch bzw. positiv, so wird die Entwicklung von außertropischen Sturmzyklonen bei Westwetterlagen wahrscheinlicher. (vgl. Gebhardt et al 2011, 280f). Tiefdrucksysteme können Zuggeschwindigkeiten von 1000 km pro Tag erreichen und bewegen sich damit schneller als tropische Wirbelstürme. Ein besonderes Merkmal ist auch die zeitliche Variabilität der Windgeschwindigkeit im Sekundenbereich. Die Böen, die oft ein Vielfaches der Durchschnittsgeschwindigkeit erreichen können, sind für Windschäden im besonderen Maße verantwortlich (Gebhardt et al 2011, 1125). Winterstürme haben aufgrund ihrer Intensität und Ausdehnung das größte Schadenspotential aller Naturrisiken für den europäischen Wald (Albrecht et al 2012, 229; sh. Abbildung 2).

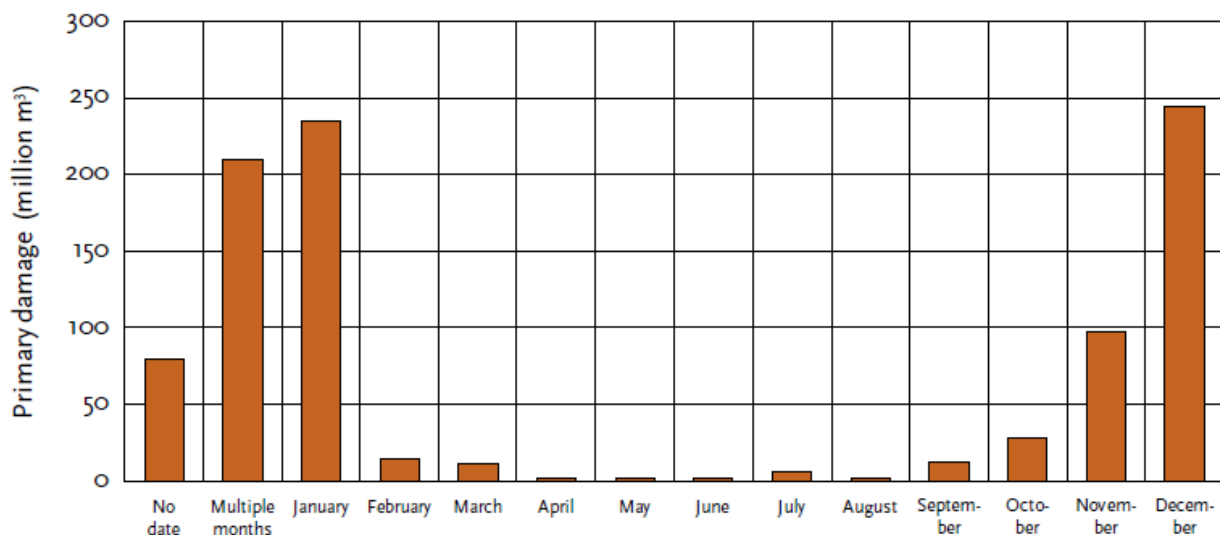


Abbildung 4: Sturmschaden in Europa gegliedert nach Monaten (Quelle: Gardiner et al 2013a, 18 modifiziert von Gardiner et al 2010)

In den 1990ern gab es ungewöhnlich viele Winterstürme; 1990 trat die erste Serie mit „Daria“, „Herta“, „Vivian“, und „Wiebke“ auf, 1999 folgten „Anatol“, „Lothar“ und „Martin“ (vgl. Gebhardt et al 2011, 280). All diese Winterstürme mit Ausnahme von Vivian zogen

dabei von Ost nach West (sh. auch Abbildung 5) und betrafen dabei großteils die Bereiche nördlich der Alpen (vgl. Usbeck 2015, 189). 26 Winterstürme mit mindestens 70 000 m³ Schadholz, waren zwischen 1865 und 2014 in der Schweiz zu verzeichnen (vgl. Usbeck 2015, 186). Usbeck (2015, 188) untersuchte die Entwicklung der Schäden durch Winterstürme in den letzten Jahrzehnten und vermutet, dass sie deutlich zugenommen haben, es könnte aber auch sein, dass es sich im Zeitraum von 1880 bis 1967 um eine Periode mit ungewöhnlich wenig Schäden handelte. Gardiner et al (2013, 24) kommen zu dem Schluss, dass es Hinweise einer zunehmenden Sturmintensität gibt sowie Zeichen, dass die Stürme tiefer und auf einem breiteren Streifen nach Kontinentaleuropa vordringen. In verschiedenen Klimamodellen wird für Deutschland von einer leichten Zunahme der durchschnittlichen Windgeschwindigkeit bis Ende des 21. Jahrhunderts ausgegangen, wobei im Sommer mit einer Abnahme gerechnet wird und die Zunahme nur dem Winter zugeschrieben wird (vgl. Gebhardt et al 2011, 323).

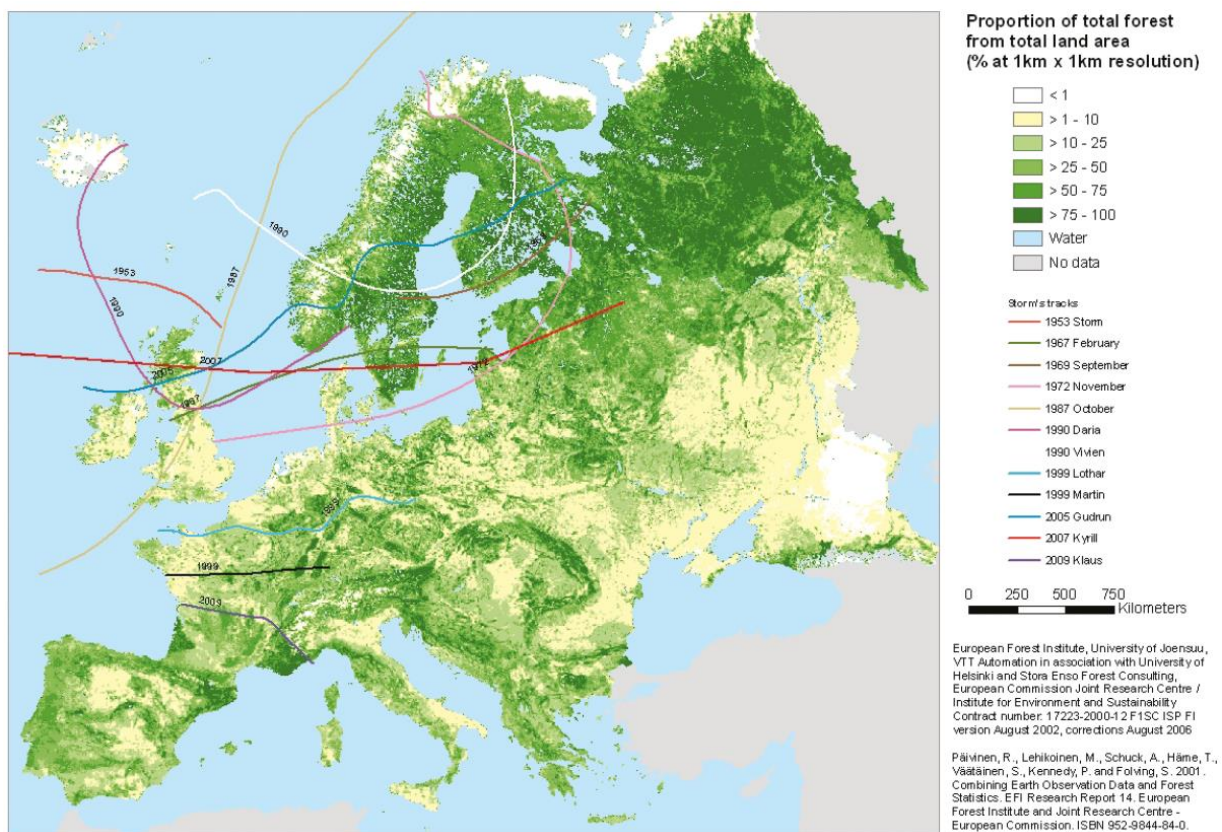


Abbildung 5: Zugrichtung von ausgewählten Tiefdruckgebieten (Quelle: Gardiner et al 2013a, 19)

Bei Gewittern kann man Wärmegewitter, Frontgewitter und orographische Gewitter unterscheiden (vgl. Klose 2008, 304f). Bei ersteren werden meist schwache bis mittlere Böen beobachtet, während vor allem bei Frontgewittern auch Böenfronten mit zerstörerischen Windböen eine Rolle spielen können. Wärmegewitter treten meist im Sommer auf, während Frontgewitter zu den Begleiterscheinungen intensiver Tiefdruckgebiete zählen und orographische Gewitter sich im Bergland bilden wenn Kaltluftmassen aufgrund des Geländes gezwungen werden aufzusteigen. Windböen treten im Reifestadium einer Gewitterzelle auf, wenn die Wasser- und Eispartikel bzw. Hagelkörner zu schwer werden, um mit dem Aufwind

in der Wolke nach oben bewegt zu werden und zu fallen beginnen. Das dann entstehende Kaltluftpaket beschleunigt sich abwärts, breitet sich beim Aufprall horizontal aus und bildet Turbulenzwirbel in der Zugrichtung (vgl. Klose 2008, 298, sh. Abbildung 6). Ist die Wolkenbasis des Gewitters höher, so sind auch die Böen stärker ausgeprägt. Liegt bei Tiefdruckgebieten die Windrichtung durch die Zugrichtung meist zwischen West- und Nord, so kann das bei Wärmegewittern nicht eindeutig gesagt werden.

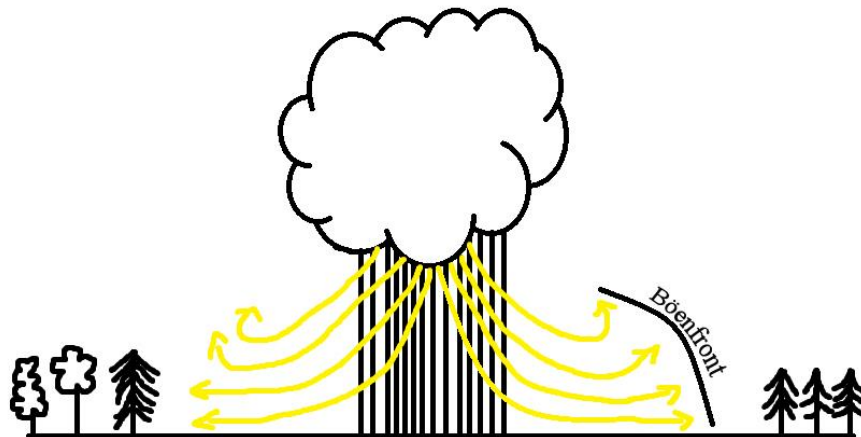


Abbildung 6: Schematische Darstellung des Windes bei Gewittern mit der Böenfront (Quelle: eigener Entwurf)

Beim Föhn handelt es sich um einen warmen Fallwind, der als Nord- oder Südföhn in den Alpen auftritt. Damit eine Föhnwetterlage eintritt, muss es einen großen Luftdruckgradienten zwischen den Luftmassen nördlich und südlich der Alpen und eine damit verbundene Luftströmung orthogonal zum Alpenhauptkamm geben (vgl. Gebhardt et al 2011, 277). Bei Südföhn gibt es südlich des Alpenhauptkamms kräftige Niederschläge während es im Norden aufgelockert und warm ist, der Wind weht in diesem Fall von Süd nach Nord. Bei Nordföhn stauen sich die Wolken an der Alpennordseite, wo die Niederschläge aber nicht so intensiv ausfallen wie bei Südföhn und der Wind weht von Nord nach Süd (vgl. Meteo Schweiz 2015, 21). Der Wind kann bei Föhnlagen am Alpenhauptkamm Geschwindigkeiten über 180 km/h und in den typischen Föhntälern über 130 km/h erreichen (vgl. Meteo Schweiz 2015, 19). Die Föhnkonstellation kann einige Stunden bis mehrere Tage andauern und dabei unterschiedlich stark ausgeprägt sein (vgl. Meteo Schweiz 2015, 21). Generell sind die Bäume, die in typischen Föhntälern wachsen, durch die Häufigkeit von Föhnlagen an den Wind gewöhnt, trotzdem können Extremereignisse, und da vor allem Böen, Schaden anrichten.

Die Sturmstärke wird in der Stärke der höchsten Böen, die 3 Sekunden lang andauern, angegeben. Allerdings richten nicht alle starken Stürme Schäden im Wald an und nicht aller Schaden wird durch starke Stürme verursacht (Gardiner et al 2013, 25). Laut Schütz et al (2006, 292) ist es unmöglich, das genaue Muster der Windgeschwindigkeiten, im Besonderen das Auftreten und die zeitliche und räumliche Variabilität von schadbringenden Windböen zu bestimmen. Durch das Fehlen eines dichten Netzes an Messstationen ist immer noch unklar, ob die große räumliche Variabilität von beobachtetem Schaden auf die

zeitliche Dimension oder die räumliche Struktur des Windfeldes zurückzuführen ist (Schütz et al 2006, 292).

4.2 Sturmschäden in den Alpen

Der Schaden bei katastrophalen Sturmereignissen reicht bei variierender Ausdehnung und unterschiedlichen räumlichen Mustern vom Einzelbaum bis zur Zerstörung von ganzen Beständen. Das räumliche Muster und die Schwere des Schadens wird dabei nicht nur vom sturmspezifischen Windfeld, sondern auch von Bodeneigenschaften, Baum- und Bestandscharakteristiken, Topographie, waldbaulicher Behandlung und vorhergegangenen Störungen an einem bestimmten Ort beeinflusst (Schindler et al 2012, 57). Wie Abbildung 7 zeigt, treten verstärkt Spitzen des durch Wind geschädigten Holzvolumens seit 1990 auf. Gleichzeitig hat seit 1950, vor allem aber seit 1980 das Holzvolumen der Wälder stark zugenommen. Bebi et al (2017, 51) führen zumindest einen Teil des zugenommenen Schadens auf diese Zunahme des Holzvolumens zurück. Sie argumentieren, dass historische Landnutzung und Management, zumindest in den Alpen, zum Teil die Effekte von Störungen durch Wind heruntergesetzt haben. Damit meinen sie einerseits, dass exponierte ehemals beweidete Flächen jetzt bewaldet sind und andererseits, dass Holz seine Bedeutung als Heizmaterial verloren hat. Letzteres hat zur Folge, dass die Wälder in den Alpen überaltern und dadurch anfälliger sind gegenüber Windwurf und Windbruch. Auch Usbeck et al (2009, 356) merkten an, dass Wälder heutzutage anfälliger für Stürme sind, einfach weil sie mehr Holzvolumen haben (sh. Abbildung 7).

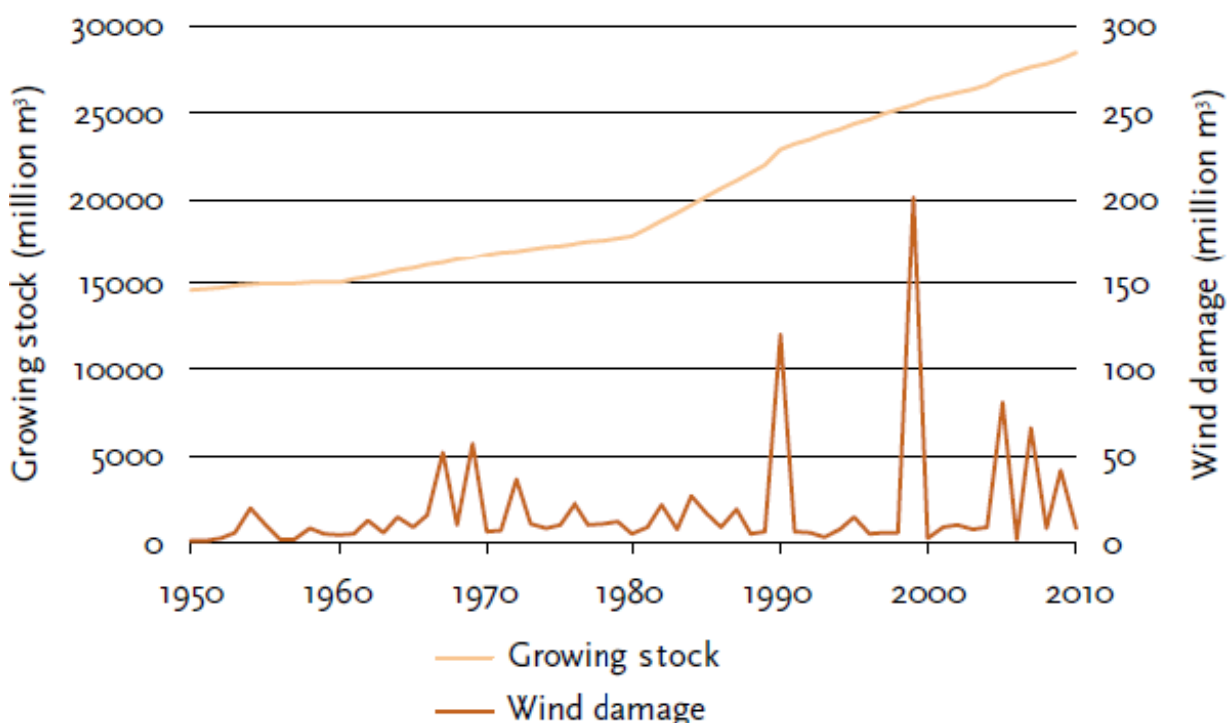


Abbildung 7: Entwicklung von Holzvorrat im Wald in Relation zu Schaden durch Wind in Europa (Quelle: Gardiner et al 2013a, 17)

Wie bereits in der Einleitung erwähnt, hat die Waldfläche in Österreich seit 1961 um mehr als 300 000 ha zugenommen (vgl. Russ 2011, 3). Diese Zunahme ist nicht auf Österreich

beschränkt, sondern im gesamten Alpenraum zu beobachten. Die Zunahme ist nicht auf allen Höhenstufen und Hangneigungen gleich. So ist die Zunahme über 1800 m Seehöhe in Österreich am größten (sh. Abbildung 1) und in den Schweizer Zentralalpen wurden über 90% der Zunahme der Waldfläche seit 1880 bei einer Hangneigung von über 30° beobachtet (vgl. Bebi et al 2017, 49). Erklärt wird diese Zunahme nicht durch ein Ansteigen der Waldgrenze, sondern vielmehr durch das Wiederbewalden von schwer zu bewirtschaftenden, steilen Flächen (sh. Abbildung 8).



Abbildung 8: Waldzunahme am Eingang des Dischma- und des Flüelatal, Davos, Schweiz. Vergleich von 1900 (links) mit einer Aufnahme von 2010 (Quelle: Bebi et al 2017, 45).

Das Ausmaß der Schäden, die der Wind in einem Bestand verursacht, variiert und beeinflusst die wirtschaftlichen Konsequenzen für den Waldbesitzer. Bei einem Schädigungsgrad von unter 10% besteht wenig Notwendigkeit für sofortige Maßnahmen, ab einem Schädigungsgrad von 30% bis 40% wird normalerweise die ganze Fläche von den Besitzern geschlägert und wieder aufgeforstet (vgl. Gardiner et al 2013, 38). Sind die Störungen durch den Wind kleinräumig, können sie einen positiven Einfluss auf die biologische Diversität haben und gleichzeitig ist der wirtschaftliche Schaden für den Waldbesitzer nicht zu hoch (vgl. Gardiner et al 2013, 21).

Im Wald sind zusätzlich zu den direkten Windschäden auch die primären Folgewirkungen wie Bodenerosion, Borkenkäferbefall und Befall durch andere Holzschädlinge sowie die sekundären Folgen wie sinkender Wasserhaushalt und Bodenverdichtungen in der Aufarbeitung nach einem Sturm durch die Verwendung von schweren Maschinen zu beachten (vgl. Saidani 2004, 17). Schäden beeinflussen das Landschaftsbild und können die wirtschaftliche Basis für private Forstbesitzer zerstören und den Holzmarkt und die holzverarbeitenden Industrien über längere Zeit massiv beeinflussen (vgl. Gardiner et al 2013, 21). Großmaßstäbige Störungen im alpinen und hochalpinen Wald sind besonders relevant, da die Schutzwirkung der Wälder beeinträchtigt wird (vgl. Brang et al 2006, 28). Die 17 % des Waldes, die in Österreich als Schutzwälder ausgewiesen sind, schützen vor alpinen Naturgefahren wie Hochwasser, Muren, Lawinen, Hangbewegungen und Steinschlag (vgl. Sebauer 2013, 22). Die Kleinstrukturiertheit der alpinen und hochalpinen Wälder, die kleinmaßstäbigen Variabilität der Standortbedingungen und die sich daraus ergebenden

Zusammensetzung der Baumarten und Wuchsstadien erhöht die Widerstandsfähigkeit und macht großmaßstäbige Schäden selten (vgl. Brang et al 2006, 27).

Wie gut ein Waldbestand mit Schwankungen der Umweltbedingungen und Störungen umgehen kann, hängt von eben dieser Resilienz, also Widerstandsfähigkeit ab. Das Schadensrisiko bzw. die Eintrittswahrscheinlichkeit beschreibt das Risiko, dass ein Baum einer Störung durch Wind, Schneedruck, Frostsprengung oder dergleichen nicht standhält und geworfen, umgedrückt, entwurzelt oder abgebrochen wird. Die Resilienz des Ökosystems gegen Schwankungen der Umweltbedingungen ist umso größer, je feiner und rascher Umstrukturierungen in der einen Richtung durch Gegenwirkungen aus der anderen aufgefangen und ausgeglichen werden können (Leibundgut 1975, 14). Vorangegangene Schäden setzen die Widerstandsfähigkeit dabei meist herab und machen den Wald verwundbarer. Wie von Seidl (2017, 10) hervorgehoben, ist das traditionelle Risikomanagement auf Vermeidung von Schäden ausgerichtet. Er betont, dass auch Maßnahmen, welche die raschere Erholung nach einem Ereignis fördern, nicht vernachlässigt werden dürfen. Ziel ist es die Widerstandsfähigkeit des Waldes in jeder Hinsicht zu stärken und nicht nur Störungen durch Waldbau zu unterbinden.

4.3 Faktoren für erhöhte Gefährdung bei Sturm

In diesem Kapitel werden Ergebnisse von verschiedenen Autoren in Bezug auf Sturmgefährdung und die Faktoren die diese beeinflussen, dargestellt. Teilweise decken sich die Ergebnisse, manchmal widersprechen sie sich aber auch. Die unterschiedliche Bewertung der Faktoren liegt sicher zum Teil an den unterschiedlichen Standorten und der jeweiligen Baumartenverteilung in den Testgebieten, in denen die Untersuchungen stattgefunden haben. Dieses Kapitel bildet die Grundlage für die Auswahl der Faktoren für das in dieser Arbeit entwickelte Modell.

Grob können bei den Eigenschaften, die Wälder anfälliger für Schaden machen, Standortfaktoren, Bestandsfaktoren, Einzelbaumfaktoren und externe Faktoren unterschieden werden. Während die Bestandsfaktoren dynamischen Prozessen unterliegen, die vom Menschen direkt beeinflusst werden können, sind die Standortfaktoren eher statischer Natur (Götz und Schmidtke 2006, 41), wobei Gardiner et al (2013a, 38) anmerken, dass Bestandsparameter mehr Einfluss zu haben scheinen als die Standortfaktoren. Durch forstwirtschaftliche Maßnahmen kann der Mensch auf alle Faktoren, außer den Externen, direkt oder indirekt Einfluss nehmen. Langfristig bestimmen unter anderem die Wahl der Baumarten und das Baumalter beim Schlägern die Risikodisposition eines Waldbestandes (vgl. Albrecht et al 2012, 230). Die getroffene Gliederung bedeutet nicht, dass Faktoren der einzelnen Kategorien nicht miteinander in Wechselwirkung stehen. So hat zum Beispiel die Durchforstungsgeschichte und die Vertikalstruktur eines Waldes Einfluss auf den h:d Wert (Verhältnis Baumhöhe zu Brusthöhendurchmesser) der Einzelbäume.

4.3.1 Einzelbaumfaktoren

Die Baumhöhe wird als wichtiger wenn nicht wichtigster Faktor für die Vulnerabilität genannt (vgl. Gardiner et al 2013, 4 und Hale et al 2015, 28/37). Dies geht Hand in Hand mit dem Ergebnis von Suvanto et al (2016, 23), bei denen die Sturmschadenswahrscheinlichkeit bei allen Baumarten mit Bestandsalter zunahm. Generell sind niedrigere Bäume resistenter gegenüber Störungen wie Sturm oder Schneelast (Brang et al 2006, 28). So wurde in Séez, Frankreich bei Fichten unter 14m Höhe kein Schaden gefunden und unter 16m kein Entwurzeln festgestellt (vgl. Ancelin et al 2004, 115). Beim Blick auf Bestände stellte Saidani (2004, 129) fest, dass Bestände ab einer Baumhöhe von 25,5 m in seinen beiden Untersuchungsgebieten im Schwarzwald, Deutschland von Sturmschäden stark betroffen waren. Laut Ancelin et al (2004, 115f) steigt das Risiko für Schaden stärker mit der Baumhöhe als mit der Windgeschwindigkeit und die Stammbruchwahrscheinlichkeit ist höher bei größerem Schlankheitsgrad (h:d Wert). Schütz et al (2006, 299) fand jedoch im Vergleich mit anderen Faktoren nur einen vernachlässigbaren Einfluss des h:d Wertes, auch Indermühle et al (2005, 10) schreibt der Baumform nur eine geringe Erklärungskraft zu. Allerdings sind Bestände mit einem niedrigen h:d Verhältnis nach einer Durchforstung anfälliger für Sturm ebenso wie nie durchforstete Bestände mit hohem Schlankheitsgrad (sh. Kapitel 4.3.2). Nadelbäume scheinen gefährdeter, vor allem bei Winterstürmen (vgl. Gardiner et al 2013a, 38). Schmoeckel (2005, 18-19) fand heraus, dass Laubbäume sogar belaubt sturmfester sind als Nadelbäume und der Vorteil im Winter, wenn die Laubbäume kahl sind, sich noch deutlicher zeigt.

4.3.2 Bestandsfaktoren

Mehrere Einzelbäume ähnlicher Höhe und Struktur bilden einen Bestand. Die Abgrenzung ist dabei nicht eindeutig und die Grenzen zwischen Beständen teils fließend. In verschiedenen Untersuchungen und Projekten wurde eine ganze Reihe von Parametern identifiziert, die einen Bestand anfälliger oder weniger anfällig für Windschaden machen: Zumindest bei Winterstürmen senkt eine Buchenbeimischung von 10%-20% in der Oberschicht die Empfindlichkeit erheblich (vgl. Indermühle et al 2005, 10). Schütz et al (2006, 301) identifizierten die Unterstützung der Mischung von Beständen generell als ein gutes Mittel. Bei Reinbeständen wurden bei „Lothar“ 1999 reine Nadelholzbestände viel häufiger geschädigt als reine Laubholzbestände, auch weil es sich um einen Wintersturm handelte (Indermühle et al 2005, 9). Quine et al (1995, 9) fand, im Widerspruch dazu, dass, wenn Laubbäume unbelaubt sind, die Windgeschwindigkeit im Kronendach zunimmt, weil der Wind nicht durch die Belaubung am Eindringen gehindert wird. Dies stellt für die Laubbäume kein Problem dar, da sie unbelaubt kaum Angriffsfläche bieten, die Windlast für benachbarte Nadelbäume kann sich dadurch aber erhöhen. Damit widersprechen sich die Ergebnisse von Quine et al (1995) und Indermühle et al (2005) in diesem Punkt.

Bei der Vertikalstruktur des Waldes, der Gliederung nach der Baumhöhe, sind sich die verschiedenen Autoren nicht einig. Während Gardiner et al (2013, 4) der vertikalen Struktur eines Waldes wenig Einfluss auf die Stabilität zuschreiben, fanden Hanewinkel et al (2014, 531), dass die vertikale Bestandsstruktur bei einer unterschiedlichen Altersstruktur einen wichtigen Einfluss auf den Sturmschaden hatte. Dvořák et al (2001, 447) fanden in ihrem Untersuchungsgebiet am südwestlichen Rand des Emmentals in der Schweiz, dass Plenterwald, also ein Wald mit mehrstufigem Aufbau und natürlicher Verjüngung im Schutze des Oberbestandes, am wenigsten vom Sturm Lothar betroffen war. Beim Vergleich der Resultate aus den flächenbezogenen Erhebungen zeigte sich, dass im gleichförmigen Wald der Anteil der Totalschadenfläche (Schadenintensität 70–100%) gut drei Mal grösser war als im plenterartigen Wald. Gerade umgekehrt ist das Verhältnis bei den schadenfreien Flächen (Schadenintensität <5%). Allerdings war die Fläche der gleichförmigen Bestände im Untersuchungsgebiet relativ klein.

Einige Untersuchungen stellten eine temporäre Destabilisierung bei waldbaulichen Eingriffen fest (u.a. Gardiner et al 2013a, 41). Je nach Autor (Indermühle et al 2005, 10; Hanewinkel et al 2014, 532; Suvanto et al 2016, 23; Quine et al 1995, 9) wird Eingriffen in den fünf, acht bis zehn vorhergehenden Jahren nachgesagt, dass sie die Anfälligkeit erhöhen, dies aber abhängig von Stärke. Gleichmäßigkeit der Intervention in der gesamten Durchforstungsgeschichte des Bestandes ist aber günstiger als starke Eingriffe in größeren Zeitabständen. Grösser scheint das Risiko auch in lange nicht gepflegten Beständen zu sein. Sinnvoll und notwendig dürften regelmäßige Eingriffe mit Umlaufzeiten zwischen etwa acht und maximal 15 Jahren sein (vgl. Dvořák et al 2001, 451). Empfohlen werden dabei mittlere Eingriffsstärken, diese lagen in der erwähnten Untersuchung bei 70 bis 150 Silven (= Stehendmass geschätzter Kubikmeter), da sie die geringsten Schäden zur Folge hatten, unabhängig vom Zeitpunkt des Eingriffs vor dem Sturm.

Doch nicht nur Eingriffe durch den Menschen, sondern auch eine Vorschädigung der Bäume durch Krankheit, Insektenbefall, Wind oder Schnee spielt eine Rolle (vgl. Schmoeckel 2005, 18f; Pasztor et al 2015, 11; Suvanto et al 2016, 23; sh. Abbildung 9). Der Zusammenbruch eines Baumes verändert das Windregime für all seine Nachbarn und kann sie so verwundbarer für Schaden machen. Aus diesem Grund erhöht Sturmschaden in den Nachbarbeständen die Wahrscheinlichkeit für Sturmschaden innerhalb eines Bestandes (Gardiner et al 2013a, 43 und Hanewinkel et al 2014, 529). Schaden ist auch dann wahrscheinlicher, wenn das Fällen von benachbarten Beständen, der Bau von Straßen oder eben ein vorhergegangener Windwurf einen Düseneffekt in die Ecke eines Schlägerungsbereiches zur Folge hat, wo der Wind zwischen Waldblöcken durchgequetscht wird (vgl. Gardiner et al 2013a, 37). Dies gilt während des Sturms, aber auch für die darauffolgenden Jahre, da ein Baum Zeit braucht, um sich an geänderte Windbedingungen anzupassen. Dies

geschieht durch adaptives Wachstum, wobei noch nicht erforscht ist, wie lange Bäume dafür brauchen (vgl. Gardiner et al 2013a, 34). So hatten Bestände, die bereits durch „Vivian“ geschädigt worden waren, eine Wahrscheinlichkeit von 2/3 auch von „Lothar“ geschädigt zu werden, während die Wahrscheinlichkeit für den Rest der Bestände nur bei 1/3 lag (vgl. Dobbertin 2002, 194).



Abbildung 9: Die gekippten Baumstümpfe im Vordergrund sind Zeugen eines vorangegangenen Windwurfs der dem Bestand im Hintergrund einen offenen Stammraum beschert hat, in den der Wind ungehindert eindringen kann (Weitentalgraben, St. Stefan ob Leoben, Steiermark; eigene Aufnahme 22.01.2018)

Freistehend wachsende Bäume sind stabiler, da sie an häufig wechselnde Belastungen angepasst sind. Sie müssen nicht um Licht und Nährstoffe kämpfen und durch das verstärkte sekundäre Dickenwachstum ist ihr h:d Verhältnis niedriger. Daher weisen kleinere Gruppen und Waldränder eine höhere Stabilität auf (vgl. Schmoeckel 2005, 18-19). Bis zu einem gewissen Grad scheint sich aber auch eine höhere Bestandsdichte positiv auszuwirken, denn das Ineinanderweben der Wurzeln kann zusätzliche Stabilität geben, weil es jedem Baum eine viel größere effektive „Wurzelplatte“ verleiht (Gardiner et al 2013a, 37). Generell ist die Windbelastung in der Nähe der Waldkante am höchsten. Diese Belastung ist allerdings abhängig von der Traufkante, die je nach Ausprägung von unterschiedlichen Spezies gebildet wird. Wenn vor dem Bestand keine niedrigeren Bäume und Sträucher zu finden sind, liegt der Winkel um 90° und der Wind kann relativ ungehindert in den Stammraum eindringen (sh. Abbildung 10). Je mehr Spezies, also Sträucher und niedrigere Bäume einem Bestand vorgelagert sind, desto geringer ist der Traufkantenwinkel. Damit hat der Wind weniger Möglichkeiten in den Bestand einzudringen. Zusätzlich zum Waldrand können auch Höhenunterschiede zwischen Beständen, die auch als Kanten bezeichnet werden, das Eindringen des

Windes in den Wald fördern. Oder in anderen Worten, auch die Höhe des in Windrichtung vorgelagerten Nachbarbestandes beeinflusst das Ausmaß der Sturmschäden (Indermühle et al 2005, 10).



Abbildung 10: Schematischer Querschnitt des Waldrandes mit unterschiedlichen Traufkantenwinkeln, der Wald schließt jeweils nach rechts an (Quelle: eigener Entwurf)

Olofsson und Blennow (2005, 89) bezeichneten Bestände, die mindestens 10 m höher sind als der benachbarte Bestand, als exponiert, während Sommerville et al (1989, 38) bereits bei 5 m Höhenunterschied von exponierten Kanten ausgehen. Bei stufigen Waldanordnungen, i.e. niedrigem Traufkantenwinkel, zeigt sich stromab der inneren Waldkanten ein tendenziell ähnlicher Biegemomentverlauf wie bei frei angeströmten externen Waldkanten, wenn die luvseitige Waldfläche niedriger ist als die leeseitige (Mayer et al 2010, 102f). Beim Biegemoment handelt es sich um das Drehmoment, welches aus der Biegung von Stäben, bezogen auf die neutrale Faser, entsteht (Lexikon der Physik). Das Drehmoment wiederum ist das Moment der an einem Massepunkt angreifenden Kraft bezüglich des festen Ursprungsortes des Systems (Lexikon der Physik). Einfach gesagt beschreibt der Biegemomentverlauf eines Baumes, wann er sich wie weit wohin biegt.

Mayer et al (2010) testeten mit einem dynamischen Waldmodell im Windkanal die Auswirkung der Waldstruktur auf die Strömung. Es wurde dabei mit Szenarien für unterschiedliche Bestandsdichten, für die Hintereinanderschaltung von Beständen mit unterschiedlicher Dichte, für unterschiedliche Traufkantenwinkel und für Waldanordnungen mit Lichtungen experimentiert. Dabei fanden sie heraus, dass der anströmende Wind bei einem lichten Kronendach tiefer in das Bestandsinnere eindringt. Aus diesem Grund müssen Bäume in aufgelockerten Beständen höhere Windlasten ertragen (vgl. Mayer et al 2010, 73). Bäume, die immer in lockeren Beständen standen, haben allerdings eine entsprechende Stammform und sind gegenüber Sturmgefahren resistenter. Bei einem dichten Bestand sind die Belastungen im Bereich der Kante höher, wobei die Belastung des Kronendaches auch vom Traufkantenwinkel abhängig ist. Besonders wirkungsvoll für eine

Windberuhigung sind niedrige Zweige und Äste, weniger effektiv dagegen wenige und starke Stämme. Das bedeutet, dass die Windgeschwindigkeit in Dickungen rascher abnimmt, als in alten Beständen (vgl. Mayer 1985, 171). In einem weniger dichten Wald wird die Windgeschwindigkeit nicht so stark und schnell herabgesetzt.

In Abbildung 11 wird der Verlauf der Windbelastung in unmittelbarer Kronendachnähe bei einem lichten Waldbestand mit unterschiedlichen Traufkantenwinkeln dargestellt. Um die Auswirkungen des Traufkantenwinkels zu testen, wurde der Wald im Windtunnel einmal mit Kanten aus Einzelbäumen und einmal mit Schaumstoffkanten versehen. Bei beiden Kantenarten wurden verschiedene Traufkantenwinkel und ihre Auswirkungen getestet. Mit zunehmendem Traufkantenwinkel nimmt sowohl die mittlere als auch die maximale Windbelastung in unmittelbarer Kronendachnähe über dichten Beständen mit Einzelbaumkanten leicht ab und das Verhältnis der maximalen zur mittleren Windbelastung steigt leicht an (Mayer et al 2010, 81).

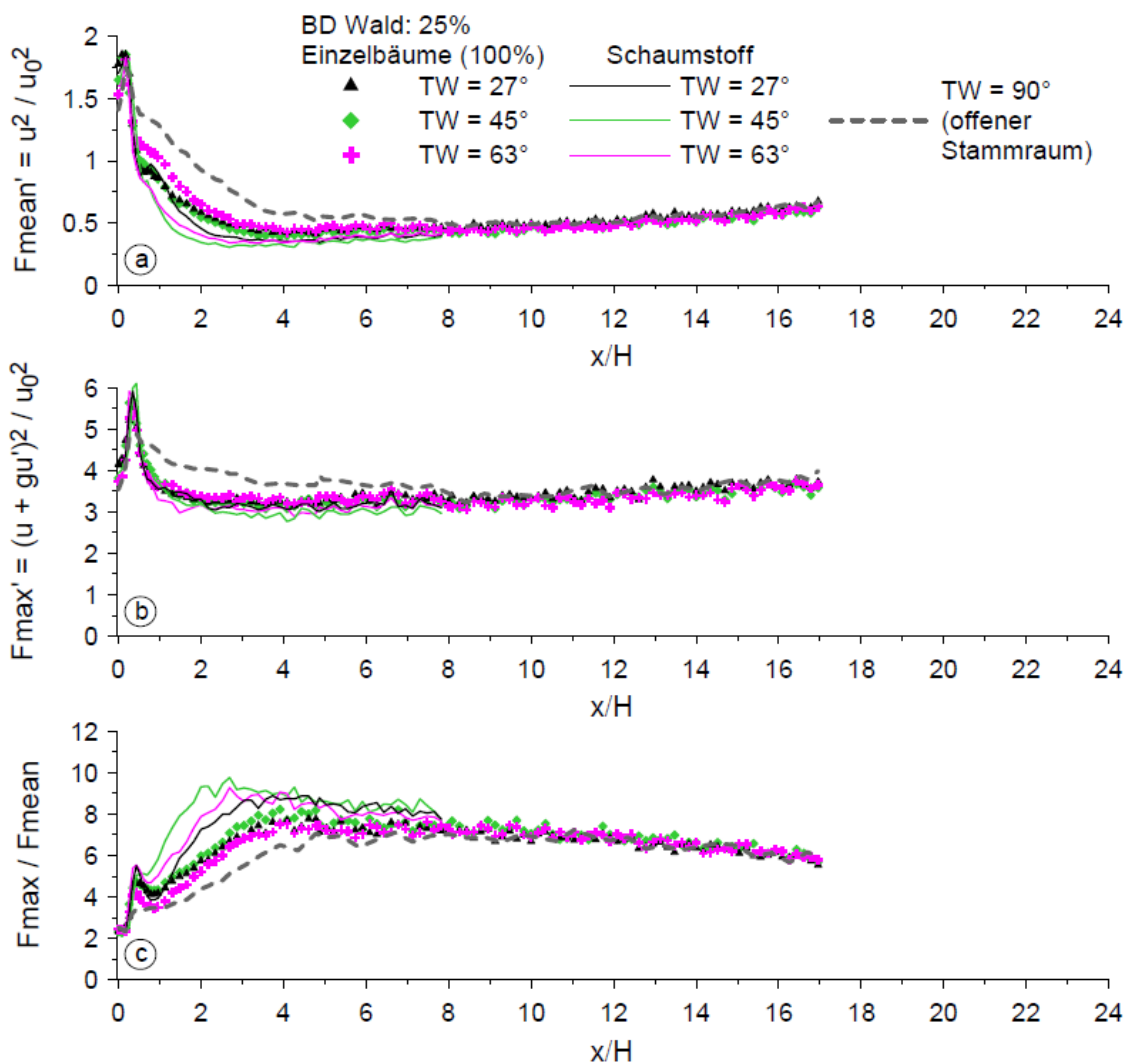


Abbildung 11: Verlauf der Windbelastung in unmittelbarer Kronendachnähe ($z/H = 1.13$) von lichten Waldbeständen (BD25) mit unterschiedlichen luvseitigen Traufkanten: a)

mittlere Windbelastung F_{mean} , b) maximale Windbelastung F_{max} , c) Verhältnis maximale zur mittleren Windbelastung F_{max}/F_{mean} ($g = 3.5$, $u_0 = 5.4$ m/s), auf der y-Achse ist der Abstand von der Waldkante als Verhältnis zur Baumhöhe aufgetragen (Quelle: Mayer et al 2010, 83)

Bei Beständen ohne vorgelagerte Bäume und Sträucher waren die mittleren und maximalen Baumauslenkungen größer als bei Beständen mit vorgelagertem Trauf, egal wie groß der Traufkantenwinkel war (vgl. Mayer et al 2010, 90, sh. Abbildung 11). Das bedeutet auch, dass sowohl die mittlere horizontale Geschwindigkeit, als auch die turbulente kinetische Energie und damit einhergehend auch die mittlere und maximale Windbelastung im Bestand bei einer geneigten Kante deutlich geringer sind als bei einem offenen Stammraum (Mayer et al 2010, 84). Niedrige Waldbestände schützen somit unmittelbar stromab angeordnete höhere Waldbestände vor starker Windbelastung. Dieser Unterschied ist in Abbildung 11 im Szenario a und b am Abstand der graugestrichelten Linie zu all den anderen Linien erkennbar. Diese Differenz in der mittleren und maximalen Windbelastung zeigt sich im Abstand von einem halben bis acht Baumhöhen von der Kante, dann gleichen sich die Werte der Szenarien an. Das bedeutet, dass sich der Traufkantenwinkel vor allem auf die Windbelastung bis zu acht Baumhöhen hinter der Kante einen großen Einfluss hat. Aufgrund dieser Winddynamik sind Auslichtungen bei dichtem Wald, vor allem in Kantennähe, vorsichtig zu handhaben, da hier die größte Zunahme bei der mittleren und maximalen Windbelastung zu erwarten ist (vgl. Mayer et al 2010, 79-80).

Somerville (1980, 484), Somerville et al (1989, 44) und Mayer et al (2010, 92) zeigten mit ihren Arbeiten, dass sich Windschäden im Bereich der ersten 100 - 200 m stromab von exponierten Bestandskanten konzentrieren (sh. Abbildung 12). Unterschiede, wo die Schäden jeweils auftreten, gibt es je nach Alter der Bäume. Bei jungen Beständen wirft der Wind oft auch die Randbäume, welche bei älteren Beständen stehen bleiben, auch wenn die Bäume dahinter fallen. Dieses Phänomen ist wahrscheinlich Folge des adaptiven Wachstums der Bäume an den Rändern (vgl. Mayer et al 2010, 92 und Somerville et al 1989, 44). Auch Lücken und Lichtungen haben Einfluss auf die Biegemomente der umliegenden Bäume. Mayer et al (2010, 97) zeigten, dass das mittlere Biegemoment bei kleinen Lichtungen annähernd linear mit der Lichtungslänge zunimmt und sich dann einem konstanten Wert annähert. Das bedeutet, dass Lichtungen, die in die betrachtete Windrichtung eine große Länge aufweisen, nicht automatisch zu hohen Biegemomentbelastungen an der luvseitigen Waldkante der stromab gelegenen Waldfläche führen (Mayer et al 2010, 99).

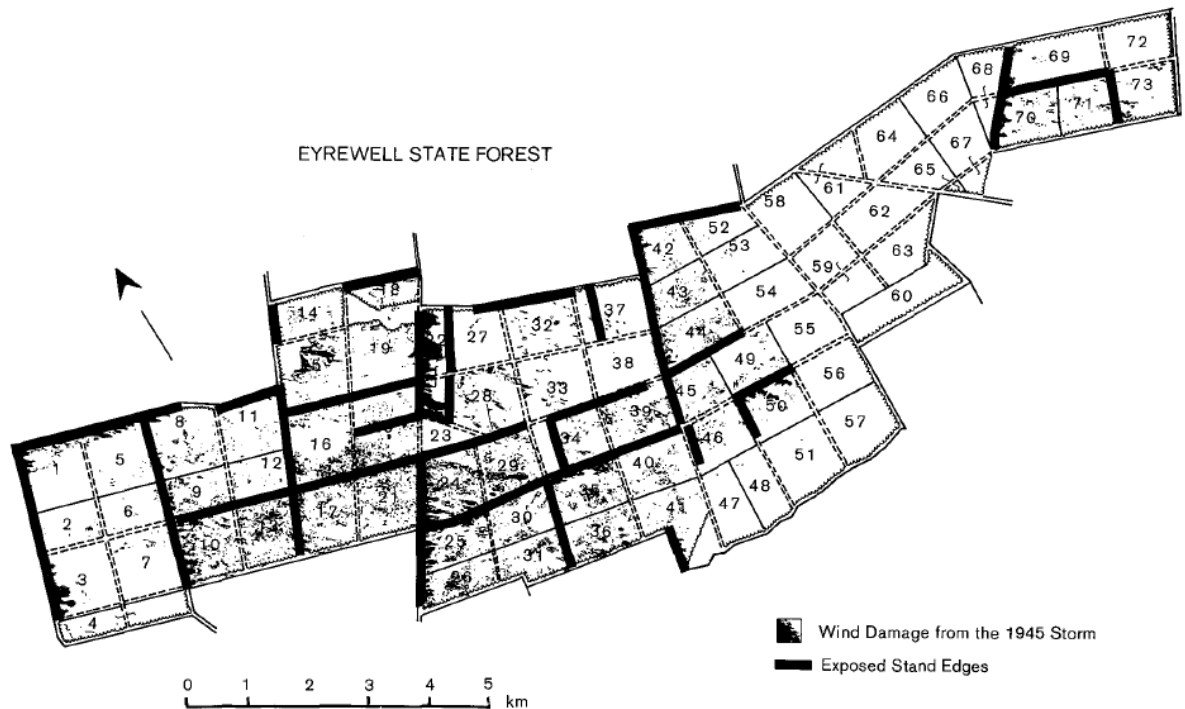


Abbildung 12: Windschaden durch einen Sturm 1945 in Neuseeland, die Schadflächen liegen vor allem hinter exponierten Bestandsrändern (Quelle: Sommerville et al 1989, 49)

4.3.3 Standortfaktoren

Standortfaktoren sind statisch und können vom Menschen nicht oder nur indirekt über angepasste Nutzung beeinflusst werden. Generell sind tief verwurzelte Bäume besser verankert und alle Faktoren, welche die Wurzelungstiefe herabsetzen, können das Windschadenrisiko erhöhen (vgl. Gardiner et al 2013a, 43). Grundsätzlich weniger Halt haben Bäume an stark wasserbeeinflussten Standorten, wo sie nur flach wurzeln, außer es handelt sich um an feuchte Böden angepasste Baumarten, die Brettwurzeln bilden und so ihre Standfestigkeit erhöhen (vgl. Schmoeckel 2005, 18-19). Die Stärke der Verwurzelung wird durch gefrorenen Boden erhöht und durch schlechte Drainage, die die Vernässung des Bodens während des Sturmes begünstigt, herabgesetzt (Gardiner et al 2013, 5). Anfällig für Vernässung sind skelettarme Böden mit überwiegend feinen Bodenarten (wie Schluff oder Ton) während grobskelettreiche oder felsige, aber klüftige, tiefdurchwurzelbare Standorte Wurzeln selbst bei großer Nässe gute Verankerungsmöglichkeiten bieten (vgl. Schmoeckel 2005, 18-19). Zusätzlich zur Vernässung werden auch Stickstoffeinträge sowie Ozonbelastung und die daraus folgende Bodenübersäuerung als Risikofaktoren genannt (vgl. Indermühle et al 2005, 133 und Gardiner et al 2013a, 42).

Als weiteren permanenten Faktor nennen Gardiner et al (2013a, 87f) das Terrain bzw. Gelände, wobei dieser Einfluss von Sturm zu Sturm verschieden zu sein scheint, wie Indermühle et al (2005, 11) beim Vergleich der Schäden durch „Vivian“ und „Lothar“ in der Schweiz festgestellt haben. Schütz et al (2006, 300) sowie Lanquaye-Opolue und Mitchell (2005, 140) attestierten steilen Hängen eine geringere

Vulnerabilität und fanden heraus, dass der Schaden zum Teil mit zunehmender Hangneigung abnahm. In der Schweiz waren Wälder, die nach 1880 bestockt wurden, in den Jahren 1990 und 1999 weniger vom Windwurf betroffen als ältere Bestände, allerdings merkten Bebi et al (2017, 49) an, dass 90% der Zunahme der Waldfläche seit 1880 bei einer Hangneigung von über 30° beobachtet worden ist. Das bedeutet möglicherweise, dass die Hangneigung das Risiko nicht senkt, sondern die Bestände in steilen Hängen einfach generell jünger und niedriger und allein deshalb weniger anfällig sind.

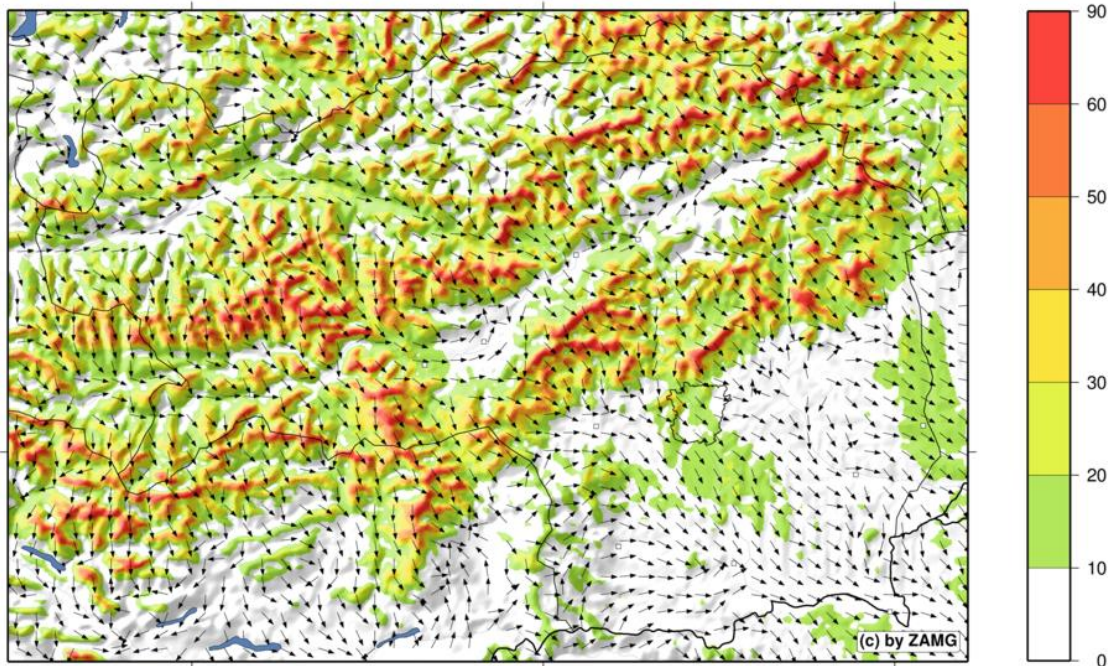


Abbildung 13: Variabilität und Ablenkung des Windes durch das Gelände. Bei diesem Beispiel von Freitag 29.12.2017 6h wird die Windgeschwindigkeit in km/h farbig anhand der Legende rechts und die Windrichtung anhand der Pfeile dargestellt. Die vorherrschende Windrichtung der Großwetterlage ist Nordwest. (Quelle: ZAMG 2017)

Einzelne Geländeformen wie Täler, Bergkuppen oder Sattellagen beeinflussen die Strömung des Windes, ihre Einflüsse sind jedoch aufgrund des Fehlens direkter, feinmaschiger und flächendeckender Windmessungen nur schwer quantifizierbar (vgl. Schmoeckel 2005, 9 und Dupont et al 2015, 243; sh. Abbildung 13). Normalerweise beschleunigt der Wind über Kuppen, Täler hingegen führen zu Verzögerungen. Laut Hanewinkel et al (2014, 529) nimmt die Sturmschadenswahrscheinlichkeit zu, wenn die Krümmung des Geländes sich von extrem konkav auf extrem konvex ändert, wobei auch die Rauigkeit des Untergrundes bzw. des Kronendachs eine Rolle zu spielen scheint (Schmoeckel 2005, 14).

Schelhaas (2008, 130ff) simulierte den Schaden in exponierten und geschützten Beständen mithilfe des ForGEM (Forest Genetics, Ecology and Management) Modells. Dieses Modell kann Wachstum und Entwicklung von Einzelbäumen auf Flächen bis zu mehreren Hektar berechnen. Um den Wind inkludieren zu können, müssen dem

Modell als Eingangsparameter die Windrichtung und die maximale durchschnittliche Windgeschwindigkeit bekannt gegeben werden. Der Einfluss des Windes wurde je für einen 60 Jahre alten geschützten und exponierten Bestand betrachtet und die Windgeschwindigkeit in Szenarien erhöht. Er fand dabei heraus, dass eine unterschiedliche Windgeschwindigkeit notwendig ist, um den gleichen Schaden bei exponierten und geschützten Beständen zu verursachen (sh. Abbildung 14 und Abbildung 15). Bei einem exponierten Stand reicht eine Windgeschwindigkeit von knapp über 25 m/s, um bei allen Dichteszenarien 20% des Bestandes zu schädigen, während dazu bei einem geschützten Stand je nach Dichte eine Geschwindigkeit von über 30 bis fast 35 m/s notwendig ist. Bei einem exponierten Bestand gibt es bis zur Windgeschwindigkeit von 25m/s keine nennenswerten Unterschiede nach Bestandsdichte beim auftretenden Schaden. Erst bei einer höheren Windgeschwindigkeit sind Bestände niedriger Dichte stärker betroffen. Bei den stabilen Beständen gibt sich ein ähnliches Bild, wobei sich die Unterschiede erst nach 30 m/s manifestieren. Bei diesen Ergebnissen könnte man meinen, dass dichter unbehandelter Waldbestand egal ob auf exponiertem oder geschütztem Standort am sichersten ist und dort am wenigsten Schaden anfällt. Allerdings handelte es sich beim Bestand ohne waldbauliche Maßnahmen um den einzigen Bestand, der nicht einstufig war. Bei der Analyse stellte sich heraus, dass bei diesen Beständen alle Bäume über 15m bereits bei 25m/s geschädigt wurden und nur der Unterwuchs stehen blieb. Die Bäume in der Unterschicht den unbehandelten Bestand jedoch am stabilsten erscheinen ließen weil Anteilsmäßig mehr stehen blieb. Die Aussage, dass unbehandelter Wald am stabilsten ist wurde damit relativiert und Bestände mit normaler Dichte sind somit sowohl exponiert als auch geschützt am stabilsten.

Exposed stand

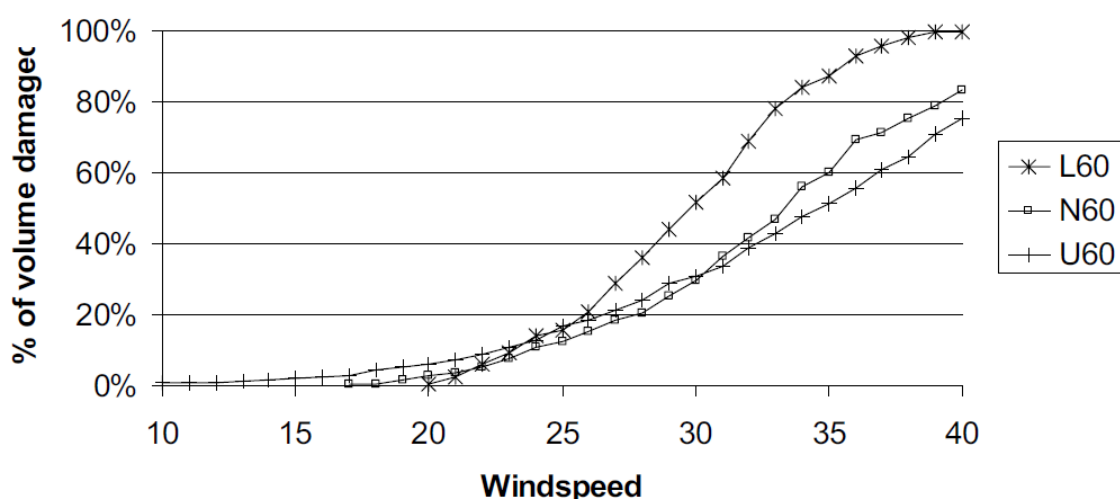


Abbildung 14: Anteil der geschädigten Flächen nach Windgeschwindigkeit in m/s für exponierten 60 Jahre alten Bestand (L60= niedriger Dichte, N60= normale Dichte, U60=ohne waldbauliche Maßnahmen; Quelle: Schelhaas 2008, 132)

Sheltered stand

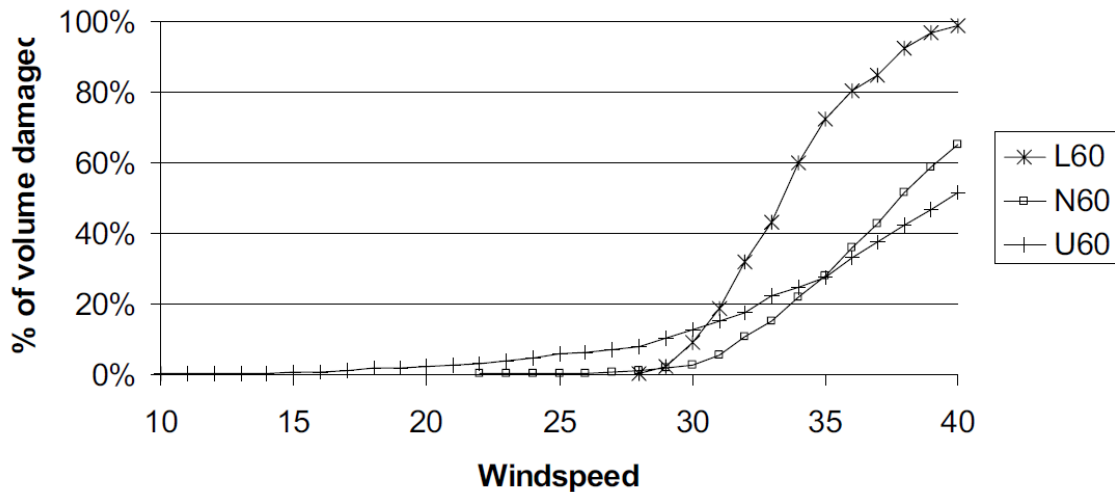


Abbildung 15: Anteil der geschädigten Flächen nach Windgeschwindigkeit in m/s für geschützte 60 Jahre alte Bestände (L60= niedriger Dichte, N60= normale Dichte, U60=ohne waldbauliche Maßnahmen; Quelle: Schelhaas 2008, 133)

Mayer et al (2010, 99) fanden heraus, dass sich die höchsten maximalen Biegemomente bei hohen, steilen Hügeln ($HN = 30^\circ$) im Bereich des Gipfels einstellen, bei den niedrigeren, flacheren Hügeln ($HN = 10^\circ$ und 20°) aber direkt an der luvseitigen Bestandskante (Definition Biegemoment sh. Kapitel 4.3.2). Weitere Untersuchungen zeigten, dass sowohl eine Zunahme der Hangneigung, als auch eine Zunahme der Hügelhöhe zu einer Erhöhung der Biegemomente im Bereich des Hügelgipfels führen (vgl. Mayer et al 2010, 102). Nicoll et al (2005) testeten mittels Windentest, mit dem sie ein Umstürzen der Bäume provozierten, ob Fichten an Hängen weniger stabil sind als im flachen Gelände. Sie fanden jedoch keine Abweichung in Abhängigkeit vom Standort. Das Drehmoment an den Hängen war bei Zug hangabwärts allerdings um 25% niedriger als hangaufwärts (Definition Drehmoment sh. Kapitel 4.3.2). Das bedeutet, dass die Stabilität am Hang abhängig ist von der Richtung, in die der Baum zum Kippen gebracht wird. Daher führt größere Hangneigung nicht automatisch zu instabileren Beständen, aber die Richtung der Krafteinwirkung durch Wind am Hang macht einen Unterschied.

4.3.4 Externe Faktoren

Der größte und bedeutendste externe Faktor ist der Wind. Die Windlast auf Einzelbäume ist dabei hauptsächlich abhängig vom lokalen Charakter des Windfeldes im Zusammenhang mit Aufbau des Baumbestandes und Belaubung (Gardiner et al 2013a, 26). Wichtig ist nicht nur das Windfeld, sondern vielmehr die Turbulenz, i.e. die Stärke der Böen, denn diese korreliert stark mit dem maximalen potentiellen Schadenslevel im Wald (vgl. Gardiner et al 2013, 4 und Gardiner et al 2013a, 26), Usbeck et al 2009, 353). Die Messung von Daten über das Windfeld während eines Sturmereignisses ist jedoch schwierig, denn Messnetze sind nicht auf solche

Fragestellungen ausgelegt (vgl. Dupont et al 2015, 243 und Schmoeckel 2005, 9).

Vereinzelt, vor allem dort wo schon sehr lange der Wind gemessen wird, gibt es aber doch Untersuchungen zu Wind und Windwurf. Im Kanton Zürich wurde dabei ein signifikanter Zusammenhang zwischen Winddruck und Waldschaden gefunden (Usbeck 2015, 187). Bei der gleichen Untersuchung wurden die höchsten Rangkorrelationskoeffizienten der 135-jährigen Windmessreihe zwischen 1980 und 2007 gefunden, was wiederum auf eine periodische Schwankung der Sturmtätigkeit, wie bereits in Kapitel 2.1 erwähnt, schließen lässt (vgl. Usbeck et al 2009, 353). Das bedeutet, dass extreme Sturmböen in Zürich seit der Datenerhebung 1930 zugenommen haben mit Spitzen in den 1990ern Jahren (Usbeck et al 2009, 356).

Weitere externe Faktoren sind der (anhaltende) Niederschlag sowie die Temperatur, welche Einfluss darauf hat, ob der Boden gefroren oder ungefroren ist. Vor allem an schlecht wasserdurchlässigen Standorten setzt ein anhaltendes Niederschlagsereignis die Stabilität der Bäume herab (vgl. Indermühle et al 2005, 133). In alpinen Gebieten und in Skandinavien ist der Boden während Winterstürmen oft gefroren, was die Stabilität erhöht. Allerdings nehmen gerade in diesen Gebieten die Perioden mit ungefrorenem Boden zu (vgl. Gardiner et al 2013 5/24).

4.4 Faktoren für größere Resilienz

Bis jetzt wurden eigentlich nur Faktoren genannt, welche die Risikodisposition senken. Ziel muss es aber auch sein, die Widerstandsfähigkeit zu erhöhen, um die Erholung im Waldbestand zu beschleunigen, falls doch Schaden auftritt. Seidl (2017, 10f) nennt dabei etwa die Förderung von Vorausverjüngung im Bestand, die im Falle von Windschäden schnell die Waldfunktionen wiederherstellen kann. Als weiteren die Resilienz fördernden Faktor sieht er eine Vielfalt an Baumarten und Strukturen, die Zeit zur Erholung nach Störungen durch die unterschiedlichen ökologischen Eigenschaften deutlich verkürzen. Indermühle et al (2005, 97; 113) nennen zusätzlich den vorsichtigen Einsatz von schwerem Gerät, da ein verdichteter Boden das Wurzelwachstum behindert und die Wasserleitfähigkeit verringert. Bei verdichtetem Boden wirken sich der erhöhte Durchwurzelungswiderstand, die gestörte Bodendurchlüftung (O₂-Mangel) und die geringe Wasserpermeabilität (Staunässe) negativ auf die Lebensbedingungen der Wurzeln aus (Indermühle et al 2005, 100). Auch eine hohe Stickstoffbelastung wirkt einer gesunden Wurzelbildung entgegen und erhöht zusätzlich das Risiko für Windwurf und Trockenstress (vgl. Indermühle et al 2005, 79). Beim Waldbau haben standortgerechte Baumarten ein geringeres Risiko und beschleunigen die Wiederbewaldung durch das Vorhandensein von adäquatem Saatgut (vgl. Indermühle et al 2005, 32).

5 Windrisikomodellierung und Sturmschadenvorhersage

Bei der Risikomodellierung werden mechanistische, empirische Modelle und Expertenwissen zur Analyse der Entstehung, des Auftretens und der Ausprägung von Sturmschäden in Wäldern verwendet (Mayer et al 2010, 111; sh. Abbildung 16). Welche Methode verwendet werden kann, hängt auch von den verfügbaren Daten und den technischen Möglichkeiten ab.

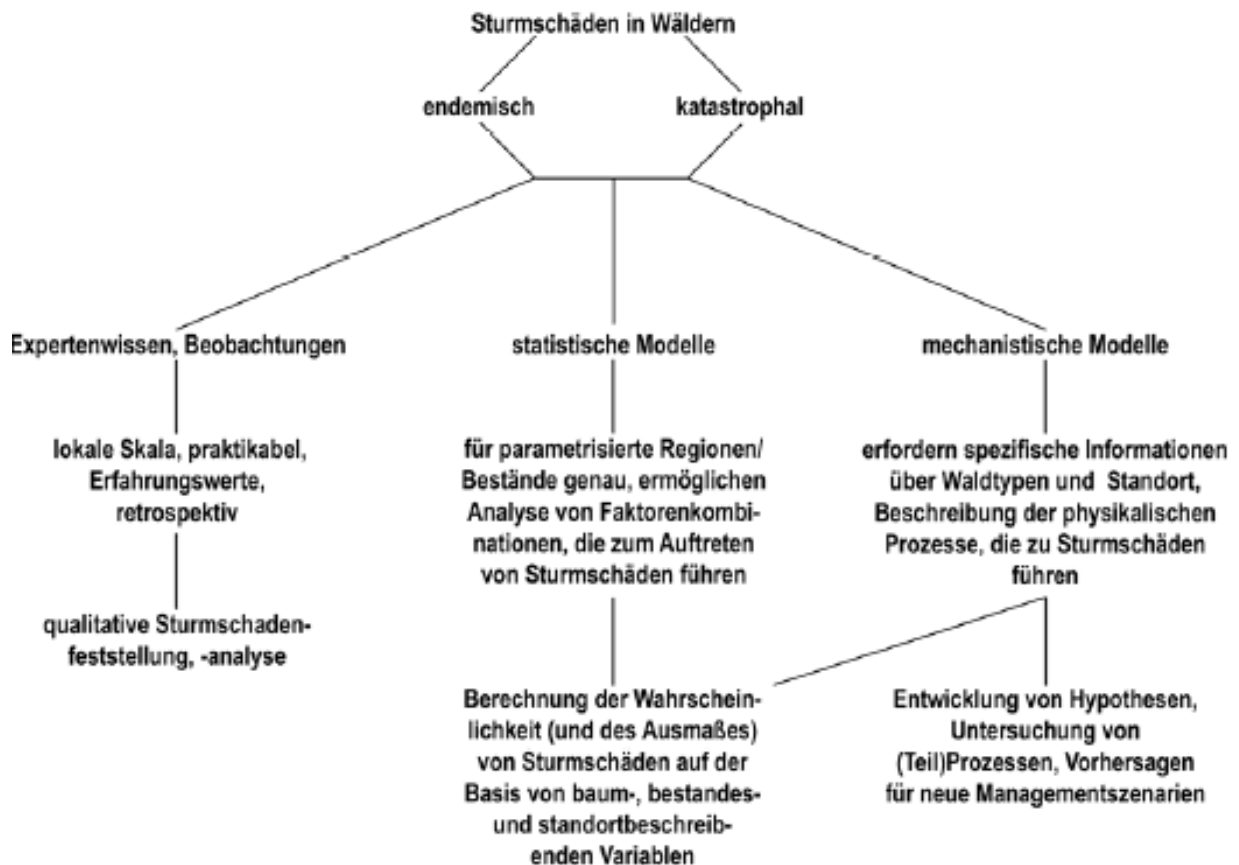


Abbildung 16: Methodische Ansätze zur Analyse der Entstehung, des Auftretens und der Ausprägungen von Sturmschäden in Wäldern (Quelle: Mayer et al 2010, 111 nach Gardiner et al 2008)

Bei mechanistischen Modellen verwendet man die Ergebnisse von Wind- und Windtunneltests, um Aussagen über die kritische Windgeschwindigkeit tätigen zu können, bei der Bäume brechen. In Kombination mit dem lokalen Windregime und der Topographie ergibt sich dann die Wahrscheinlichkeit für Windwurf. Schwierig ist es dabei, die variablen Baumdimensionen und die Bestandstruktur sowie den unterschiedlichen Gesundheitszustand entsprechend zu berücksichtigen (vgl. Scott et al 2005, 194). In anderen Worten, die Modelle geben das Risiko für einen „Durchschnittsbaum“, nicht aber für individuell verschiedene Bäume an (vgl. Gardiner et al 2008, 455). Außerdem müssen alle im Untersuchungsgebiet vorkommenden Baumarten parametrisiert sein. Die verschiedenen Sturmschadensmodelle (i.e. FORGEM-W, WINDA, ForestGALES, FOREOLE) bieten dabei eine breite Palette, die jedoch bei weitem nicht vollständig ist und vor allem Nadelbäume umfasst. Wurde die kritische Windgeschwindigkeit für die dort wachsenden Bäume

berechnet, so wird im Hinblick auf das lokale Windregime die Wahrscheinlichkeit des Auftretens einer solchen Geschwindigkeit ermittelt. Schwierigkeit bereitet die Simulation des Windes, denn die Windmessstationen sind meist mit zu großem Abstand installiert, um Windböen über einem Waldgebiet zu erfassen. Das bedeutet, dass für die mechanistischen Modelle der Wind zwischen den Punkten, zu denen es Messungen gibt, interpoliert oder komplett simuliert werden muss. Die Berechnung des Windes ist auch deswegen problematisch, weil kleine Änderungen der Windgeschwindigkeit oberhalb der Baumkronen große Auswirkungen auf die Ergebnisse der Modellierungen haben (vgl. Hale et al 2015, 34 und Scott et al 2005, 194). Zum besseren Verständnis der Dynamiken ist es daher wichtig, die Rolle der Varietät im Wald und deren Einfluss auf die Beanspruchung von Bäumen im Luv durch Baum- und Fließdynamikmodellen zu untersuchen (vgl. Pivato et al 2014, 281).

Bei auf statistischen Modellen basierenden Methoden werden hingegen Regressionsgleichungen erstellt, die den Schaden von vergangenen Windwurfereignissen mit Standortparametern, Bestandsfaktoren und Attributen einzelner Bäume in Verbindung bringen. Anhand der daraus gewonnenen Erkenntnisse werden dann Windwurfrisikokarten mit Wahrscheinlichkeiten für größere Gebiete erstellt. (vgl. Scott et al 2005, 194) Wenn ein Baum während eines Sturms kollabiert, sind die umliegenden Bäume u.U. einer größeren Windlast ausgesetzt. Diese Veränderungen, die sich durch den Kollaps eines Baumes oder Waldbestandes ergeben, sowie der sich daraus ergebende Folgeschaden können in statistische Modelle nicht inkludiert werden (vgl. Gardiner et al 2008, 455) und machen die Vorhersage des Gesamtschadenvolumens schwierig. Viele Berechnungen schaffen es trotzdem recht gut, den möglichen Schaden vorherzusagen und gefährdete Bestände zu identifizieren. Allerdings ist die Validierung der Modelle aufgrund der relativ geringen Häufigkeit von Stürmen sehr schwierig (Hale et al 2015, 29). Und selbst, wenn die statistischen Modelle es schaffen, die Schäden der meisten Stürme vorherzusagen, können katastrophale Schäden infolge von Jahrhundertereignissen, im Gegensatz zu mechanistischen Modellen, nicht vorhergesagt werden. (vgl. Valinger und Friedmann 1999, 216).

Expertenwissen bzw. Beobachtungen ermöglichen einen Blick in die Vergangenheit und eine Analyse der Faktoren, die zu Schaden geführt haben (vgl. Mayer et al 2010 113). Dabei werden sturmgeschädigte Flächen sowie die Umweltfaktoren, bei denen von einer direkten oder indirekten Korrelation ausgegangen wird, kartiert. Anschließend wird versucht, den Beitrag dieser Umweltfaktoren zu erheben. Die Erkenntnisse helfen Zusammenhänge besser zu verstehen, können zur Vorbeugung von Schäden vor Ort führen und unter Berücksichtigung der regionalen Unterschiede bei der Erstellung von statistischen Modellen helfen. Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein statistisches Modell verwendet, um Aussagen über die Stabilität von Waldbeständen zu machen. Allerdings erfolgte die Gewichtung nicht durch Regression, sondern durch Expertenwissen und Beobachtungen. Diese Methodik wurde gewählt, da für die Erstellung einer Regressionsgleichung und zur Validierung nur ein Sommersturm zur Verfügung gestanden wäre. Hingegen gibt es sehr viele brauchbare Untersuchungen in ähnlichen Gebieten, mit einer Nennung von relevanten Faktoren, die auch Winterstürme und Föhnstürme berücksichtigen.

6 State of the Art – Empirische Modelle

Der gewählte Ansatz einer empirischen Sturmanfälligkeitsmodellierung wurde auch schon von Götz und Schmidtke (2006), Mayer et al (2010), Pasztor et al (2015), Lanquaye-Opolue und Mitchell (2005) sowie Albrecht et al (2012) gewählt. Mayer et al (2010) zum Beispiel erstellten eine Sturmschadenswahrscheinlichkeitskarte für Baden-Württemberg, Deutschland, bei der sie Daten von der Corine Landcover (CLC) Kartierung (Topologie, Pedologie,...) mit den Sturmholznutzungen aus der Naturalbuchführung öffentlicher Hand mithilfe des „Weights of Evidence“ Verfahrens in Verbindung setzten. Ihr Ergebnis beinhaltet drei Klassen mit geringer, mäßiger und hoher Wahrscheinlichkeit für Sturmschaden. 10,3% des Untersuchungsgebietes wurde eine hohe Wahrscheinlichkeit zugewiesen.

Albrecht et al (2012) standen für ihre 1100 Plots eine über 100-jährige Zeitreihe mit Eigenschaften der Plots und auch Informationen über Schaden zur Verfügung. Damit konnten sie die Gewichtung zuerst über ein linear gemischtes Modell bestimmen und anschließend eine Wahrscheinlichkeit auf Bestandsebene schätzen. Götz und Schmidtke (2006) standen ebenfalls sehr genau Daten für die beiden Untersuchungsgebiete im Kanton Zürich, Schweiz zur Verfügung, allerdings setzten sie nicht auf eine Regression zur Gewichtung, sondern auf eine Gewichtung anhand der Literatur ergänzt durch Expertenwissen. Im Gegensatz zu Pasztor et al (2015) wurden keine Winddaten verwendet. Letztere versuchten nicht nur die Wahrscheinlichkeit für Windschaden (Logistische Regression), sondern auch die Intensität des Schadens (Lineare Regression) in vier Testgebieten in Österreich vorherzusagen. Dabei standen ihnen neben Forst- und Standortcharakteristika, Daten zum Forstmanagement und Störungen, zusätzlich sehr spezielle Daten wie tägliche Werte für Temperatur und Wind zur Verfügung. Mit dem entwickelten Modell konnten sie 25% des Schadens richtig prognostizieren, als problematisch erwies sich das zum Teil vom Tag des Events abweichende Meldedatum von Sturmschäden und damit eine falsche Zuordnung von Windgeschwindigkeiten zum Schadensfall.

Kanten als Risikofaktoren wurden in Kapitel 4.3.2 erwähnt und beschrieben. Sie wurden auch schon von den verschiedenen Autoren in Modelle eingebunden. Olofsson und Blenow (2005) detektierten Kanten auf Basis der Bestandsgrößen, Götz und Schmidtke (2006) testeten zusätzlich noch die Detektion mit einem aus LiDAR – Daten abgeleiteten digitalen Höhenmodell (DHM, sh. Kapitel 7.1). Bei Waldrändern wurde ebenfalls die Höhendifferenz als Entscheidungskriterium herangezogen. Diese Methode liefert jeweils eine Linie als Kante. Götz und Schmidtke (2006) detektierten die Kanten auch aus dem normalisierten digitalen Oberflächenmodell (nDSM, Kapitel 7.1) anhand der Höhendifferenzen. Olofsson und Blenow (2005, 89) bzw. Sommerville et al (1989, 38) schlugen eine Mindesthöhendifferenz von 10 bzw. 5 Metern für eine Gefährdung vor. Olofsson und Blenow (2005) verwendeten Entscheidungsbäume um diesen Wert zu identifizieren. Die verwendeten Ansätze beruhen alle auf der Mindesthöhendifferenz und berücksichtigen den Traufkantenwinkel somit nur indirekt.

Auch die Exponiertheit eines Standortes spielt eine Rolle bei der Stabilität von Beständen (sh. Kapitel 4.3.3). Zur Bestimmung der Exponiertheit hat sich der TOPEX (Topographic Exposure) durchgesetzt (u.a. Götz und Schmidtke 2006, Albrecht et al 2012). Das ist eine Methode, um den Grad der Abschattung bzw. Exponiertheit jedes Punktes in Bezug auf das umliegende Gelände zu bestimmen (vgl. Chapmann 2000, 336). Ursprünglich wurden die Messungen manuell im Feld durchgeführt. Mittlerweile wird TOPEX automatisiert mithilfe eines Höhenmodells berechnet. Berechnet werden dabei die maximalen Neigungswinkel von einem Punkt entlang einer Linie bis zum Horizont und die anschließende Addition der Werte der 8 Kardinalrichtungen (Bell et al 1995, 218). Der Wertebereich befindet sich zwischen 0 und 720, bei den einzelnen Expositionen liegt er zwischen 0 und 90 (vgl. Chapmann 2000, 336; sh. Abbildung 17). Je höher der Wert ist, desto höher ist die Abschattung durch das umliegende Gelände. TOPEX gibt als Index somit keinen Aufschluss darüber, von welcher Himmelsrichtung aus gesehen ein Punkt exponiert ist, sondern nur wie exponiert er insgesamt ist. Um TOPEX zu validieren, wurden Feldversuche gemacht, bei denen die TOPEX-Werte mit Ergebnissen von Föhnchentests verglichen wurden. Der Grad der Zerfetzung von speziellen Flaggen korreliert nämlich gut mit der Windgeschwindigkeit. Die Ergebnisse decken sich gut mit den durch TOPEX modellierten exponierten und geschützten Bereichen des gleichen Gebietes (vgl. Quine und White 1998).

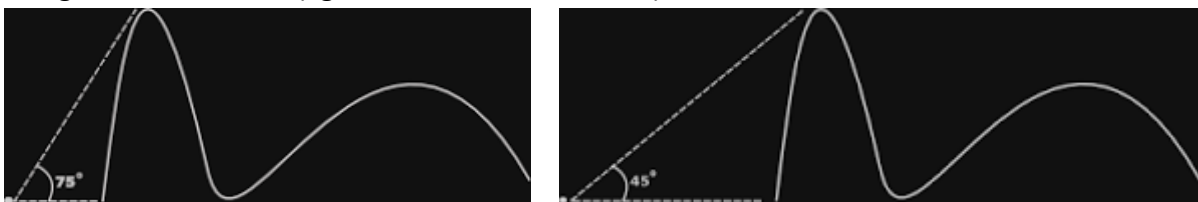


Abbildung 17: Schematische Darstellung des TOPEX-Wertes einer Kardinalrichtung für hohe Abschattung links und weniger Abschattung rechts (Quelle: Popkin 2011)

Mittlerweile ist nicht nur der klassische TOPEX in Verwendung, sondern es wird TOPEX-to-distance verwendet. Dabei wird die Länge für die Neigungswinkelberechnung auf eine gewisse Distanz (z.B. 500m, 1000m, 2000m, 3000m) beschränkt. Dadurch wird die Rechenzeit verkürzt und die Abschattung durch Objekte, die weiter als die gewählte Distanz entfernt sind, nicht mehr berücksichtigt. Ruel et al (2002) verglichen Ergebnisse ihrer Modellierung von TOPEX-to-distance mit 1000m Distanzlimit mittels Windtunneltests im gleichen Gebiet in Quebec, Kanada. Der berechnete TOPEX erklärte dabei 90% der Variationen des Windtunneltests (Ruel et al 2002, 186).

Da es sich beim TOPEX – Wert um einen kontinuierlichen Wert handelt, ist die Klassierung der Werte von hoher Exponiertheit bis zu hoher Abschattung schwierig und subjektiv. Ein Versuch der Klassifizierung der TOPEX – Werte in verschiedene Gefährdungskategorien wurde 1984 von Wilson unternommen. Das Klassifizierungsschema ist in Tabelle 2 dargestellt. Die Klassifikation wird allerdings meist nur zum Verständnis verwendet, da sowohl Regressionsmodelle als auch eine Gewichtung anhand von Expertenwissen sehr gut mit den kontinuierlichen Daten umgehen können.

Tabelle 2: Versuch der Klassifizierung der TOPEX-Werte (Quelle: Wilson 1984, 252)

TOPEX-Score	TOPEX Class	Description
0-10	Severely exposed	No local shelter
11-30	Very exposed	Little local shelter, the shelter being mostly from aspect
31-60	Moderately exposed	A significant amount of shelter, probably from more than one aspect
61-100	Sheltered	Lower valley sides or "U" shaped valley bottoms with a good degree of local shelter
>100	Very sheltered	Steep valley bottoms

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die meisten empirischen Modellierungen von Sturmschadenswahrscheinlichkeiten auf Regressionsmodelle zurückgreifen. Die Mehrheit der Paper; Pasztor et al (2015), Albrecht et al (2012) sowie Lanquaye-Opolue und Mitchell (2005) erstellten ihre Modelle nur für kleine Gebiete, bei denen es aufgrund von Forschung oder Forstmanagement zusätzlich zu Fernerkundungs- und GIS Daten auch sehr genaue Zusatzinformationen gibt. Ziel dieser Arbeit ist es, als Grundlage für die Modellierung Daten zu verwenden, die über große Gebiete einheitlich verfügbar sind. Für die Detektion der Kanten wurde ein neuer Ansatz gewählt, der aus den Laserscan Daten über den Traufkantenwinkel und nicht wie bisher über die Höhendifferenz Kanten berechnet. Ein weiterer Unterschied zu den bisherigen Untersuchungen ergibt sich durch die Wahl des Untersuchungsgebietes, welches sich in seiner Topographie und im Bewuchs vom Schweizer Mittelland, von Baden-Württemberg und British Columbia unterscheidet. Wie bei Götz und Schmidtke (2006) erfolgte die Gewichtung über eine Aufbereitung der Erkenntnisse aus der Grundlagenforschung. Eine auf der Basis von Luftbildern entstandene Kartierung von Windwurfflächen wurde nur zur Validierung, nicht aber zur Erstellung einer logistischen Regression verwendet.

7.1 Untersuchungsgebiet und Datengrundlage

Das Untersuchungsgebiet reicht von Leoben über Bruck/ Mur bis Allerheiligen im Mürztal und umfasst eine Fläche von 280 km² (sh. Abbildung 18). Es umfasst das Tal der Mur von Leoben bis Pernegg und das Mürztal von Allerheiligen bis zur Mündung in die Mur in Bruck und die umliegenden Hügel und Erhebungen. Der tiefste Punkt liegt mit 450m bei Pernegg an der Mur, der höchste ist mit 1664m der Gipfel des Roßecks welcher zum steirischen Randgebirge zählt. Mit diesen Höhen befindet sich das gesamte Gebiet unter der potentiellen Waldgrenze die in diesem Teil der Steiermark bei etwa 1800m liegt. Das Fehlen der alpinen Bereiche wo keine Bäume mehr wachsen erklärt die mit 73% um knapp 12% höhere Waldbedeckung als in der Steiermark gesamt. Die natürlichen Waldgesellschaften im Gebiet sind der Fichten-Lärchenwald, der subalpine Fichtenwald, der Fichten-Tannenwald, der Fichten-Tannen-Buchenwald, der Buchenwald sowie Auwälder an den Flüssen (vgl. LUIS 2017).

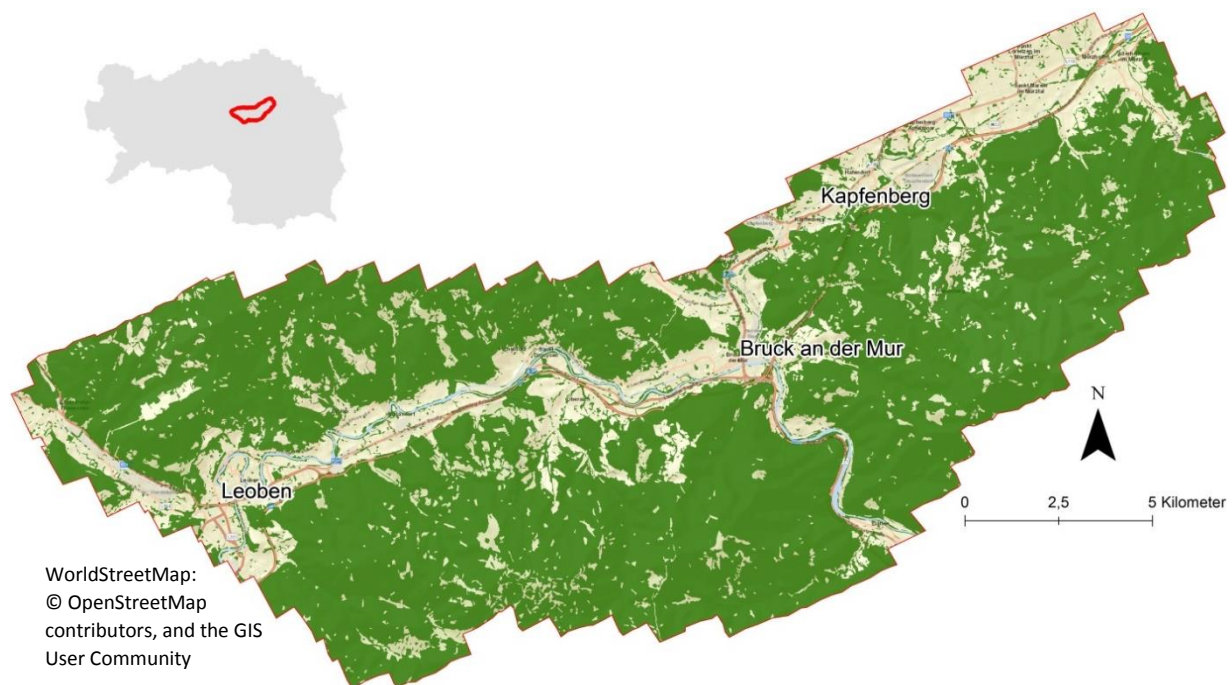


Abbildung 18: Das Untersuchungsgebiet und seine Lage in der Steiermark. Der gesamte Wald im Gebiet ist in dunkelgrün dargestellt (Quelle: eigener Entwurf).

Wie bereits in Kapitel 2.1 erwähnt, haben Winterstürme auch in der Steiermark das größte Schadpotential für den Wald. So richteten unter anderem „Paula“ im Jänner 2008, „Emma“ im März 2008, „Herwart“ im Oktober 2017 und „Yves“ im Dezember 2017 flächig Schaden an. Das Untersuchungsgebiet wurde gewählt, da es in den vergangenen Jahren von einigen dieser Sturmereignisse betroffen war. Für einen Sommersturm wurde im Sommer 2015 im Untersuchungsgebiet eine Referenzkartierung von Sturmschäden auf Basis von Luftbildern durchgeführt. Sie bildete die Grundlage für diese Arbeit und ist der Grund für die Wahl des Untersuchungsgebietes. Bei diesem Sturm handelte es sich um einen Gewittersturm der lokal am 8. Juli 2015 große Schäden verursachte. Insgesamt waren Gewitterstürme mit Starkregen und Hagel im Juli 2015 in der Steiermark für ca. 493.000 Festmeter (fm)

Schadholz verantwortlich (Amt der steiermärkischen Landesregierung 2016, 198). Der heftigste Gewittersturm war dabei jener vom 8. Juli 2015 dessen Hauptschadensgebiete in den Bezirken Bruck/Mürzzuschlag (246.000 fm) und in Leoben (100.000 fm) lagen (Amt der steiermärkischen Landesregierung 2016, 198).

Die für die Modellierung der Sturmgefährdung relevanten räumlichen Faktoren wurden zum einen im Rahmen dieser Arbeit aus Geländedaten abgeleitet, zum anderen standen Berechnungen dieser Faktoren durch das von Joanneum Research Projektes bearbeitete Projekt „Ableitung forstlicher Parameter aus Laserscanner Daten und Erstellung von Gefahrenhinweiskarten für die Steiermark (ALS Wald Steiermark)“ zur Verfügung. Bei den Geländedaten standen ein DHM, ein digitales Oberflächenmodell (DSM) und normalisiertes digitales Oberflächenmodell (nDSM), die aus Airborne- Laserscanning (ALS) Aufnahmen abgeleitet wurden, zur Verfügung. Die Befliegungen wurden im Auftrag des Landes Steiermark zwischen 2009 und 2012 durchgeführt. Die Daten des Untersuchungsgebietes wurden zwischen Mai 2009 und August 2011 aufgenommen. Die Dichte der Punktwolke betrug durchschnittlich 4 Punkte/m². Die Punkte wurde von Joanneum Research auf ein Raster mit einer Auflösung von 0,5m x 0,5m interpoliert, da die Berechnungsschritte auf Rasterbasis erfolgen sollten. Bei den Berechnungen der räumlichen Faktoren stellte sich allerdings heraus, dass die Daten zu detailreich sind und auch die Rechenzeit aufgrund der großen Datenmenge enorm ist. Die Auflösung wurde deshalb mithilfe der bilinearen Interpolation auf 10m x 10m bzw. 2m x 2m (für die Kantendetektion) heruntersetzt. Diese Methode eignet sich gut für kontinuierliche Datensätze wie Geländeinformationen und weist der neuen Zelle ein gewichtetes Mittel der vier benachbarten Pixel zu. Für genauere Informationen zur jeweiligen verwendeten Auflösung sei auf Kapitel 7.1 verwiesen.

Die Forstparameter Anteil Nadelholz in Prozent und vertikale Struktur, stammen, wie bereits erwähnt, vom ALS Wald Steiermark Projekt, das im Auftrag der Waldverband Steiermark GmbH durchgeführt wurde. Die aus den ALS – daten abgeleiteten Bestandspolygone, auf denen die in dieser Arbeit verwendeten Parameter basieren, sind nicht mit traditionell abgeleiteten Bestandsgrenzen vergleichbar. Bei traditionellen, oft historischen Bestandsgrenzen fließen neben den Baumhöhen und ihrer Homogenität auch Kriterien wie Befahrbarkeit, Notwendigkeit forstlicher Maßnahmen, Baumartenverteilung, Gewässer, Besitzstruktur etc. in die Abgrenzung mit ein. Diese spielten jedoch bei den hier vorliegenden Bestandsgrenzen keine Rolle und wären für die weitere Arbeit auch nicht wünschenswert. Der Vorteil einer automatisierten Segmentierung auf der Basis von ALS – Daten liegt in der objektiven Abgrenzung nach gleichen Kriterien über das ganze Untersuchungsgebiet bzw. die ganze Steiermark. Mit dem gleichen Verfahren können die Parameter der einzelnen Polygone jederzeit wieder auf den neuesten Stand gebracht werden. Die Ergebnisse des Projektes, welches noch mehr als die hier verwendeten Parameter Anteil Nadelholz und vertikale Struktur umfasst, sind online im Waldatlas Steiermark öffentlich einsehbar (Waldatlas 2011, sh. Abbildung 19).



Abbildung 19: Darstellung des Holzvolumens in Vorratsfestmeter pro Hektar im steirischen Waldatlas (Quelle: Waldatlas 2011)

Zur Validierung der Ergebnisse stand für das Untersuchungsgebiet eine Windwurfkartierung, die das Schadensausmaß nach einem Gewittersturm vom 8. Juli 2015 darstellen soll, zur Verfügung. Die „Erhebung Windwurfflächen 2015“ wurde damals von der Landesforstdirektion in Auftrag gegeben und von Joanneum Research durchgeführt. Die Schadflächen wurden visuell aus CIR- Luftbildern als Polygone erhoben und mit den Attributen Schädigungsgrad und Unsicherheit, d.h. Verlässlichkeit der Auswertung versehen (sh. Abbildung 20). Die Unsicherheit bezieht sich darauf, dass es sich bei einigen schon aufgearbeiteten Flächen unter Umständen um vorangegangene Kahlschläge und nicht um Sturmschäden handelt. Für die in dieser Arbeit vorgenommene Validierung wurden die unsicheren Flächen und Flächen unter 100m² nicht berücksichtigt. Diese Grenze wurde gezogen, da diese Fläche einem Pixel der Gesamtvulnerabilität entspricht und darunter keine Aussagen möglich sind.

Kartiert wurden 1107 Windwurfpolygone von denen 815 für die Validierung verwendet wurden. Diese Polygone umfassen eine Gesamtfläche von ca. 3 km². Bei dem besagten Sturm handelte es sich um einen lokalen Sturm. Im Monatsrückblick der ZAMG in der Kategorie Unwetter (ZAMG 2015) ist in diesem Fall von stürmischen Windböen die Rede. Flächige Winddaten zum Ereignis standen nicht zur Verfügung. In Kapfenberg wurden punktuell allerdings um 12 Uhr und 18 Uhr Böenspitzen von 75,6 km/h aufgezeichnet (Wetter und Klima 2015). Die Windrichtung, über die auch keine Messung vorlag, wurde im Nachhinein aus den Luftbildern rekonstruiert, indem sie indirekt aus der Fallrichtung der

Bäume bestimmt wurde. Der Wind kam während des Sturms aus Südwest bis Südost. Dies trifft mit Sicherheit für die Schadflächen zu und wird mangels anderer Information auch für das restliche Gebiet angenommen. Die Gewichtung der Kanten und des TOPEX ist durch die Windrichtung alleine möglich. Flächenhafte Winddaten über einen längeren Zeitraum hinweg sowie Böenspitzen, die aus Messstationen interpoliert werden können wie im ZAMG Projekt BEAUFORT (ZAMG 2010), standen für die Arbeit nicht zur Verfügung, hätten aber den Vorteil, dass zu den unterschiedlichen Windrichtungen auch Windgeschwindigkeiten vorliegen würden. Diese Information könnte wiederum in die exaktere Gewichtung der Bereiche hinter Kanten und den TOPEX einfließen.

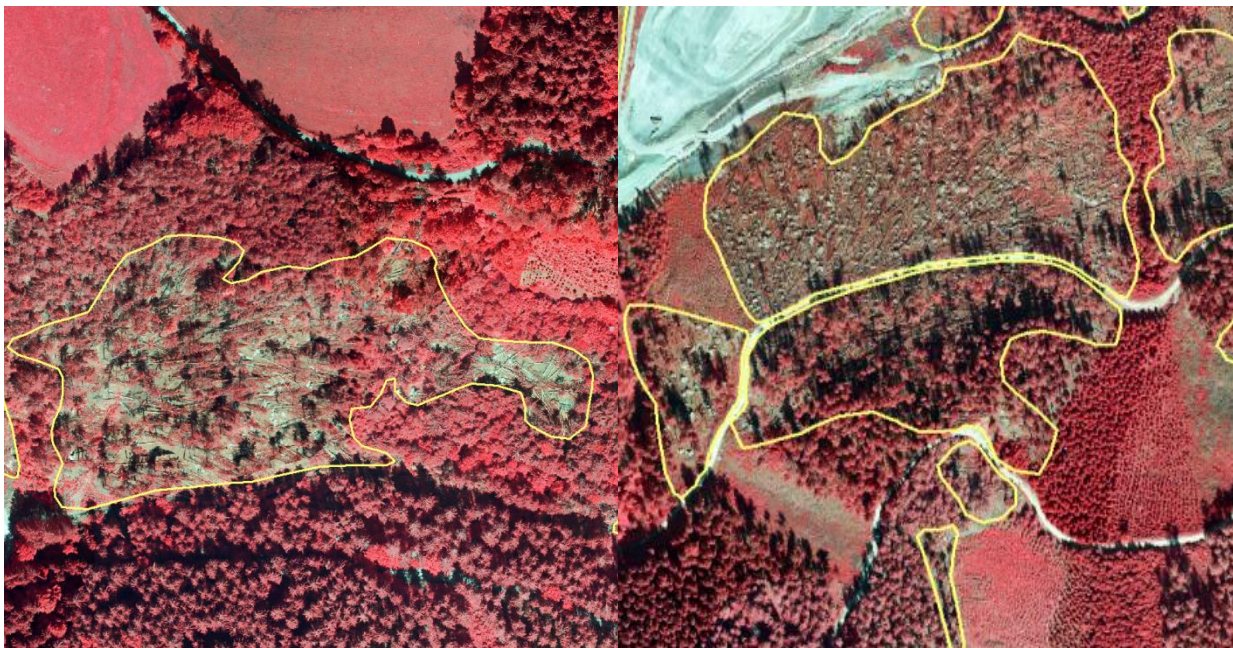


Abbildung 20: Beispiele für Windwurf­flächen im CIR Luftbild, die gelben Polygone stellen die Ränder der Polygone der Windwurfkartierung dar (Quelle: Aeromap, Niederöbarn, im Subauftrag von Joanneum Research)

7.2 Berechnung der Vulnerabilitätsvariablen

In dieser Arbeit wurden fünf Variablen für die Berechnung der Vulnerabilität verwendet. Variablen, zu denen es keine Datensätze gibt und die auch nicht aus vorhandenen Daten abgeleitet werden können, wurden nicht inkludiert. So gibt es keine (flächendeckende) Information über Gesundheitszustand, Schädlingsbefall, Zeitpunkt und Stärke vergangener waldbaulicher Eingriffe, Säurezustand, Stickstoff- und Ozonbelastung sowie Bodengründigkeit. Der Einfluss dieser Parameter auf die Vulnerabilität von Beständen konnte daher bei der Modellierung nicht berücksichtigt werden.

Verfügbar und verwendet wurden die Parameter Nadelwaldanteil, Baumhöhe, Vertikalstruktur, Bereiche hinter Kanten und topographische Exponiertheit. Für die Modellierung wurden nicht Einzelbäume verwendet, sondern die Berechnung der Variablen erfolgte auf einer Rastergröße von 10m x 10m. Die war notwendig, da einerseits es aufgrund der Dynamik von Stürmen und der gewählten Datengrundlage und Art der Modellierung nicht möglich ist, Aussagen über Einzelbäume zu machen, andererseits hat die

gewählte Auflösung das Potential in Zukunft auf der Basis von Sentinel-2 Daten ein Update durchzuführen (sh. Kapitel 6). Die verwendeten Variablen sind folgendermaßen definiert:

Mittlere Höhe des Bestandes

Die Baumhöhe wird bisweilen als der wichtigste Faktor für die Vulnerabilität genannt (vgl. Gardiner et al 2013, 4 und Hale et al 2015, 28/37 bzw. Kapitel 2.2.1). Das nDSM repräsentiert die Baumhöhen am besten und stellte daher die Grundlage für die Berechnung dieses Parameters dar. Um festzustellen, wie gut das nDSM die Baumhöhe überhaupt wiedergibt, muss die Datenerhebung und Generierung nochmals betrachtet werden. Für die Laserscanner-Befliegung wurden vier Punkte pro Quadratmeter aufgenommen und in Höhen über 2000m Seehöhe nur mehr 1 Punkt. Das bedeutet, dass vier Höheninformationen zur Verfügung stehen, die aber nicht alle vom Kronendach, sondern auch von Bäumen in der Unterschicht oder dem Boden stammen können. Sibona et al (2017, 5) fanden heraus, dass Laserscannermessungen im Vergleich Messungen an gefälltten Bäumen zu keinem Fehler oder nur zu einer leichten Überschätzung der Baumhöhe von nur bis zu 2,7% führt. Die Baumhöhe kann daher sehr gut wiedergegeben werden, wobei der Höhenfehler von der Punktdichte abhängt. Für diese Arbeit wurde die Höhe als Mittelwerte aller Punkte im 10m * 10m Raster mit der bilinearen Interpolation aus dem 0,5m x 0,5m nDSM resampelt. Es wurden somit für die Höheninformation nicht nur die Höhe einzelner Baumspitzen, sondern auch niedrigere Bereiche herangezogen.

Anteil Nadelwald

Reine Nadelwaldbestände wurden in der Vergangenheit häufiger geschädigt, wobei die Mischung von Beständen das Risiko herabsetzt (u.a. Indermühle et al 2005, Schütz et al 2006). Neben einer Erhöhung der Resistenz durch eine höhere Durchmischung ist laut Seidl (2017, 10f) auch die Resilienz in durchmischten Wäldern besser, was bedeutet, dass die Wiederherstellung der Waldfunktionen schneller voran geht.

Deswegen ist der Nadelwaldanteil als wichtige Variable für die Berechnung der Gesamtvulnerabilität anzusehen. Die Daten liegen auf Bestandslevel vor, d.h. der Nadelwaldanteil gibt für jedes Bestandspolygon den Anteil von Nadelbäumen in Prozent an. Abgeleitet wurde der Anteil von Laub- und Nadelwald über die Klassifikation der RapidEye Satellitenbilddaten im ALS Wald Steiermark Projekt von Joanneum Research. Die pixelbasierte Klassifikation erfolgte durch logistische Regression und diente als Basis für die Berechnung des Nadelwaldanteils in % pro Segment (sh. Abbildung 21).

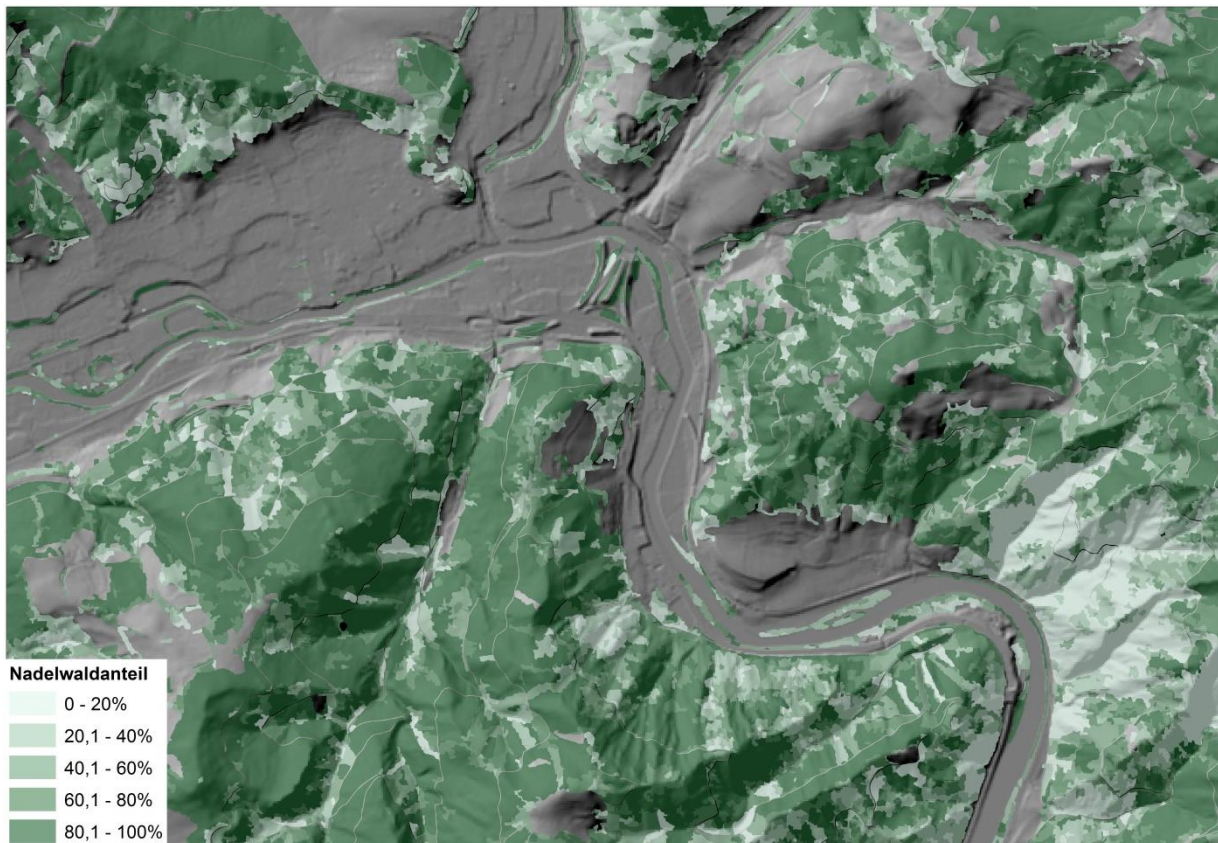


Abbildung 21: Nadelwaldanteil (Quelle: eigener Entwurf)

Vertikale Struktur

Die Vertikalstruktur ist ein Maß für die vertikale Gliederung bzw. die Unterscheidung zwischen ungleichförmigen und gleichförmigen Beständen. Sie ist für die Beurteilung der Stabilität eines Bestandes wichtig wie u.a. von Hanewinkel et al (2014) und Dvořák et al (2001) beschrieben. Zudem weist ein stufiger Waldbestand nicht nur eine höhere Stabilität auf, sondern es ist auch die Verjüngung bzw. Wiederaufforstung einfacher, da es sehr unwahrscheinlich ist, dass alle Bäume aller Größen und Altersstufen bei einem Sturmereignis geschädigt werden.

Die Berechnung der Vertikalstruktur erfolgte über Schwellenwerte statistischer Kenngrößen, die im Rahmen der Projekte FP7 EUFODOS und ALS Wald Steiermark bei Joanneum Research ermittelt wurden. Der Wald wird dabei in drei Kategorien eingeteilt: einschichtiger, zweischichtiger sowie drei- oder mehrschichtiger Aufbau (sh. Abbildung 22). Einschichtig bedeutet, dass mindestens 70% der Baumspitzen im höchsten Sechstel der Oberhöhe zu finden sein müssen. Bei einem zweischichtigen Bestand müssen nur 30% in dieser Höhe zu finden sein, gleichzeitig müssen mindestens 30% der Baumspitzen in einer zweiten Schicht liegen. Die Lage dieser zweiten Schicht wird nicht weiter unterteilt, darf aber nicht um mehr als ein Sechstel von der definierten Höhe abweichen. Der restliche Bestand der nicht ein- oder zweischichtig ist, wurde automatisch der dritten Klasse mehrschichtig zugeordnet.

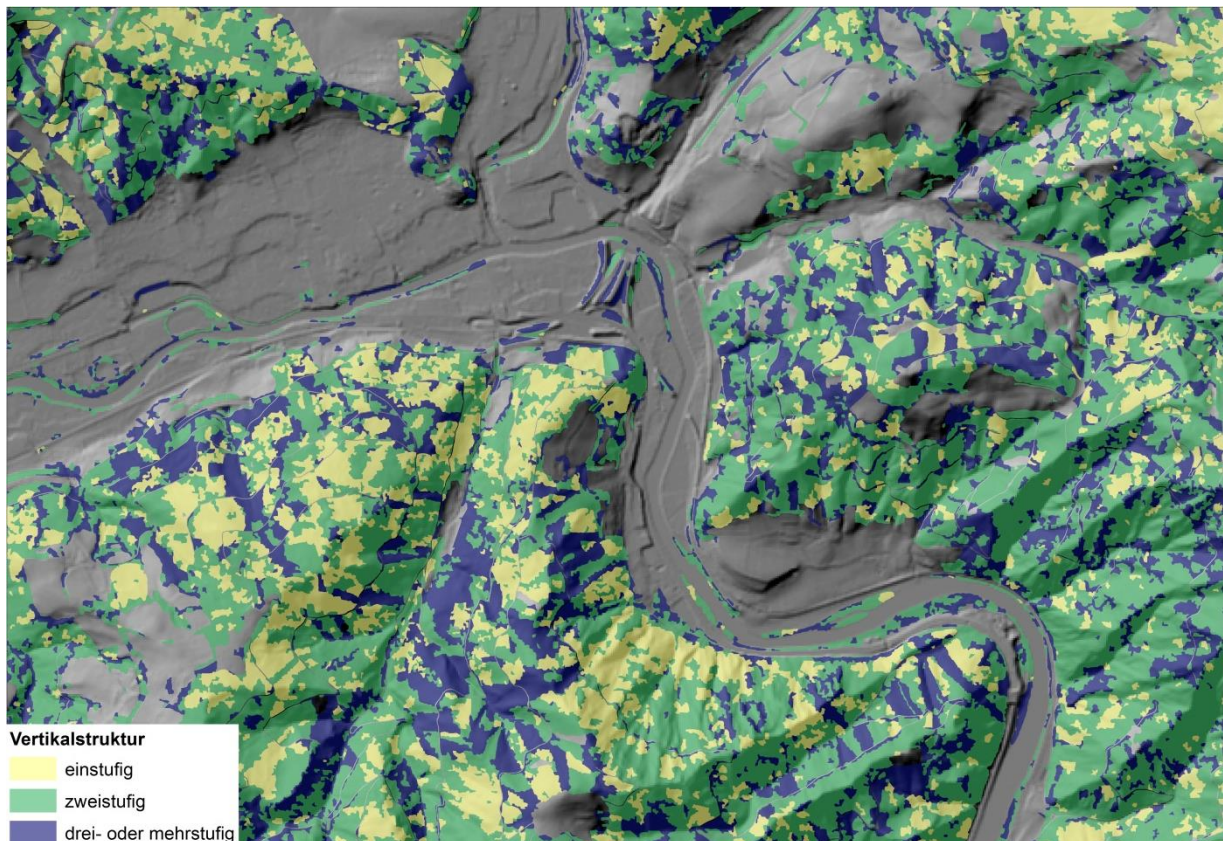


Abbildung 22: Vertikalstruktur (Quelle: eigener Entwurf)

Kanten

Kanten, sowohl an den Waldrändern als auch im Wald, sind Stellen, an denen der Wind tiefer in den Bestand eindringen kann und somit für die dahinterliegenden Bäume die Windbelastung höher ist, als in einem geschlossenen Bestand, der nicht im Einflussbereich von Kanten liegt. Wie sehr der Wind eindringen kann, ist nicht nur vom Vorhandensein von Höhenunterschieden und dem Wind abhängig, sondern auch vom Traufkantenwinkel. So ist bei geneigter Kante die Windbelastung deutlich geringer als bei offenem Stammraum ohne vorgelagerte Vegetation (vgl. Mayer et al 2010, 84; sh. Kapitel 2.2.2). Wie bereits erwähnt, fanden Somerville (1980, 484), Somerville et al (1989, 44) und Mayer et al (2010, 92) heraus, dass sich Windschäden im Bereich der ersten 100 - 200 m stromabwärts von exponierten Bestandskanten konzentrieren.

Im Gegensatz zu Olofsson und Blenow (2005) sowie Götz und Schmidtke (2006) wurde dabei ein pixel- anstatt eines linienbasierten Ansatzes verwendet. Darüber hinaus erfolgte die Kantendetektion anhand des Winkels zwischen Beständen und nicht, wie bei den erwähnten Autoren, alleine anhand der Höhendifferenz (sh. Kapitel 6). Bei einem Wald ohne Trauf kann von einem Traufkantenwinkel, also einer Neigung der Kante, von 90° ausgegangen werden (sh. Abbildung 10). Dasselbe gilt für Kanten innerhalb des Waldes. Zur Berechnung der Neigung wurde das nDSM vorerst auf eine Rastergrößen von 2m x2m mittels bilinearer Interpolation resampelt. Es hat sich gezeigt, dass bei dieser Auflösung zu viele Kanten detektiert werden, nämlich vielfach an einzelnen Bäumen und nicht an Bestandesgrenzen oder Lücken. Um dem Entgegenzuwirken, wurde das nDSM mit einem

Medianfilter (5x5 Kernel) geglättet. Der neue Pixelwert ist dann der Median der 25 Pixel des 5x5 Pixel großen Kernels. Mit der Glättung werden die Höhenunterschiede und somit auch die Neigung (slope) herabgesetzt. Deshalb wurden für das geglättete nDSM nur noch Kantenpixel, die eine Neigung von 75° oder höher aufwiesen, als Kante ausgewiesen (sh. Abbildung 23), da Neigungen durch die Glättung des nDSM unterdrückt wurden. Zusätzlich zu der Information über die Lage der Kante ist Kenntnis die der Ausrichtung der Kante von wesentlicher Bedeutung. Die Ausrichtung bzw. die Exposition (aspect) der Kanten kann mithilfe des DSMs berechnet werden. Vor der Berechnung wurde das DSM mit den gleichen Methoden und Parametern wie das nDSM geglättet. Das war notwendig, um die Hauptexposition und nicht die feinen Nuancen der Bestandsstruktur zu erhalten. Die berechneten Expositionswerte zwischen 0 und 360 wurden zur Vereinfachung in die acht Kardinalrichtungen (N, NO, O, SO, S, SW, W, NW) zusammengefasst und den Kanten zugewiesen (sh. Abbildung 24).

Bei Kanten sind jedoch nicht nur die Bäume direkt an der Kante, sondern im Besonderen die dahinter gefährdet (sh. Kapitel 4.3.2). Für jede Kardinalrichtung bzw. Kante wurde deshalb ein Puffer von 100m mithilfe eines selbst geschriebenen Pythonskripts (sh. Anhang) berechnet. Der Puffer stellt die potentielle Gefährdungszone dar (sh. Abbildung 25). Der Wert liegt am unteren Ende des in Kapitel 4.3.2 erwähnten Wertespektrums von 100m – 200m. Dieser geringere Wert wurde gewählt, weil es keine Auskunft darüber gibt, ob eine Kante neu oder alt ist und damit nicht bewertet werden kann ob Bäume schon immer an/hinter einer Kante stehen oder nicht. Ist das der Fall, haben sie sich an den Wind angepasst. Wenn sie allerdings erst seit kurzer Zeit aufgrund eines Windwurfes, Kahlschlages oder sonstiger Eingriffe direkt hinter einer Kante stehen, sind sie empfindlicher.

Als zusätzliche Restriktion wurde ein Ende des Puffers nach Lücken von 10m implementiert, denn wenn nach der Lücke eine weitere Kante anschließt, wird diese sowieso erfasst. Zusätzlich wurden nur Pixel über 14m Höhe als potentiell durch die Kante gefährdet klassifiziert. Dieser Wert geht auf Ancelin et al (2004, 115) zurück, die keine Schäden für Bäume unter dieser Höhe fanden. Um die Kanten der einzelnen Expositionen zusammenzuführen wurden die Datensätze anschließend miteinander verschnitten.

Die Puffer hinter den Kanten wurden in einer Auslösung von 2m x 2m detektiert. Zielauflösung für die Berechnung der Gesamtvulnerabilität ist allerdings 10m x 10m. Daher wurde auch versucht, die Kanten gleich auf der Rastergröße 10m * 10m zu detektieren. Eine visuelle Bewertung der Ergebnisse dieser Berechnung hat allerdings gezeigt, dass die Kanten nicht korrekt detektiert wurden. Aus diesem Grund wurde das genauere Ergebnis, das mit einer Rastergröße von 2m x 2m detektiert wurde, auf eine Rastergröße von 10m resampelt (sh. Abbildung 26). Als Methode wurde wieder die bilineare Interpolation gewählt, die in Kapitel 7.1 schon genauer beschrieben wurde.

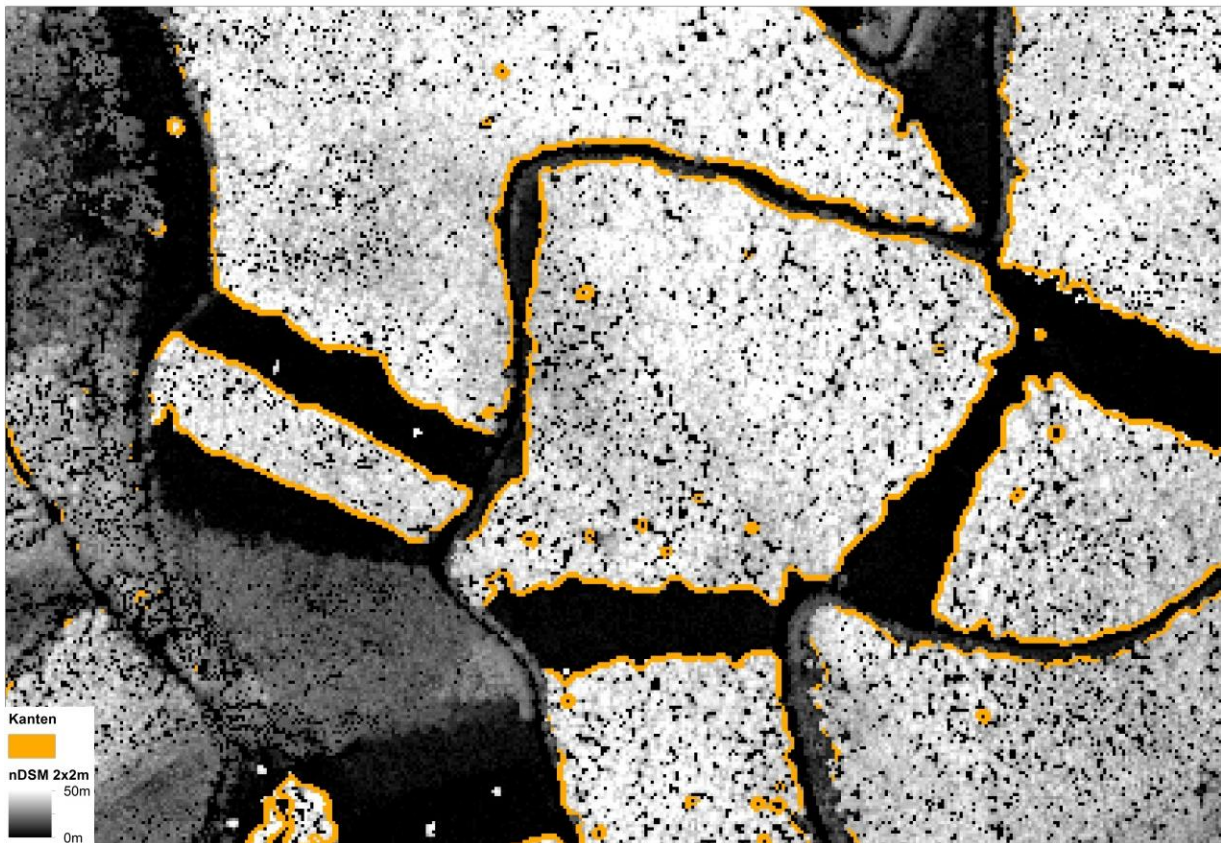


Abbildung 23: Kanten, also alle Pixel die nach der Neigungsberechnung aus dem geglätteten nDSM eine Neigung mindestens 75° aufweisen, drapiert über dem nDSM (Quelle: eigener Entwurf)

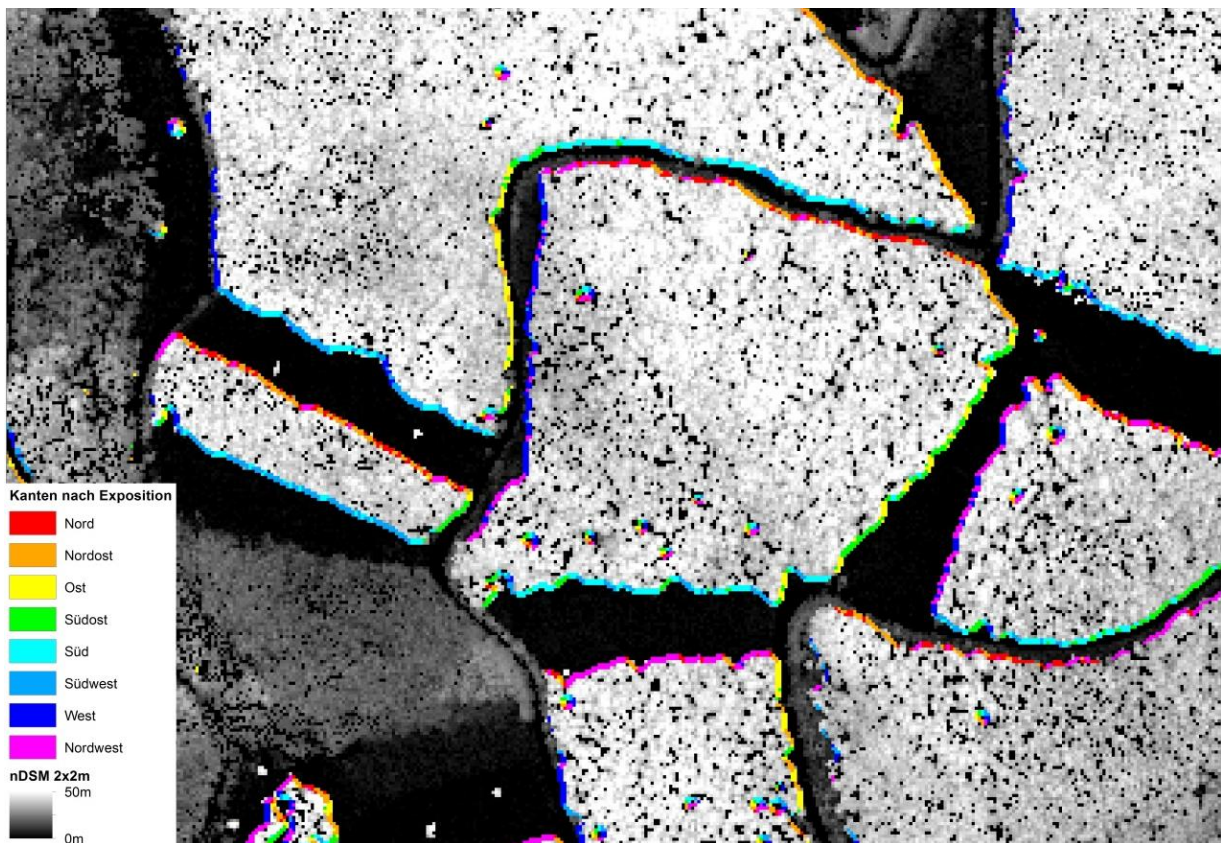


Abbildung 24: Kanten nach Exposition in die acht Kardinalrichtungen gegliedert drapiert über dem nDSM (Quelle: eigener Entwurf)

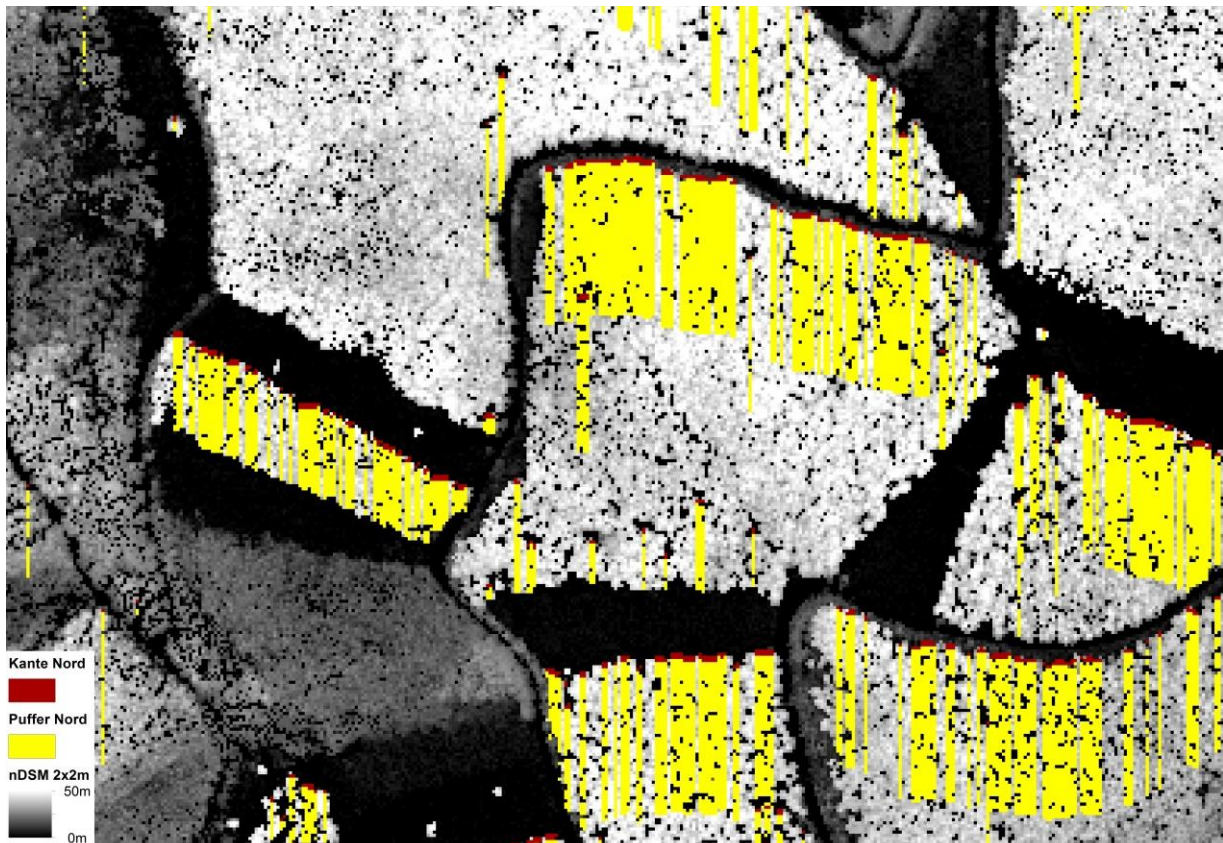


Abbildung 25: Nach Norden exponierte Kanten mit 100m Puffer drapiert über dem nDSM. (Quelle: eigener Entwurf)

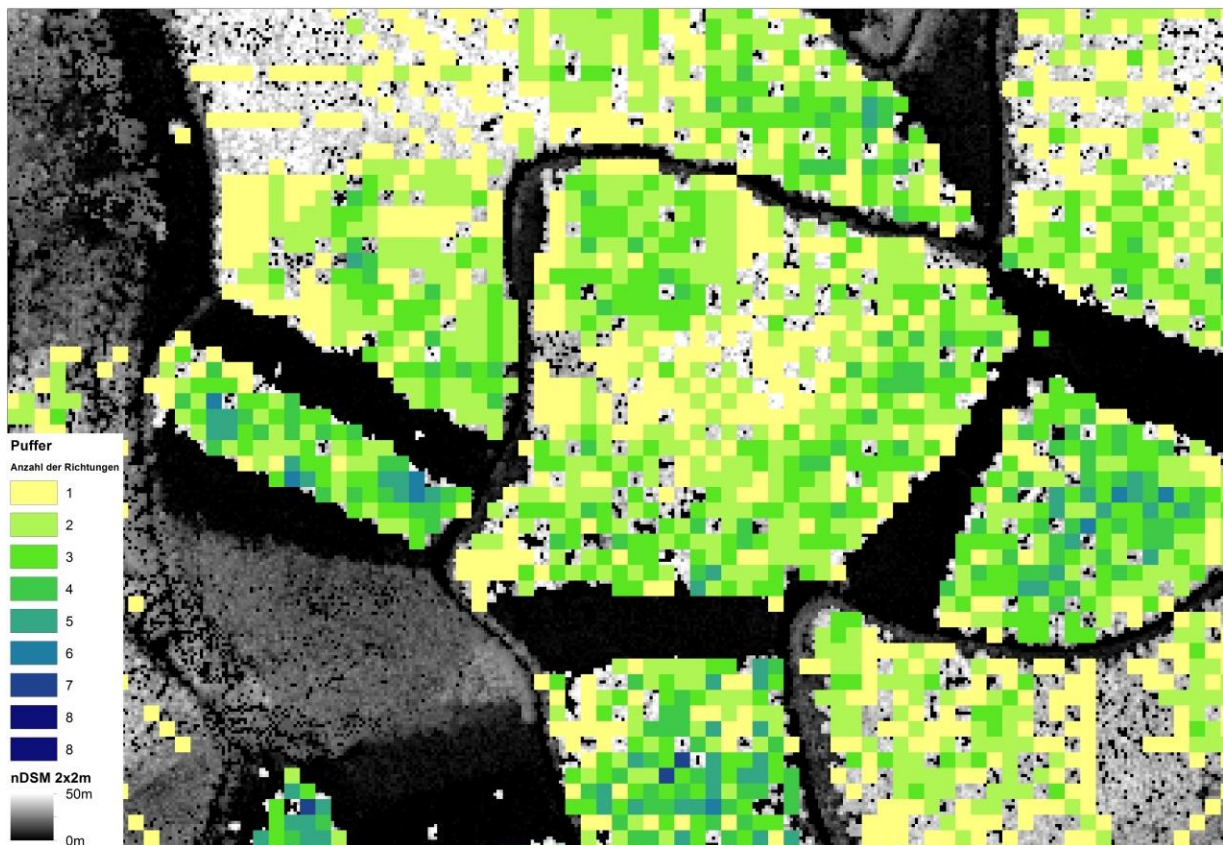


Abbildung 26: Anzahl der 100m Puffer einer Kante, die das jeweilige Pixel potentiell gefährden könnte in der Zielauflösung von 10m x 10 m drapiert über dem nDSM. (Quelle: eigener Entwurf)

Im Gegensatz zur Methodik von Olofsson und Blenow (2005) sowie Götz und Schmidtke (2006) wurden Kanten nicht auf Basis der Bestandsgrenzen detektiert, sondern auf einer genaueren Detailebene. Diese Methode ermöglicht es, dass vor allem graduelle Übergänge zwischen Beständen mit unterschiedlichen Durchschnittshöhen, deren Differenz aber den definierten Höhenunterschied überschreitet, nicht als Kanten ausgewiesen werden, weil der Traufkantenwinkel und nicht der Höhenunterschied das Entscheidungskriterium ist. Ein Vorteil der gewählten Methode ist, dass „lokale“ Kanten unabhängig von durch beispielsweise Forstkarten vorgegebenen oder segmentierten Bestandsgrenzen detektiert werden.

Aus diesen Gründen ist die Kantendetektion über den Traufkantenwinkel sehr gut für Waldgebiete anwendbar, für die keine ermittelten Bestandsgrenzen vorliegen. Selbst wenn dies, wie bei der vorliegenden Arbeit durch das ALS Wald Steiermark Projekt, der Fall ist, ist die verwendete Methodik der Kantenermittlung wesentlich genauer, da vor allem Lichtungen im Wald detektiert werden die sonst bei der Segmentierung einem Bestand zugeordnet werden (sh. Abbildung 27). Der hier entwickelte Ansatz erlaubt somit eine genaue Detektion aller Kanten im Wald, nicht nur jener zwischen den Beständen und am Rand.

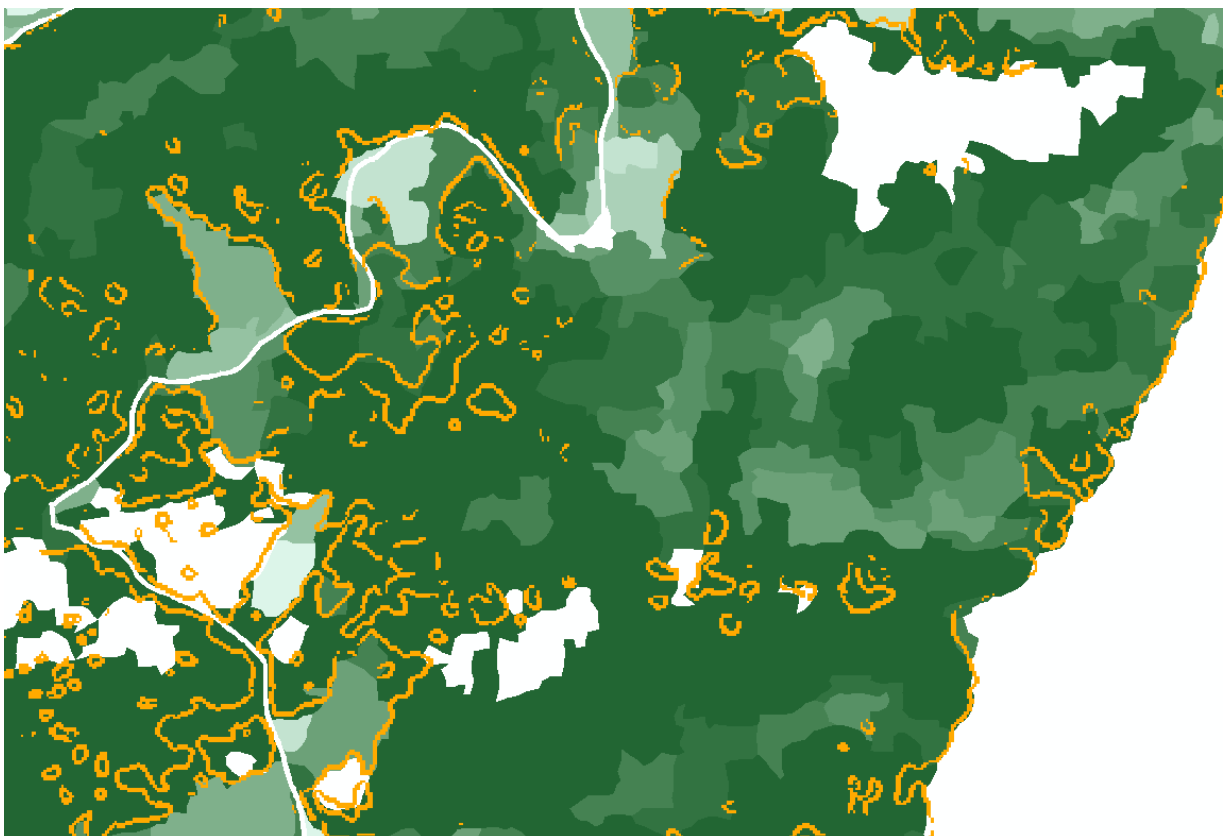


Abbildung 27: Die detektierten Kanten aus dem nDSM sind nicht immer ident mit den Bestandsgrenzen (Quelle: eigener Entwurf)

In Rahmen dieser Arbeit wurden, wie bereits erwähnt, die Kanten aufgrund ihres Winkels und nicht wie in anderen Arbeiten (u.a. Olofsson und Blenow 2005, Götz und Schmidtke 2006) mit der Höhendifferenz durchgeführt. Aufgrund dieses Unterschieds in der Herangehensweise wurde die von Olofsson und Blenow (2005, 89) bzw. Sommerville et al (1989, 38) vorgeschlagene Mindesthöhendifferenz von 10 bzw. 5 Metern für eine Kante nicht im Code implementiert. Um die Ergebnisse jedoch vergleichen zu können und auszuschließen, dass mit der Detektion über den Winkel Bereiche detektiert werden, die sich in der Höhe zu wenig unterscheiden wurden die Höhendifferenzen im Nachhinein überprüft. Für diese Kontrolle wurde anhand der Maximum-Minimum Differenz mit einem 3m x 3m Kernel der Höhenunterschied für alle detektierten Kantenpixel erhoben. Dabei kam heraus, dass 99% der Kantenpixel einen Höhenunterschied von 5m oder mehr, 97% 10m oder mehr aufweisen. 90% der Pixel, die als Kante klassifiziert wurden, stehen für einen Höhenunterschied von 10m bis 40m. Würde man die Mindesthöhendifferenz die in den zwei erwähnten Untersuchungen gefordert wurde im Code implementieren, so würde sich nicht viel ändern, denn es würden nur 1% (5m Höhendifferenz) bzw. 3% (10m Höhendifferenz) der Kanten wegfallen. Aus diesem Grund wurde auf das Kriterium Höhendifferenz im Code verzichtet. Es kommt also durch die Detektion auf Basis des Winkels zwischen den Beständen nicht zur fälschlichen Detektion von Kanten und die Höhenunterschiede stimmen mit der von Olofsson und Blenow (2005) und Sommerville et al (1989) als kritisch eingestuften Höhendifferenz gut überein.

Um die berechnete Vulnerabilität mit dem Sturm von 8 Juli 2015 zu validieren wurden nur die Kanten Süd bis Südost (sh. Kapitel 7.1) bei der Berechnung der Gesamtvulnerabilität berücksichtigt. Dies hat insbesondere Auswirkungen auf die Werte des TOPEX und der hinter Kanten liegenden Puffer.

TOPEX

Der TOPEX wird wie bereits in Kapitel 6 erwähnt für die Berechnung der Exponiertheit von Standorten verwendet. In dieser Arbeit wurde TOPEX mithilfe eines selbst geschriebenen Pythonskripts (sh. Anhang) aus dem im Kapitel 7.1 beschriebenen bilinear resampelten DHM mit 10m x 10m Auflösung generiert. Statt des einfachen TOPEX wurde „TOPEX to distance“ mit einer Distanz von 1000m berechnet. TOPEX wurde dabei für jede der acht Kardinalrichtungen kalkuliert, diese wurden im Anschluss addiert (sh. Abbildung 28). Die Verteilung der Werte im Ergebnis (sh. Abbildung 29) zeigt, dass die Spitze der Verteilungskurve bei 110 liegt. Auch der Mittelwert aller Werte befindet sich mit 107 in diesem Bereich. Der höchste Wert von 418 befindet sich allerdings weit weg vom potentiellen Maximalwert von 720 für sehr abgeschattete Bereiche (sh. Abbildung 28)**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zeigt außerdem, wie zu erwarten war, eine hohe Exponiertheit im Bereich der Kämme und Gipfel sowie eine hohe Abschattung der Gräben. Die Hänge dazwischen sind meist mäßig exponiert, außer sie werden durch das umliegende Gelände geschützt und abgeschattet.

Topex

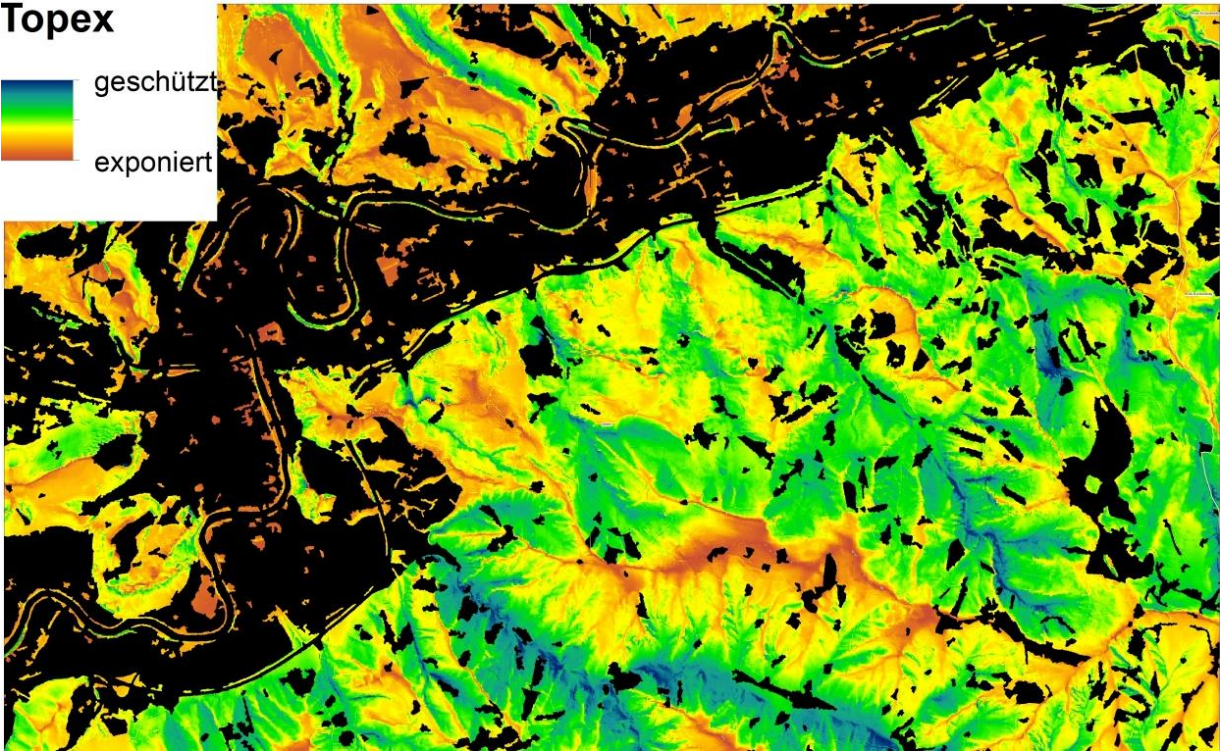
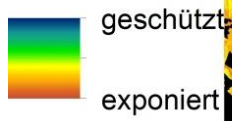


Abbildung 28: Exponiertheit und Abschattung durch das Gelände können durch den TOPEX berechnet werden (Quelle: eigener Entwurf)

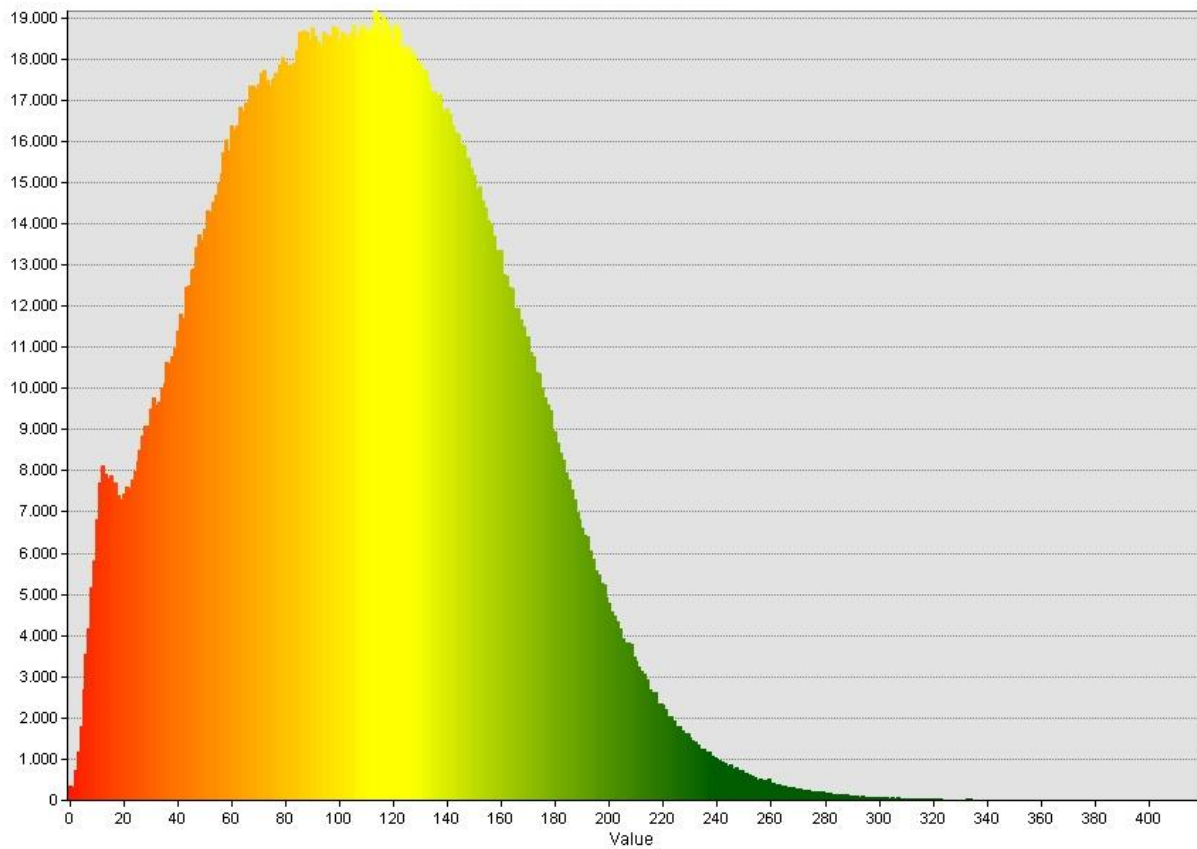


Abbildung 29: Verteilung der TOPEX-Werte im Untersuchungsgebiet. Der Maximalwert liegt bei 418 (Quelle: eigener Entwurf)

7.3 Validierung der Parameter

Bevor die berechneten Modellparameter zu einem Gesamtmodell kombiniert wurden, wurde jeder Parameter auf seine Relevanz für das im Untersuchungsgebiet stattgefundenene Sturmereignis getestet. Dieser Arbeitsschritt wurde durchgeführt, da nicht von vorneherein zu erwarten ist, dass alle in der Literatur als relevant beschriebenen Parameter auch für das konkrete Sturmereignis aussagekräftig sind. Aus diesem Grund wurden die Ausprägungen der Variablen der aus den Luftbildern kartierten Schadflächen (ALS Wald Steiermark Projekt, sh. Kapitel 7.1) mit allen nicht geschädigten Bereichen verglichen (sh. Tabelle 3: Gegenüberstellung der durchschnittlichen Werte von Schadflächen und dem restlichen Gebiet (Quelle: eigener Entwurf) Tabelle 3).

Tabelle 3: Gegenüberstellung der durchschnittlichen Werte von Schadflächen und dem restlichen Gebiet (Quelle: eigener Entwurf)

	Schadflächen	restliches Gebiet
durchschnittliche mittlere Höhe des Bestandes (m)	19,44	11,84
durchschnittlicher Nadelwaldanteil	88,88%	78,27%
Vertikalstruktur		
einstufig	28%	32%
zweistufig	60%	10%
drei- oder mehrstufig	12%	58%
Topex, sehr exponierte Flächen hinter Kante (SWSSO)	25,41%	16,29%
	65,53%	38,40%

Die mittlere Höhe der Bestände lag in den nicht geschädigten Bereichen um ca. 7,5 m niedriger als in den geschädigten Flächen. Das deckt sich mit dem Ergebnis von Brang et al (2006, 28) die feststellten, dass niedrigere Bestände resistenter gegenüber Sturm sind. Der Nadelwaldanteil lag bei den nicht geschädigten Flächen um 10% niedriger als in den Schadbereichen. Auch dieses Ergebnis deckt sich mit Untersuchungen von Indermühle et al (2005, 10), die anmerken, dass 10% bis 20% Buchenbeimischung in der Oberschicht das Risiko erheblich senkt. In den nicht geschädigten Bereichen wiesen 58% der Flächen einen drei- oder mehrstufigen Aufbau auf, während dieser Anteil bei den Schadflächen nur bei 12% lag. Den Unterschied zwischen mehrstufigem, Plenterwald und gleichförmigem Wald wurde auch von Dvořák et al (2001, 447ff) gefunden. Bei ihnen lag der Schaden im gesamten Gebiet in gleichförmigen Beständen dreimal höher als im Plenterwald. Etwas unter 2/3 der Windwurfflächen befanden sich im Einflussbereich einer nach Südwest, Süd oder Südost exponierten Kante, beim Rest der Flächen lag dieser Wert bei unter 40%. Nach der Klassifikation von Wilson 1984 sind 25,41% der Fläche in den Schadbereichen sehr exponiert, während dieser Anteil beim restlichen Gebiet nur bei 16,29% liegt.

Von weitaus größerem Interesse und Nutzen für die Praxis wäre es zu wissen, wodurch sich die Windwurfflächen vom Juli 2015 Schadereignis von ihren nicht geschädigten

unmittelbaren Nachbarn unterscheiden und warum diese unversehrt blieben, obwohl sie räumlich nicht weit entfernt liegen. Als Nachbarn wurden die Bestandspolygone aus dem ALS Wald Steiermark Projekt herangezogen, die sich innerhalb einer Distanz von 50m um die geschädigten Flächen befinden. Die Ergebnisse dieser Gegenüberstellung, bei der Bestandshöhe, Nadelwaldanteil und Vertikalstruktur ebenfalls getrennt betrachtet wurden, sind in Tabelle 4 dargestellt.

Tabelle 4: Gegenüberstellung der durchschnittlichen Werte von Schadflächen und ihren nicht geschädigten Nachbarn (Quelle: eigener Entwurf)

	Schadflächen	Nachbarbestände
durchschnittliche mittlere Höhe des Waldes (m)	30,62	28,27
durchschnittlicher Nadelwaldanteil	82,83%	76,92%
Vertikalstruktur		
einstufig	22%	18%
zweistufig	55%	49%
drei- oder mehrstufig	12%	33%

In den Bereichen um die Windwurfflächen war die durchschnittliche mittlere Höhe des Bestandes leicht niedriger, der Höhenunterschied ist mit ca. 2,5m allerdings eher gering. Beim Nadelwaldanteil gibt es einen Unterschied von knapp 6% und der Anteil an drei- oder mehrstufig aufgebautem Wald fällt höher aus. Zusammengefasst lässt sich sagen, dass eine leichte Tendenz dahin zeigt, dass Bestände eher stehen blieben, wenn sie niedriger sind, einen geringeren Nadelwaldanteil aufweisen oder drei- oder mehrstufig aufgebaut sind. Diese Ergebnisse decken sich mit den bereits erwähnten Untersuchungen (sh. Kapitel 4.3). Aus diesem Grund werden alle Variablen für die Berechnung der Gesamtvulnerabilität herangezogen und keine aufgrund ihrer Irrelevanz im gewählten Untersuchungsgebiet ausgeschlossen.

7.4 Gesamtvulnerabilität

Da nicht ein Modellparameter alleine, sondern das Zusammenwirken aller Parameter die Vulnerabilität von Waldbeständen gegenüber Sturmschäden beeinflussen, ist es notwendig, die einzelnen Parameter zu einem Gesamtmodell zusammenzuführen. Wie aus dem im Kapitel 4.3 dargestellten Grundlagen ersichtlich ist, haben nicht alle Parameter den gleichen Einfluss auf die Vulnerabilität. Deshalb wurde für die Berechnung der Gesamtvulnerabilität eine Gewichtung der Einzelparameter vorgenommen.

7.4.1 Gewichtung

Die in dieser Arbeit vorgenommene Gewichtung wurde wissensbasiert auf Basis der Grundlagenliteratur erstellt und im Rahmen eines persönlichen Gespräches mit Gerhard

Pelzmann, Geschäftsführer des steiermärkischen Forstvereins, adaptiert (Gespräch am 17.11.2017). Die höchste Gewichtung fällt den exponierten Kanten zu, da nur dann Schäden zu erwarten sind, wenn der Wind in den Bestand eindringen kann. Sind die Kanten nicht exponiert, kommt es nach Pelzmann, unabhängig von der durchschnittlichen Bestandeshöhe, nur in den seltensten Fällen zu einer Schädigung. Am zweithöchsten wurde der Nadelwaldanteil gewichtet, gefolgt von der mittleren Höhe des Bestandes, der topografischen Exponiertheit und der Vertikalstruktur. Die Faktoren, die Datengrundlage für die Berechnung und die jeweilige Gewichtung waren, sind in Abbildung 30 dargestellt.

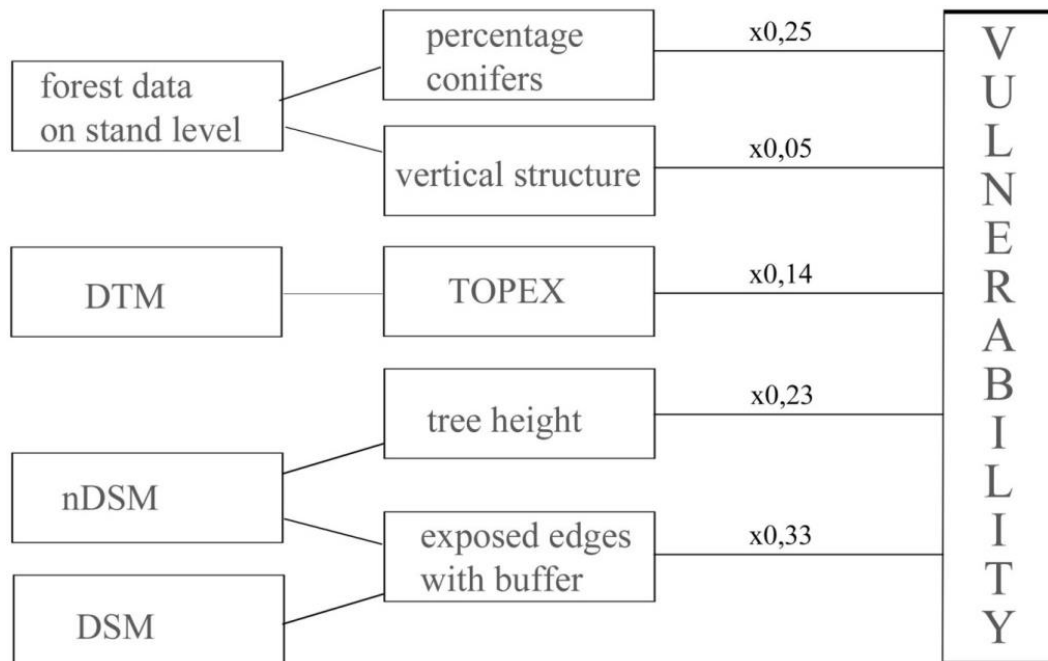


Abbildung 30: Gewichtung der Faktoren für die Gesamtvulnerabilität (Quelle: eigener Entwurf)

7.4.2 Normierung/Standardisierung

Die Gewichtung der Einzelparameter ist nicht einfach durch die Multiplikation der Parameterausprägungen mit dem Gewichtungsfaktor möglich, da die einzelnen Parameter verschiedene Werteskalen und Ausprägungen haben (sh. Tabelle 5), die bei einer direkten Kombination der Werte zu einer ungewollten zweiten Gewichtung führen würden. Um diese Daten miteinander kombinieren zu können, müssen sie zuerst skaliert bzw. normiert werden.

Tabelle 5: Ausprägung der Parameter (Quelle: eigener Entwurf)

	Minimum	Maximum (pot. Max)
mittlere Höhe des Bestandes	0	50
Nadelwaldanteil	0	100
TOPEX	0	418 (720)
Ausprägungen		
Vertikalstruktur	1,2,3	
Puffer hinter Kanten	1-8 (je nach Szenario)	

Im Rahmen dieser Arbeit wurden zwei Methoden zur Normierung/ Standardisierung der Parameter getestet (vgl. Enzinger o.A. und Lohninger 2012). Diese wurden anschließend verglichen und analysiert. Bei den gewählten Methoden handelt es sich um die z-Standardisierung und die Skalierung auf Werte von 1 bis 100. Zusätzlich zu den verschiedenen Wertespannen liegt die Herausforderung auch in den unterschiedlichen Skalenniveaus: mittlere Höhe des Bestandes, Nadelwaldanteil und TOPEX sind nominal skaliert, während Vertikalstruktur und die Pufferbereiche hinter den Kanten ordinal skaliert sind. Eine Standardisierung einer Ordinalskala ist nur dann erlaubt wenn die Rangordnung der Werte erhalten bleibt (Möhring und Schlütz 2013, 32). Das bedeutet der höchste Wert muss auch nach der Standardisierung noch der höchste sein, der zweithöchste der zweithöchste usw.

Z-Standardisierung

Als erste Methode wurde die z-Standardisierung getestet. Durch Subtraktion des Mittelwertes von jedem Einzelwert und der anschließenden Division durch die Standardabweichung werden die Werte so „skaliert“, dass der Mittelwert 0 und Standardabweichung 1 sind (sh. Formel 1).

Formel 1: z-Standardisierung

$$x_{zStd} = \frac{x - mean()}{std()}$$

Diese Methode zeigt, ob ein Wert relativ zur Verteilung der gesamten Werte als hoch oder niedrig einzustufen ist. Die Form der Verteilung wird dabei nicht verändert. Allerdings hängen die Werte vom Mittelwert und der Standardabweichung des jeweils gewählten Gebiets ab. Das bedeutet, dass ein direkter Vergleich der Werte von unterschiedlichen Gebieten nur eingeschränkt möglich ist und damit die Übertragbarkeit nicht gewährleistet ist.

Skalierung der Werte von 0 – 100

Als zweite Methode wurde die Skalierung der Werte auf 1 bis 100 gewählt. Dabei wird jeder Wert durch den Maximalwert dividiert und anschließend mit 100 multipliziert (sh. Formel 2). Als Ergebnis dieser Standardisierungsmethode ist der Minimalwert 0 und der Maximalwert 100. Die anderen Werte werden dazwischen aufgespreizt. Ein Nachteil dieser Methode ist, dass das Vorhandensein von Ausreißern das Ergebnis stark verfälscht. Auch diese Methode ist nicht übertragbar, da auf den jeweiligen Maximalwert eines Gebietes normiert wird.

Formel 2: Skalierung auf 0 bis 100

$$x_{100Std} = \frac{x}{max()} * 100$$

Um dennoch eine Übertragbarkeit zu ermöglichen, wird vorgeschlagen, die Werte nicht auf den höchsten Wert im Untersuchungsgebiet, sondern auf den potentiellen Maximalwert des

jeweiligen Parameters zu skalieren, wenn dieser höher ist als der Maximalwert im Untersuchungsgebiet (sh. Tabelle 5). Dadurch ist diese Standardisierungsmethode bei gleicher Datengrundlage auf jedes Gebiet übertragbar. Dafür müssen aber die (potentiellen) Maximalwerte Tabelle 5 verwendet werden, auch wenn die im Gebiet auftretenden Maximalwerte möglicherweise geringer sind. Allerdings wird dadurch je nach Datengrundlage unter Umständen der mögliche Wertebereich nicht voll ausgenutzt.

Bei der mittleren Höhe des Bestandes, dem Nadelwaldanteil und den Puffern hinter den Kanten stehen die höheren Werte jeweils für eine höhere Gefährdung bzw. geringere Stabilität. Beim TOPEX und der Vertikalstruktur ist es jedoch genau umgekehrt, sodass bei diesen zwei Datensätzen ein Umkehren der Werteskala vorgenommen werden musste, bevor sie in die Gesamtvulnerabilität (sh. Abbildung 31) einfließen konnten. Die Gesamtvulnerabilität wird durch eine Addition der gewichteten Variablen bewertet. Sie wurde zweimal, einmal mit den z-standardisierten und einmal mit den von 1 bis 100 normierten Werten durchgeführt. Das Ergebnis wurde jeweils in fünf Stabilitätsklassen eingeteilt und die beiden Methoden verglichen.

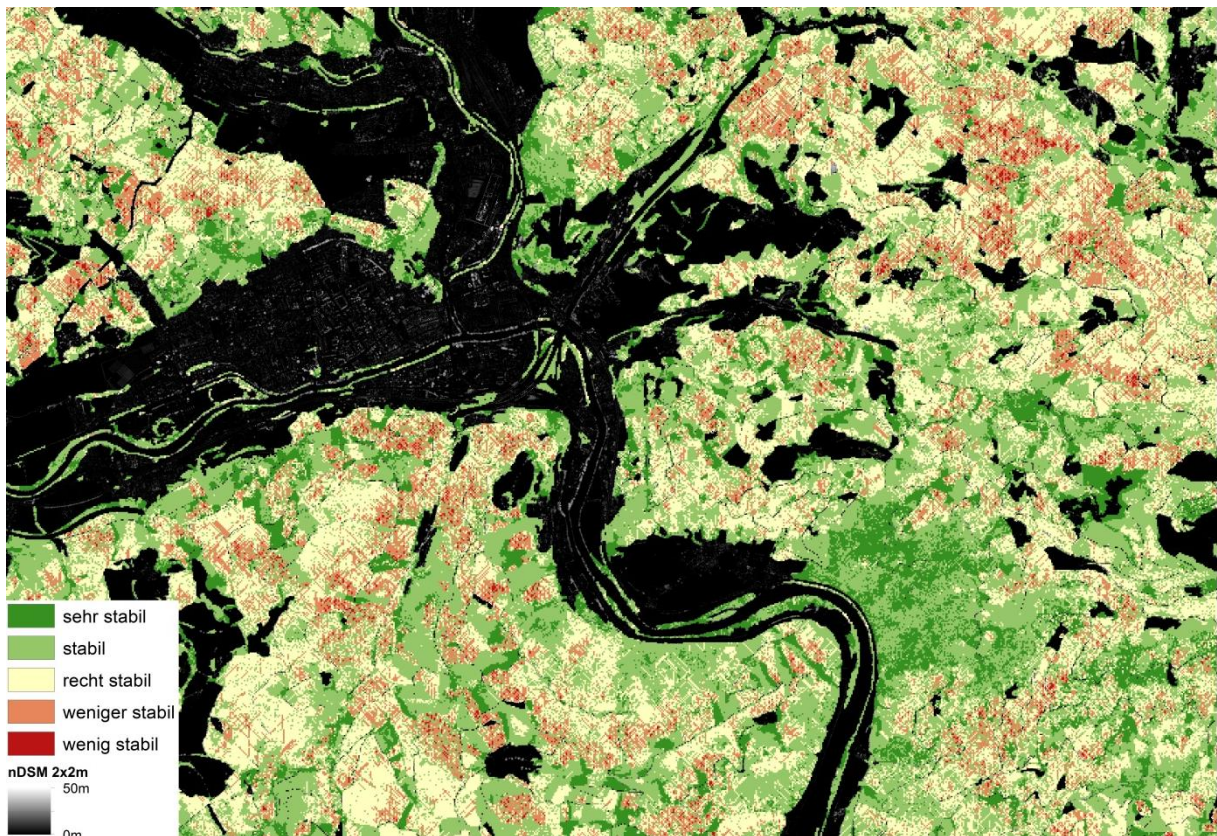


Abbildung 31: Ausschnitt der Gesamtvulnerabilität für den Wald (mit Standardisierung 1 bis 100; Quelle: eigener Entwurf)

7.4.3 Vergleich Standardisierungsmethoden und Klassenbildungen

Die abgeleitete Gesamtvulnerabilität, so wie sie in Abbildung 31 dargestellt ist, kann nicht ohne weiteres validiert werden, da Daten zu Windwurfschäden nur für den Gewittersturm vom 8. Juli 2015 vorliegen. Für ihn wurde die Windrichtung von Südwest bis Südost aus den Luftbildern rekonstruiert (sh. Kapitel 7.1). Aus diesem Grund wurde eine zweite Vulnerabilitätsberechnung genau für diesen Sturm durchgeführt. Dabei wurden bei den Kanten und beim TOPEX nur die Kardinalrichtungen Südwest bis Südost verwendet und die Datenstandardisierung entsprechend angepasst. Die potentiellen Maximalwerte für die Skalierung von 0 bis 100 liegen beim TOPEX somit bei 270 und für die Puffer bei 3 weil nur drei Windrichtungen verwendet wurden. Für das Sturmszenario wurden die zwei in Kapitel 7.4.2 vorgestellten Standardisierungsmethoden verglichen und analysiert. Die Verteilung der Pixel nach Klassen als Vergleich der zwei gewählten Standardisierungsmethoden ist in Abbildung 32 dargestellt. Die Werte wurden entsprechend ihrer Gesamtvulnerabilität in fünf Klassen mit jeweils gleicher Wertespanne eingeteilt, die folgendermaßen definiert sind: Pixel in der ersten Klasse sind laut Modell sehr stabil, in der zweiten Klasse stabil, in der dritten Klasse recht stabil und die Pixel in der vierten und fünften weniger bzw. wenig stabil. Von der Verwendung einer größeren Klassenanzahl wurde aus Gründen der Übersichtlichkeit abgesehen. Zudem sind die zu erwartenden Unterschiede bei einer geringen Klassenanzahl größer und die Ergebnisse des Vergleichs aussagekräftiger.

Abbildung 32 zeigt, dass generell die Verteilung der Klassen trotz unterschiedlicher Standardisierungsmethoden recht ähnlich ist. Die meisten Pixel sind in der zweiten, stabilen Klasse zu finden, gefolgt von der dritten, recht stabilen. In der fünften Klasse und somit der „höchsten Gefährdungsstufe“ ist die Anzahl der Pixel am geringsten. Bei der Normierung von 1 bis 100 sind 12,6% in den Klassen (4 und 5) mit der geringsten Stabilität zu finden, bei der z-Standardisierung sind es hingegen nur 9,1%. Mehr als die Hälfte des Waldes, nämlich 54,5% (Normierung 1 bis 100) bzw. 55,9% (z-Standardisierung) wurde als stabil bis sehr stabil klassifiziert. Immerhin fallen 32,9% (Normierung 1 bis 100) bzw. 35% (z-Standardisierung) damit in die mittlere, recht stabile Klasse. Abbildung 32 zeigt auch, dass die Skalierung der Werte von 0 bis 100 eine „flachere Verteilung“ der Klassen mit weniger Pixel in der zweiten und dritten Klasse aufweist als die z-Standardisierung. Die Ergebnisse sind plausibel, da zu erwarten war, dass der Großteil der Bäume weder sehr gefährdet noch sehr stabil ist. Der Anteil an der Klasse 5 scheint verschwindend gering. Aus diesem Grund wurden auch die Klassen 4 und 5 gemeinsam als am gefährdetsten betrachtet.

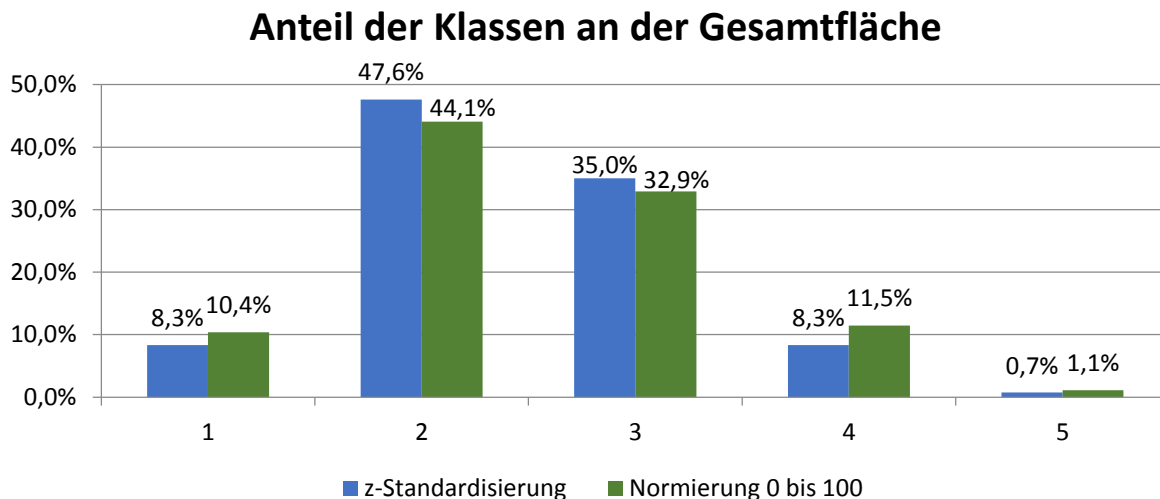


Abbildung 32: Verteilung der Klassen für die verschiedenen Standardisierungsmethoden (Quelle: eigener Entwurf)

8 Validierung der Ergebnisse

Für die Validierung wurden die Schadflächen des Windwurfereignisses vom 8. Juli 2015 mit dem Ergebnis verschnitten. Unsichere Windwurfflächen und Flächen unter 100m² (=1 Pixel) wurden von der Validierung ausgeschlossen. Für die Beurteilung der Ergebnisse sowie die Bewertung der angewandten Standardisierungsmethoden wurden die geschädigten und nicht geschädigten Flächen für die verschiedenen Standardisierungsmethoden verglichen. Die Klassenverteilungen sind in Abbildung 33 gegenübergestellt. In grün sind jeweils die unbeschädigten und in rot die geschädigten Flächen pro Klasse dargestellt. Die meisten unbeschädigten Bereiche der Luftbilddauswertung befinden sich bei beiden Standardisierungsmethoden in der zweiten, stabilen Klasse. Wie zu erwarten war, liegt bei beiden Methoden der Anteil der nicht geschädigten Flächen in Klasse 1 und 2 am höchsten und der Anteil an geschädigten Flächen ist in Klasse 4 und 5 höher als der der unbeschädigten. Bei den zwei Standardisierungsmethoden waren 9% (z- Standardisierung) bzw. 12% (Normierung auf 1 bis 100) der Gebiete ohne Schaden vom Modell als wenig bis wenig stabil (4 und 5) eingestuft worden.

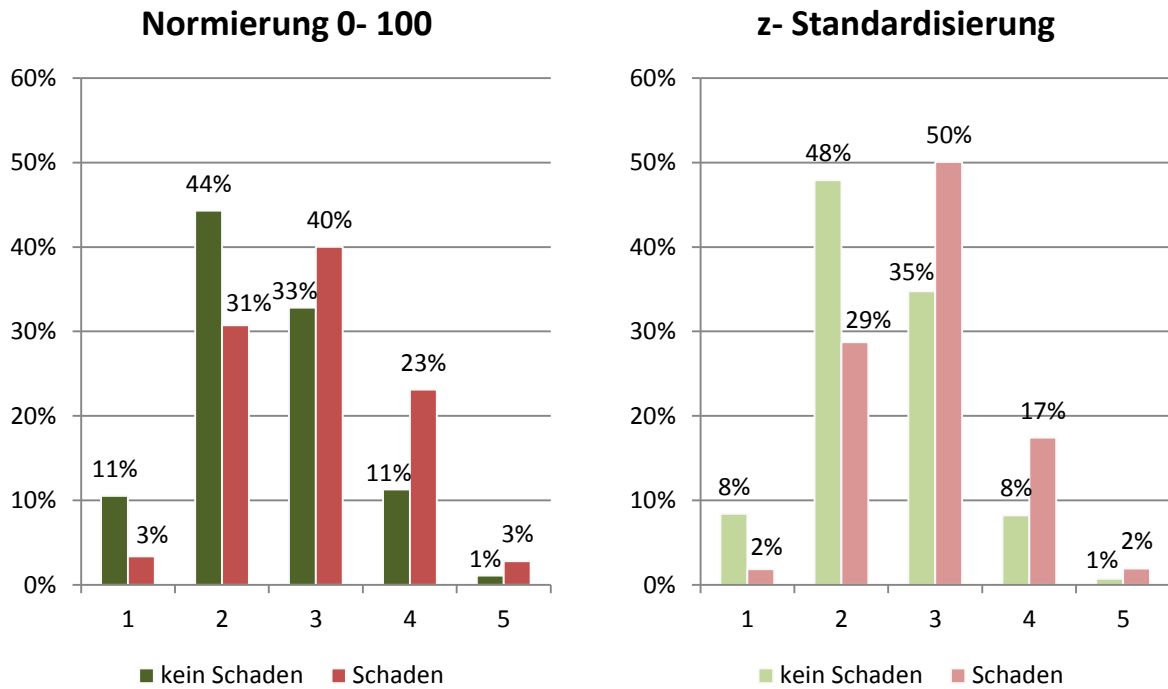


Abbildung 33: Vergleich der Klassenverteilungen nach Standardisierungsmethode (Quelle: eigener Entwurf)

Eine perfekte Vorhersehbarkeit des Schadens durch ein Modell würde dann vorliegen, wenn bei den Schadflächen alle Pixel in den unteren Stabilitätsklassen liegen würden und bei den nicht geschädigten Bereichen alle Pixel in den oberen Stabilitätsklassen zu finden wären. Allerdings werden bei einem Sturm nie alle „instabilen Bereiche“ fallen. Denn es braucht zusätzlich zu einer erhöhten Risikodisposition auch entsprechend starke Windböen. Außerdem verändert ein umgefallener Baum und/oder Bestand die Situation für alle Nachbarn. Sind diese der sich daraus ergebenden Situation nicht gewachsen, was oft der Fall ist, so fallen sie ebenfalls um. Auch im Fallen können Bäume umliegende Bäume mitreißen, die dem Wind sonst standgehalten hätten. Im Prinzip bildet das hier entwickelte Stabilitätsmodell nur den Zustand eines Augenblicks ab und alle Veränderungen während des Sturms und die sich daraus ergebenden Risiken können nicht erfasst werden. Aus diesem Grund müssen bei Modellierungen der Gefährdung durch Wind nicht alle gefallenen Bereiche „instabil“ gewesen sein und nicht alle stabilen Bereiche ohne Schaden gewesen sein. Es sollte aber ein Trend sichtbar sein und wenig stabile Bestände stärker geschädigt worden sein.

Für die Abbildung 34 wurden die Bereiche mit Schaden aus der Abbildung 33 herausgegriffen und die Anteile der beiden Standardisierungsmethoden direkt gegenübergestellt. Bei dieser direkten Gegenüberstellung des Anteils der einzelnen Klassen an den Schadflächen (sh. Abbildung 34) spiegeln sich die bereits erwähnten Unterschiede der Stabilitätsverteilung bei den verschiedenen Standardisierungsmethoden wider. 26% (23% Klasse 4 und 3% Klasse 5; Normierung 1 bis 100) bzw. 19% (17% Klasse 4 und 2% Klasse 5; z-Standardisierung) der Bereiche, die fielen, wurden auch im Modell als wenig stabil eingestuft (in Abbildung 34

Klasse 4 und 5 zusammen). Die meisten Schadpixel befinden sich bei beiden Methoden in der mittleren Klasse. Geschädigt wurden aber auch 3% (Klasse 1; Normierung 1 bis 100) bzw. 2% (Klasse 1; z-Standardisierung), die als sehr stabil eingestuft wurden sowie 31% (Klasse 2; Normierung 1 bis 100) bzw. 29% (Klasse 2; z-Standardisierung) der Flächen die im Modell als stabil bezeichnet wurden.

Anteil der Klassen an den Schadflächen

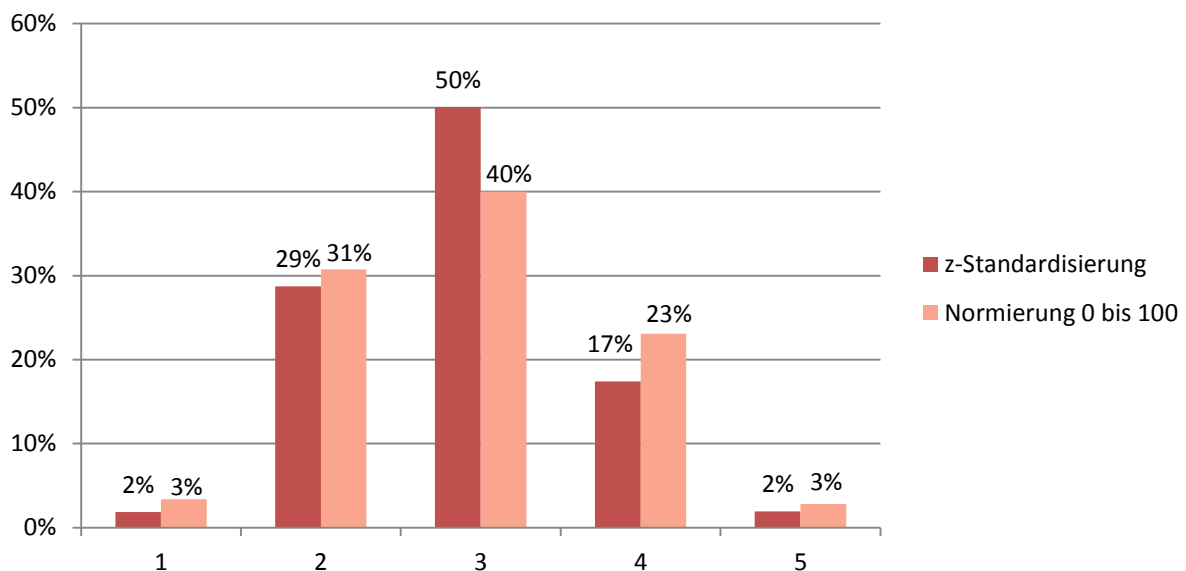


Abbildung 34: Schadflächen nach Klassen und Standardisierungsmethode (Quelle: eigener Entwurf)

8.1 Diskussion der Ergebnisse und Verbesserungsmöglichkeiten

Für beide Standardisierungsmethoden wurde überprüft, wie hoch der Anteil der wenig stabilen Bereiche, die geworfen wurden, im Vergleich zu den stabilen Bereichen, die dem Sturm nicht standhielten, war. Im gesamten Gebiet wurden, wie bereits erwähnt, 1,6% des Waldes vom Wind geschädigt. Dabei wurden in den als wenig stabil (4 und 5) eingestuften Gebieten 3,2% (Normierung 0-100) bzw. 3,3% (z-Standardisierung) der Flächen geschädigt während es bei den als „sehr bis recht stabil“ (1 bis 3) eingestuften Waldgebieten nur 1,3% (Normierung 0-100) bzw. 1,4% (z-Standardisierung) waren (sh. Abbildung 35). Von den instabilen Gebieten wurden daher bei beiden Standardisierungsmethoden prozentuell mehr als doppelt so viele Bereiche geworfen als von den sehr bis recht stabilen Bereichen. In den Gebieten wo kaum Schaden erwartet worden war (1 bis 3) entfallen mit 0,7% (Normierung 0-100) bzw. 0,9% (z-Standardisierung) mehr als die Hälfte der Schadpixel in die dritte recht stabile Klasse die die Übergangsklasse zu den wenig stabilen Klassen darstellt.

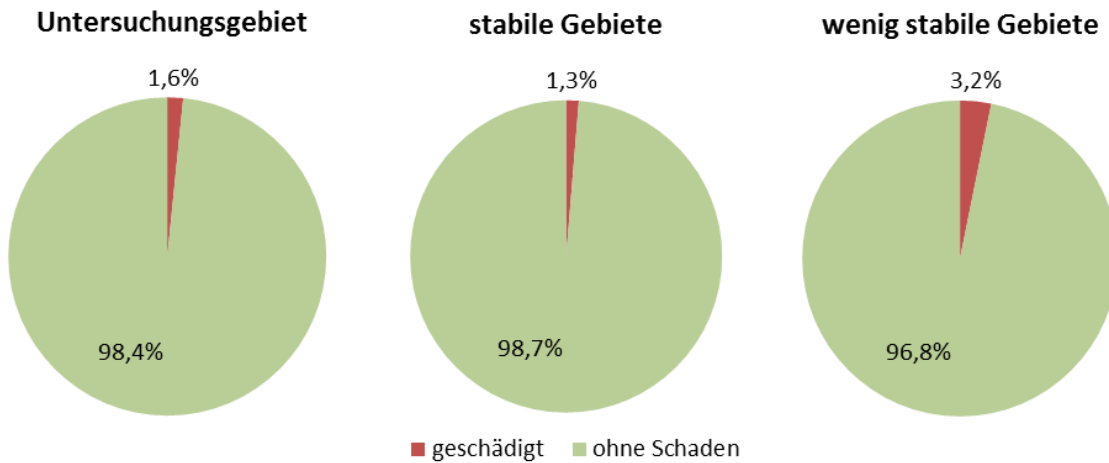


Abbildung 35: Vergleich des Schadens im gesamten Gebiet mit dem Schaden in den als stabil (1-3) und weniger stabil (4-5) eingestuften Gebieten (Standardisierungsmethode Normierung von 1 bis 100; Quelle: eigener Entwurf).

Durch den Sturm wurde also nur ein Bruchteil der instabilen Bereiche tatsächlich geschädigt. Allerdings darf geringe Stabilität nicht mit Schaden gleichgesetzt werden. Denn selbst instabile Bereiche brauchen einen Impuls durch den Wind, damit Schaden auftritt. Bei dem recht geringen Gesamtschadigungsgrad von weniger als 1,6% weisen die als gefährdet eingestuften Bereiche wie erwartet einen höheren Schädigungsgrad auf. Das Modell vermag also die Schäden bei unterschiedlicher Stabilität gut abzubilden. Allerdings sollte es noch mit Daten von anderen Stürmen validiert werden. Dazu zählen weitere Sommerstürme, aber im besonderen Winter- und Föhnstürme, um die Verwendbarkeit des Modells bei anderen Windbedingungen zu testen und auf Plausibilität zu prüfen.

Rein aus dieser Analyse heraus und der Validierung anhand eines konkreten Sturmereignisses, lässt sich nicht sagen, dass eine der beiden Standardisierungsmethoden dezidiert besser wäre als die andere. Aufgrund der möglichen Übertragbarkeit wird für die Zukunft aber eine Normierung der Werte auf den potentiellen Maximalwert empfohlen. Deshalb wurden auch im Rahmen dieser Arbeit alle weiteren Analysen nur noch für diese Standardisierungsmethode durchgeführt.

Da für die Schadflächen auch der Schädigungsgrad geschätzt in Prozent vorlag, wurde untersucht, ob der Schädigungsgrad mit der Gefährdung der Flächen zusammenhängt. Also ob instabilere Bereiche stärker geschädigt wurden als stabile. Dazu wurde geprüft, ob die Flächen mit einem Schädigungsgrad von 20% oder weniger im Modell als weniger gefährdet ausgewiesen wurden. Dabei wurde jedoch kein Unterschied festgestellt. Der Schädigungsgrad korreliert auch nicht mit den im Modell verwendeten einzelnen Erklärungsvariablen. Eine genauere Validierung wäre möglich, wenn zu dem jeweiligen Sturmereignis nicht nur die geschädigten Flächen, sondern auch das Windfeld während des Sturmes bekannt wäre. Dadurch könnte untersucht werden, ob der Grad der Schädigung mit der Stärke der Böen zusammenhängt. Dazu bräuchte es kleinräumige Daten zur Böengeschwindigkeit, nicht nur zur Windrichtung, am Tag des Sturms und nicht 20-jährliche 2-Sekunden andauernde Böen.

Zur Überprüfung der Plausibilität des Modellierungsansatzes wurde für das zuvor erwähnte Szenario die Modellierung mit Puffern der gegenüberliegenden Kanten und der entsprechenden Exposition beim TOPEX wiederholt (Nordwest bis Nordost). Es wird also getestet, ob sich die Modellierungsergebnisse signifikant unterscheiden, wenn der Wind entgegen der während des Sturmes vorherrschenden Windrichtung kommen würde (sh. Abbildung 36 und Abbildung 37). Es stellte sich jedoch heraus, dass sich die Modellierungsergebnisse bei der hier verwendeten Pufferlänge und Gewichtung sehr stark ähneln (sh. Abbildung 36). Das scheint sich aus dem geringen Einfluss des TOPEX und der hohen Überlappung der Kanten für den südlichen und dem nördlichen Bereich zu ergeben (sh. Abbildung 37). Ein Grund hierfür könnte in der Tatsache gesehen werden, dass das Gelände und die Waldgebiete in der Steiermark sehr kleinstrukturiert sind und daher die gewählte Pufferlänge von 100m zu groß ist oder aber eine Gewichtung anhand der Distanz zur Kante bei den Puffern sinnvoll wäre.

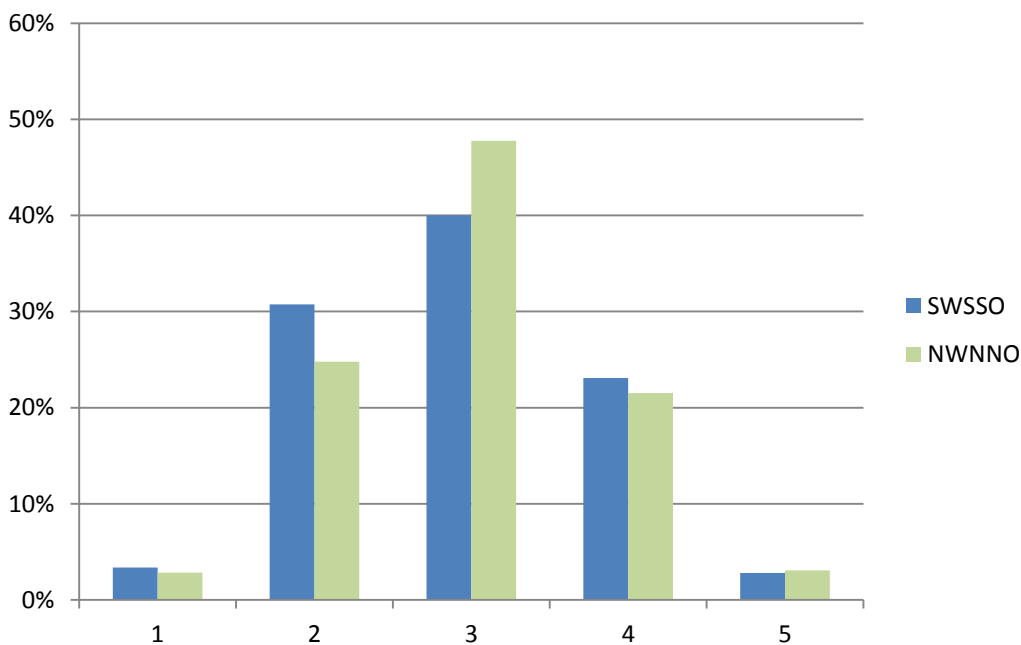


Abbildung 36: Vergleich der Klassifikation der Schadflächen bei unterschiedlicher Gewichtung der Kanten und des TOPEX (Quelle: eigener Entwurf).

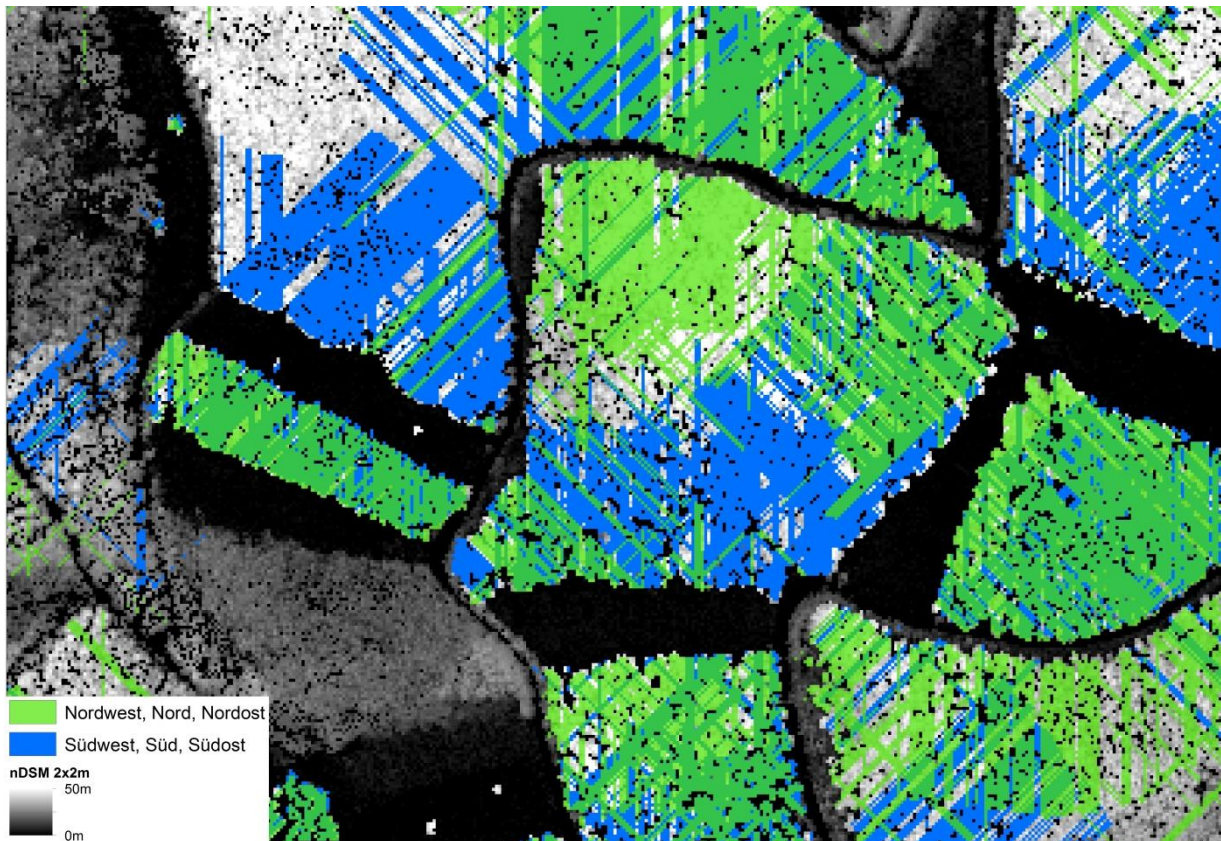


Abbildung 37: Durch die Kleinstrukturiertheit des Waldes ergibt sich teils eine komplette Überlappung der Puffer von entgegengesetzten Himmelsrichtungen (Quelle: eigener Entwurf).

Weitere Unsicherheiten können sich dadurch ergeben, dass, die Parameter waldbauliche Eingriffe, Wasserhaushalt und Säurezustand nicht inkludiert werden konnten, da hierzu keine Informationen vorlagen. Diese wurden allerdings in der Literatur durchgehend als wichtig für die Stabilität erwähnt. Auch der Wind wurde nur indirekt berücksichtigt, indem die Windrichtung aus den gefallen Bäumen im Luftbild rekonstruiert wurde. Um den Wind genauer inkludieren zu können sind genauere Messungen der Windgeschwindigkeit notwendig, um die Verwirbelungs- und Kanalisationseffekte besser zu verstehen und den Wind entsprechend simulieren bzw. zwischen den Messstationen interpolieren zu können.

Trotz der erwähnten Schwächen und Defizite stellt das entwickelte Modell einen guten Startpunkt dar, aus dem mit entsprechenden Daten und durch Validierung ein Werkzeug entstehen kann, welches Förstern hilft, Bereiche im Wald zu identifizieren, die durch ihre Instabilität und Exponiertheit stärker gefährdet sind. In diesen Gebieten könnte dann nach einer Beurteilung vor Ort Maßnahmen zur Mitigation (sh. Kapitel 4.4) getroffen werden, welche die Stabilität erhöhen und den potentiellen Schaden minimieren. Nicht vergessen werden sollte dabei, dass kein Modell eine zuverlässige Vorhersage für ein Extremereignis liefern kann (u.a. Schelhaas 2008). Wenn ein gewisser Schwellwert bei der Windgeschwindigkeit erreicht wird, „fällt alles“ und es macht keinen Unterschied, ob der Bestand aufgrund von Standort- oder Bestandsfaktoren als gefährdet oder stabil eingestuft wurde.

8.2 Einfluss der einzelnen Parameter auf die Stabilität

Mit Szenarien „Was wäre wenn“ soll gezeigt werden, bei welchen Parametern im vorgestellten Modell die Möglichkeit für eine Stabilitätserhöhung des Waldes am größten sind. Für diese Szenarien wurden die einzelnen Variablen umkodiert und verändert um die Auswirkungen dieser Veränderung zu untersuchen. Wird Nadelwaldanteil bei allen Beständen auf maximal 80% limitiert und somit eine Durchmischung von mindestens 20% forciert, so nimmt der Anteil der wenig stabilen Flächen um fast die Hälfte ab. Ein flächiges Umwandeln aller einstufigen Wälder in zweistufige Wälder würde hingegen nur fünf Hundertstel der Fläche zu sehr stabilen bis recht stabilen Bereichen machen. Wenn es gar keine Kanten mehr gäbe, die einen Traufkantenwinkel von 75° oder steiler haben, so würden keine Bestände mehr in die Kategorie wenig stabil fallen und auch die recht stabilen Bereiche würden zugunsten der sehr stabilen bis stabilen abnehmen.

Besonders für topographisch exponierte Flächen empfiehlt es sich also, den Nadelwaldanteil zu senken und nicht so zu schlägern bzw. zu bewirtschaften, dass exponierte Kanten entstehen. Diese Ergebnisse stimmen mit jenen von Pasztor et al (2015, 12) überein, die allerdings zusätzlich erwähnen, dass vorhergegangene Störungen durch Borkenkäfer und Schnee das Risiko von Windschäden heraufsetzen, was in dieser Arbeit nicht berücksichtigt werden konnte. Eine Stabilitätserhöhung von instabilen Beständen senkt auch das Risiko für stabile Bestände, denn wenn die gefährdeten Bereiche stehen bleiben kommt es zu keiner Veränderung der Windbelastung für die umliegenden Bestände.

9 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Modell entwickelt, welches durch Gewichtung relevanter Faktoren den Wald in stabile bis wenig stabile Bereiche gliedert. Die Wahl der Faktoren und die Gewichtung erfolgten wissenschaftlich anhand der Literatur und Expertenwissen. Bei der Kantendetektion wurde eine neue Methode entwickelt. Diese schafft es sehr gut, sowohl Kanten am Rand als auch innerhalb des Bestandes zu detektieren. Bei der Verwendung dieser Methode bei einer stark strukturierten Topographie mit steilen Gräben und Hängen sollte vor der Verwendung überprüft werden ob nicht eine Anpassung der Pufferlänge notwendig ist, damit sie sich nicht auf der anderen Seite von Bergkämmen fortsetzen.

Für die Standardisierung der Vulnerabilitätsvariablen wurden zwei Methoden getestet und verglichen und anschließend, aufgrund der Übertragbarkeit, die Normierung von 1 bis 100 und nicht die z-Standardisierung empfohlen. Die Validierung der Ergebnisse wurde mit den auf der Basis von Luftbildern kartierten Sturmflächen eines Sommergewitters vom 8. Juli 2015 durchgeführt. Bei den geschädigten Bereichen waren dabei der Anteil der als instabil eingestuften Bestände größer. Die in der Modellierung als instabil eingestuften Bereiche können als Schwerpunktgebiete für Sturmanfälligkeit betrachtet werden. Das bedeutet, dass Forstbetriebe und Waldbesitzer in diesen Gebieten vor Ort über Maßnahmen entscheiden können. Maßnahmen setzen, bedeutet vorbeugen und aktiv die Stabilität direkt über die Bestandsfaktoren und indirekt über eine an den Standort angepasste Bestockung erhöhen. Die Eingrenzung der Flächen durch das Modell vereinfacht die Auswahl der Flächen die genauer betrachtet werden müssen.

Die Szenarien „Was wäre wenn der Nadelwandanteil niedriger wäre, es weniger Kanten gäbe,...“ zeigen, dass der Förster durch Waldbau das Risiko mit den geeigneten Maßnahmen sehr stark minimieren kann. Die Literatur zeigt jedoch, dass, wenn Windböen einen gewissen Wert überschreiten, die Bestands- und Standortfaktoren kaum eine Rolle mehr spielen (u.a. Schelhaas 2008). Spannend wäre es herauszufinden, nicht nur wie und wie viele instabile Bestände der Förster durch Maßnahmen vor Schaden bewahren kann, sondern auch welche Auswirkungen diese Veränderung auf die stabilen Bestände hat. Denn wenn die gefährdeten Bereiche während des Sturms stehen bleiben, ergibt sich für die Nachbarbestände keine Veränderung des einwirkenden Windes.

Für die großflächige Anwendung in der Praxis ist es notwendig, die Tauglichkeit des Modells mit weiteren Stürmen zu testen und zu validieren. Dabei wäre es sinnvoll, auch einen Wintersturm oder einen Föhnsturm zu berücksichtigen. Als Wintersturm würde sich dabei „Herwart“ anbieten, der am 29.10.2017 im Nordosten der Steiermark flächige Windwürfe verursachte und als Föhnsturm „Yves“, der am 11.12 und 12.12.2017 im Südwesten der Steiermark mit Sturmböen großflächig Bäume umwarf. Durch die Verwendung weiterer Sturmereignisse könnte das Modell verbessert und sichergestellt werden, dass es auch für andere Arten von Stürmen und Stürme ganz generell verwendbar ist.

Ist das Modell auf diese Weise optimiert und weitreichend getestet und validiert worden, gibt es eine Reihe von Möglichkeiten, um es fortzuführen. Dabei spielt die Aktualität der Daten eine wesentliche Rolle. So könnten zum Beispiel neue Kanten, die durch Sturmschäden, Straßenbau oder Schlägerungen entstanden sind, mit Sentinel 2 Daten detektiert und damit die aus den Laserscannerdaten abgeleiteten Informationen aktualisiert werden. Sollte dieses mit Sentinel 2 Daten möglich sein, könnten in Zukunft auch Auswirkungen durch Auslichtungen eingebunden werden. Etwas komplexer wäre wohl die Einbindung des Wachstums der Bäume. Eine Modellierung der Entwicklung der Bestandeshöhe zur Aktualisierung der Daten ist aber schwierig, da dies von einer Fülle von Standortfaktoren abhängt, die flächenhaft nicht zur Verfügung stehen. Essentiell für eine genauere Repräsentation der Stabilität ist darüber hinaus die kleinräumige Information über die vorherrschende Windrichtung. Durch sie könnten die Kanten mit ihren Puffern und auch der TOPEX entsprechend der Realität gewichtet werden. Generell würde ein besseres Verständnis von Strömungen, Verwirbelung bzw. Kanalisationseffekten helfen, die Rolle, die der Wind spielt, zu verstehen und diese entsprechend zu berücksichtigen. In Österreich wurden Methoden zur Windmodellierung zum Beispiel im Projekt BEAUVORT (Bessere Wind Energie Ausnutzung – Verortung der Windgefährdung) der ZAMG entwickelt. Dabei wurden auf einem 1x1 km Raster für ganz Österreich unter anderem die 2-Sekunden-Mittel der Windgeschwindigkeit mit einer Jährlichkeit von 50 Jahren berechnet (ZAMG 2010).

Zusammenfassend kann man sagen, dass die als relevant beschriebenen Faktoren alle aus Fernerkundungsdaten extrahiert oder berechnet werden können. Dies erlaubt eine großflächige Bewertung eines beliebigen Gebietes wenn die entsprechenden Daten verfügbar sind. Mit dem in dieser Arbeit vorgestellten Modell wurde ein guter Grundstein für eine flächendeckende Stabilitätsbeurteilung des Waldes in der Steiermark gelegt. Das Modell muss noch durch die Untersuchung mit weiteren Stürmen validiert werden und auf der Grundlage der neuen Erkenntnisse erweitert und verbessert werden.

Quellen

- Albrecht A, Hanewinkel M, Bauhus J, Kohnle U (2012): How does silviculture affect storm damage in forests of south-western Germany?: Results from empirical modeling based on long-term observations. *European Journal of Forest Research* 131:229–247.
- Amt der steiermärkischen Landesregierung (Hrsg. ; 2016): 25. Umweltschutzbericht 2014/15
- Ancelin P, Courbaud B, Fourcaud T (2004): Development of an individual tree-based mechanical model to predict wind damage within forest stands. *Forest Ecology and Management* 203:101–121.
- Bebi P, Seidl R, Motta R, Fuhr M, Firm D, Krumm F, Conedera M, Ginzler C, Wohlgemuth T, Kulakowski D (2017): Changes of forest cover and disturbance regimes in the mountain forests of the Alps. *Forest Ecology and Management* 388:43–56.
- Bell PD, Quine CP, Wright JA (1995): The use of digital terrain models to calculate windiness scores for the windthrow hazard classification. *Scottish Forestry* 49: 217-225.
- Brang P, Schönenberger W, Frehner M, Schwitter R, Thormann JJ, Wasser B (2006): Management of protection forests in the European Alps: an overview. *Forest Snow and Landscape Research*, 80 (1): 23-44.
- Chapman L (2000): Assessing topographic exposure. *Meteorological Applications* 7:335–340.
- Dobbertin M (2002): Influence of stand structure and site factors on wind damage- Comparing the storms Vivian and Lothar. *Forest Snow and Landscape Research*, 77: 187-205.
- Dupont S, Pivato D, Brunet Y (2015): Wind damage propagation in forests. *Agricultural and Forest Meteorology* 214-215:243–251.
- Dvořák L, Bachmann P, Mandallaz D (2001): Sturmschäden in ungleichförmigen Beständen. In: *Schweizer Zeitung für Forstwesen* 152 (2001) 11: 445–452
- Enzmann E (o.A.): z-Transformation von Messwerten. Online verfügbar unter <https://www.jura.uni-hamburg.de/einrichtungen/institute-seminare/institut-kriminalwissenschaften/abteilung-kriminologie/lehre/ws1415/enzmann/statistik1/z-werte.pdf>, Zugriff am 28.12.17
- Gardiner B, Blennow K, Carnus JM, Fleischner P, Ingemarson F, Landmann G, Lindner M, Marzano M, Nicoll B, Orazio C, Peyron JL, Reviron MP, Schelhaas M, Schuck A, Spielmann M, Usbeck T (2013): Destructive storms in European Forests: Past and Forthcoming Impacts. Final report to the European Commission - DG Environment. Online verfügbar unter , Zugriff am 12.10.17
- Gardiner B, Byrne K, Hale S, Kamimura K, Mitchell SJ, Peltola H, Ruel JC (2008): A review of mechanistic modelling of wind damage risk to forests. *Forestry* 81:447–463.
- Gardiner B, Schuck A, Schelhaas MJ, Orazio C, Blennow K, Nicoll B (Hrsg., 2013a): Living with Storm Damage to Forests. European Forest Institute, Joensuu
- Gebhardt H, Glaser R, Radtke U, Reuber P (2011): *Geographie; Physische Geographie und Humangeographie*. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg

- Götz M, Schmidtke (2006): Projekt Sturmstabilität: Verfahren zur Bestimmung der Sturmstabilität von Waldbeständen als Basis für die Schadenprävention. Silvaconsult AG. Winterthur.
- Hale SE, Gardiner B, Peace A, Nicoll B, Taylor P, Pizzirani S (2015): Comparison and validation of three versions of a forest wind risk model. *Environmental Modelling & Software* 68:27–41.
- Hanewinkel M, Kuhn T, Bugmann H, Lanz A, Brang P (2014): Vulnerability of uneven-aged forests to storm damage. *Forestry* 87:525–534.
- Hausegger G (o.A.): Waldland Österreich. Online verfügbar unter <http://www.proholz.at/co2klimawald/waldland-oesterreich/>, Zugriff am 13.11.17
- Indermühle M, Raetz P, Volz R. (2005): LOTHAR Ursächliche Zusammenhänge und Risikoentwicklung. Synthese des Teilprogramms 6. Umwelt-Materialien Nr. 184. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern.
- Klose B (2008): Meteorologie; Eine interdisziplinäre Einführung in die Physik der Atmosphäre. Springer, Berlin Heidelberg
- Land Steiermark (2018): Sturmschäden 2013-2017. Online verfügbar unter <http://www.agrar.steiermark.at/cms/beitrag/12180225/100812238>, Zugriff am 23.01.18
- Languaye-Opoku N, Mitchell SJ (2005): Portability of stand-level empirical windthrow risk models. *Forest Ecology and Management* 216:134–148.
- Leibundgut H (1985): Der Wald in der Kulturlandschaft; Bedeutung, Funktion u. Wirkungen d. Waldes auf d. Umwelt d. Menschen. Haupt, Bern [u.a.]
- Lexikon der Physik. Spektrum Akademischer Verlag. Online verfügbar unter <http://www.spektrum.de/lexikon/physik>, Zugriff am 16.01.18
- Lohninger H (2012): z-Transformation. Online verfügbar unter http://www.statistics4u.info/fundstat_germ/ee_ztransform.html, Zugriff am 28.12.17
- LUIS: Landesumweltinformationssystem: Wuchsbezirke der Steiermark. Online verfügbar unter http://www.umwelt.steiermark.at/animationen/01/Stmk_fuer_CMS_LUIS.htm, Zugriff am 13.12.17
- Mayer H (1999): Waldbau: Auf soziologisch-ökologischer Grundlage. Springer, [s.l.]
- Mayer H, Schindler D, Kunz M, Ruck B (Hrsg., 2010): Strategien zur Reduzierung des Sturmschadensrisikos für Wälder (Verbundprojekt RESTER). Berichte des Meteorologischen Instituts der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg Nr. 21.
- MeteoSchweiz (2015): Typische Wetterlagen im Alpenraum. Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz (Hrsg.). Online verfügbar unter http://www.meteoswiss.admin.ch/content/dam/meteoswiss/de/service-und-publikationen/Publikationen/doc/Web_Wetterlagen_DE_low.pdf, Zugriff am 13.11.17
- Mitchell SJ, Hailemariam T, Kulis Y (2001): Empirical modeling of cutblock edge windthrow risk on Vancouver Island, Canada, using stand level information. *Forest Ecology and Management* 154:117–130.
- Möhring und Schlütz (Hrsg., 2013): Handbuch standardisierte Erhebungsverfahren in der Kommunikationswissenschaft. Springer VS, Berlin

- Nicoll BC, Achim A, Mochan S, Gardiner BA (2005): Does steep terrain influence tree stability?: A field investigation. *Canadian Journal of Forestry Research* 35:2360–2367.
- Olofsson E, Blennow K (2005): Decision support for identifying spruce forest stand edges with high probability of wind damage. *Forest Ecology and Management* 207:87–98.
- Pasztor F, Matulla C, Zuvela-Aloise M, Rammer W, Lexer MJ (2015): Developing predictive models of wind damage in Austrian forests. *Annals of Forest Science* 72:289–301. doi:10.1007/s13595-014-0386-0
- Pivato D, Dupont S, Brunet Y (2014): A simple tree swaying model for forest motion in windstorm conditions. *Trees* 28:281–293.
- Popkin J (2011): Calculating Topographic Exposure with Grass. Online verfügbar unter <http://jamiepopkin.blogspot.co.at/2011/01/calculating-topographic-exposure-with.html>, Zugriff am 20.10.17
- Quine CP, Coutts MP, Gardiner BA, Pyatt DG (1995): Forests and wind: Management to minimise damage. *Forestry Commission Bulletin* 114. London, HMSO.
- Quine CP, White MS (1998): The potential of distance limited TOPEX in the prediction of site windiness. *Forestry* 71/4: 325-332.
- Russ W (2011): Mehr Wald in Österreich. In: BFW-Praxisinformation 24: 3-5.
- Saidani N (2004): Erkennung von Sturmschäden im Wald auf der Basis kleinmaßstäbiger Luftbilder und Entwicklung eines Modells zur Abschätzung der Sturmgefährdung der Wälder auf der Basis von räumlichen Daten. Dissertation. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg im Breisgau. Online verfügbar unter <https://freidok.uni-freiburg.de/data/1366>, Zugriff am 10.12.17
- Schelhaas MJ (2008): Impacts of natural disturbances on the development of European forest resources: application of model approaches from tree and stand levels to large-scale scenarios. *Dissertationes Forestales* 56, *Alterra Scientific Contributions* 23.
- Schindler D, Grebhan K, Albrecht A, Schönborn J, Kohnle U (2012): GIS-based estimation of the winter storm damage probability in forests; A case study from Baden-Wuerttemberg (Southwest Germany). *International journal of biometeorology* 56:57–69. doi:10.1007/s00484-010-0397-y
- Schmoeckel J (2005): Orographischer Einfluss auf die Strömung abgeleitet aus Sturmschäden im Schwarzwald während des Orkans "Lothar". Dissertation. Universität Karlsruhe. Online verfügbar unter https://www.imk-tro.kit.edu/download/diss_schmoeckel.pdf, Zugriff am 06.07.17
- Schütz JP, Götz M, Schmid W, Mandallaz D (2006): Vulnerability of spruce (*Picea abies*) and beech (*Fagus sylvatica*) forest stands to storms and consequences for silviculture. *Eur J Forest Res* 125:291–302.
- Scott RE, Mitchell SJ (2005): Empirical modelling of windthrow risk in partially harvested stands using tree, neighbourhood, and stand attributes. *Forest Ecology and Management* 218:193–209.
- Sebauer V (2013): Querschnittsmaterie Wald. Europäische Forstpolitik. In: *Zuschnitt Zeitschrift über Holz als Werkstoff und Werke in Holz* 51: Im Wald. 13- 16.

- Seidl R (2017): Resilienz im Waldmanagement. In: Österreichische Forstzeitung, 07/2017, 10-11.
- Sibona E, Vitali A, Meloni F, Caffo L, Dotta A, Lingua E, Motta R, Garbarino M (2017): Direct Measurement of Tree Height Provides Different Results on the Assessment of LiDAR Accuracy. *Forests* 8:7.
- Suvanto S, Henttonen HM, Nöjd P, Mäkinen H (2016): Forest susceptibility to storm damage is affected by similar factors regardless of storm type; Comparison of thunder storms and autumn extra-tropical cyclones in Finland. *Forest Ecology and Management* 381:17–28.
- Sommerville A (1980): Wind stability: Forest layout and silviculture. In: *New Zealand Journal of Forestry Science* 10/3: 476-501
- Sommerville A (1989): Tree Wind Stability and Forest Management Practices. In: *Workshop on Wind Damage in New Zealand Exotic Forests: proceedings of a workshop held 1st August, 1988 at the Forest Research Institute, Rotorua.* 38-58.
- Usbeck T (2015): Wintersturmschäden im Schweizer Wald von 1865 bis 2014. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen* 166:184–190.
- Usbeck T, Wohlgemuth T, Pfister C, Volz R, Beniston M, Dobbertin M (2009): Wind speed measurements and forest damage in Canton Zurich (Central Europe) from 1891 to winter 2007. *International Journal of Climatology.* 13.
- Valinger E, Friedmann J (1999): Models to Assess the Risk of Snow and Wind Damage in Pine, Spruce, and Birch Forests in Sweden. In: *Environmental Management Vol. 24, No. 2,* 209–217.
- Waldatlas (2011): Digitaler Atlas Steiermark. Online verfügbar unter [http://gis2.stmk.gv.at/atlas/\(S\(uexucjdfhn43lpocdxk01zlr\)\)/init.aspx?karte=waldatlas&ks=ea&cms=da](http://gis2.stmk.gv.at/atlas/(S(uexucjdfhn43lpocdxk01zlr))/init.aspx?karte=waldatlas&ks=ea&cms=da), Zugriff am 01.11.17
- Wetter und Klima (2015): Wetterarchiv Kapfenberg. Online verfügbar unter <http://www.wetterundklima.de/weather.php?id=11370&bday=8&fday=8&amonth=7&ayear=2015>, Zugriff am 20.11.17
- Wilson J. D. (1984): Determining a TOPEX score. *Scottish Forestry*, 38: 251–256.
- ZAMG (2010): BEAUFORT. Online verfügbar unter <http://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/klimaforschung/klimamodellierung/beauvort>, Zugriff am 15.10.17
- ZAMG (2015): Unwetterbericht für Juli 2015. Online verfügbar unter <https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/klima-aktuell/monatsrueckblick/unwetterbericht/?jahr=2015&monat=07>, Zugriff am 15.11.17
- ZAMG (2017): Wind aus der Wetteranalyse INCA. Online verfügbar unter <http://www.lawine-steiermark.at/wetter/wetterkarten/>, Zugriff am 29.12.17

Anhang

Kantendetektion, Code für Python am Beispiel Nord

```
import sys, math, copy
from datetime import datetime
import numpy as np
try:
    from osgeo import ogr, osr, gdal
except:
    sys.exit('ERROR: cannot find GDAL/OGR modules')
gdal.UseExceptions() #enable exceptions

# import data, edges and ndsm with same resolution and extent
try:
    edges= gdal.Open ('D:\Liesl\Data\Final_allData\edges_n.tif', gdal.GA_ReadOnly)
except:
    print 'Unable to open EDGES'
try:
    ndsm1= gdal.Open ('D:\Liesl\Python\Endsm_all2m.tif', gdal.GA_ReadOnly)
except:
    print 'Unable to open NDSM'

EDGE = np.array(edges.GetRasterBand(1).ReadAsArray())
NDSM = np.array(ndsm1.GetRasterBand(1).ReadAsArray())

#create new file same extent as inputs to contain the buffers
behEdge=np.copy(EDGE)
behEdge.fill(0)

#buffer creation: for every north exposed pixel, perform the following
for i in xrange (250,65000): #columns
    for j in xrange (2500,22500): #rows
        if (EDGE[j,i]==1): # if the pixel is an edge
            m=0
            for n in xrange (1,50): #for a buffer of 100m
                if (NDSM[j+n,i]<14): #if there is a gap, increment m
                    m=m+2
                elif NDSM[j+n,i]>14 and m<10: #assign Buffer with 1(=True)
                    behEdge[j+n,i]=1
                    m=0
                elif (m>=10): #jump to next pixel after 10m gap
                    continue

[cols, rows]= EDGE.shape
trans = edges.GetGeoTransform()
proj= edges.GetProjection()

#export created buffer to new tif File
outfile= 'D:\Liesl\Data\Final_allData\Ebuff_n.tif'
outdriver= gdal.GetDriverByName("GTiff")
outdata= outdriver.Create( outfile, rows, cols, 1, gdal.GDT_Float32, )
outdata.SetGeoTransform(trans)
outdata.SetProjection(proj)
outdata.GetRasterBand(1).WriteArray(behEdge)
outdata.FlushCache ()
```

TOPEX, Code für Python am Beispiel Nord

```
import sys, math, copy
from datetime import datetime
import numpy as np
try:
    from osgeo import ogr, osr, gdal
except:
    sys.exit('ERROR: cannot find GDAL/OGR modules')
gdal.UseExceptions() #enable exceptions

# import data, DGM
try:
    dgm1= gdal.Open ('D:\Liesl\Python\DGMail10m1.tif', gdal.GA_ReadOnly)
except:
    print 'Unable to open INPUT'

DGM = np.array(dgm1.GetRasterBand(1).ReadAsArray())
np.nan_to_num(DGM)

# create empty Topex file
topex=np.copy(DGM)
topex.fill(0)

# calculate Topex for North for every pixel
for i in xrange (915,12130): #columns
    for j in xrange (970,4390): #rows
        for n in xrange (1,100): #for a direction of 1km
            c=DGM[j-n, i]-DGM[j, i]
            d=10*n
            e=c/d
            g=math.atan(e)/math.pi*180
            if (topex[j, i]<g):
                topex[j,i] = copy.copy(g); #assign max. exposure, max 90

[cols, rows]= DGM.shape
trans = dgm1.GetGeoTransform()
proj= dgm1.GetProjection()

#export created Topex to new tif File
outfile= 'D:\Liesl\Python\TopexN.tif'
outdriver= gdal.GetDriverByName("GTiff")
outdata= outdriver.Create( outfile, rows, cols, 1, gdal.GDT_Float32)
outdata.SetGeoTransform(trans)
outdata.SetProjection(proj)
outdata.GetRasterBand(1).WriteArray(topex)
outdata.FlushCache ()
```