Zeitliches und räumliches Wintersturmschadrisiko in den Wäldern der Schweiz

Bilanzierung von Waldfläche, Holzvorrat, Sturmschaden und Wettermessungen im Wandel der gesellschaftlichen Bedingungen von 1865 - 2014

Abhandlung eingereicht bei der

Faculté des Lettres et Sciences Humaines de l'Université de Neuchâtel.

Institut de Géographie

Université de Neuchâtel

zur Erlangung des Titels Doktor der Geisteswissenschaften

vorgelegt von

Tilo Usbeck

Prüfungskommission:

Prof. Dr. Martine Rebetez, Referentin

Prof. Dr. Jürg Luterbacher, Ko-Referent

Dr. Thomas Wohlgemuth, Ko-Referent

Dr. Arthur Gessler, Ko-Referent

2016

UNIVERSITÉ DE
NEUCHÂTEL

Faculté des Lettres et Sciences Humaines
Espace Louis-Agassiz 1
CH - 2000 Neuchâtel
Tél : +41 (0)32 718 17 00
Fax : +41 (0)32 718 17 71
secretariat.lettres@unine.ch

IMPRIMATUR

La Faculté des lettres et sciences humaines de l'Université de Neuchâtel, sur les rapports de Mme Martine Rebetez, directrice de thèse, professeure, Université de Neuchâtel ; M. Jürg Luterbacher, professeur, Justus-Liebig-University Giessen, Allemagne ; M. Arthur Gessler, docteur, Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage WSL, Birmensdorf ; M. Thomas Wohlgemuth, docteur, Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage WSL, Birmensdorf, autorise l'impression de la thèse présentée par M. Tilo Usbeck en laissant à l'auteur la responsabilité des opinions énoncées.

Neuchâtel, le 20 septembre 2016

Le doyen
Hédi Dridi

Auch der Baum, auch die Blume warten nicht bloss auf unsere Erkenntnis.

Sie werben mit ihrer Schönheit und Weisheit aller Erden um unser Verständnis.

Christian Morgenstern

Danksagung

Diese Arbeit hätte ohne die Unterstützung einer Reihe von Menschen nicht fertiggestellt werden können.

Die Idee, ein Dissertationsprojekt zum Sturmschadrisiko der Wälder der Schweiz zu entwickeln, stammte von Dr. Matthias Dobbertin, mit dem gemeinsam ich einen Projektplan entwarf. Er übernahm nach der Bewilligung des Vorhabens den zentralen Teil meiner wissenschaftlichen Betreuung. Als die Arbeit bereits weit gediehen war, wichtige Ergebnisse vorlagen und auch die weiteren Schritte klar erkennbar waren, verstarb er plötzlich und unerwartet am 31. Oktober 2012. Mit ihm verlor ich einen inspirierenden Betreuer, dessen konstruktive Offenheit nicht nur ich besonders schätzte.

Ich möchte allen danken, die mich bei dieser Arbeit unterstützt und damit zu ihrem Gelingen beigetragen haben.

Besonderer Dank gilt:

Prof. Dr. Martine Rebetez, die mich als Doktorand aufnahm und damit nicht nur dem Projekt das Zuhause gab, sondern dass sie mir gleichzeitig ihre Unterstützung bot, die es brauchte, es zu einem erfolgreichen Abschluss bringen zu können.

Dr. Thomas Wohlgemuth, der seit Beginn der Arbeiten bereits Betreuer ist und Ende 2012 die Haupt-Betreuung des Projekts übernahm, mich nicht erst seitdem insbesondere durch seine kritisch-konstruktiven Beiträge zu meinen Manuskripten unterstützt, wovon ich auch für die Zukunft profitiere.

Dr. Arthur Gessler, der in der Abschlussphase als Betreuer der Arbeit hinzu kam, und mir seitdem angefangen von technisch-organisatorischen Belangen bis hin zu Strukturellem im Projekt zur Seite steht.

Dr. Peter Waldner, der mich mit seinem mathematisch-analytischen Können nicht nur einmal verblüffte und mit dem es schnell einmal passiert, ausser vor Sturm- auch vor Schwemmholz zu stehen.

Prof. Dr. Andreas Rigling, der nicht müde wurde, sich dafür einzusetzen, dass ich auch einen physischen Platz in der Forschung behielt, solange es irgend möglich war, und auch sonst immer beide Ohren für mich offen hatte, wenn ich seine Unterstützung benötigte.

Flurin Sutter und Peter Jakob für immer spannende Gespräche nicht immer nur um GIS und Datenbanken, die mich neugierig gemacht haben auf mehr vom GIS, wenn denn Zeit gewesen wäre.

Dr. Charlotte Steinmeier und Dr. Christian Ginzler, die selbst meine kompliziertesten Ideen im GIS umsetzten, auch wenn wohl dort Wind und Schaden noch etwas weit entfernt voneinander waren.

Gustav Schneiter, dem keine Wettermessung fremd war und den ich letztlich doch nie auf eine seiner LWF-Flächen begleiten konnte.

Allen Mitglieder der ehemaligen Waldökosystem-Forschung und des Landesforstinventars, dass ich einen grossen Teil meines Projekts in einer Forschungsumgebung bearbeiten durfte wie ich sie mir motivierender nicht vorstellen könnte.

Sigrid Weissmann, die mir das Büro in ihrem Hause überliess, als ich Asyl suchte für eine Wagenladung voller zumeist historischer Papierberge.

Kamel Khaled, der mittlerweile und ganz ungewollt fast mehr weiss von Sturm und Schaden als ich und mir so manche Forschungsnacht mit einem original jordanisch gebrauten Tee entspannter gestaltete.

Bernard und Katarina Cobbaert sowie ihrem Team der Physiotherapie Segeten, die mir nicht nur eine Abwechslung zur Forschung boten, sondern mich auf ihre Weise immer wieder inspirierten.

Meinen Freunden und insbesondere meiner Mutter, die den erfolgreichen Abschluss der Dissertation nicht mehr unter uns erleben konnte, für ihre Unterstützung, auch in stressigen Zeiten auf andere Gedanken zu kommen, die nötige Distanz zur Wissenschaft zu wahren und so neue Energie zu tanken.

Nicht zuletzt möchte ich auch für die vielfältige institutionelle Unterstützung des Projekts danken: der Promotionsförderung der Hans-Böckler-Stiftung (HBS), Deutschland, für das Stipendium Nr. 113425, dem LOTHAR Grundlagenprogramm des Bundesamtes für Umwelt BAFU, Schweiz, und dem Programm Walddynamik der Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL für ihre materielle Unterstützung, sowie dem Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie, MeteoSchweiz, für die intensive und fruchtbringende Zusammenarbeit.

Zusammenfassung

Die vorliegende Dissertation hatte zum Ziel, Winterstürme als die grösste Naturgefahr für die Wälder der Schweiz anhand der Entwicklung der Sturmschäden und der Wälder vor dem Hintergrund des Klimawandels und der gesellschaftlichen Transformationen zu untersuchen.

Ab der Mitte des 19. Jahrhunderts verursachten Winterstürme empfindliche Schäden. Zur selben Zeit konsolidierten sich die Verwaltungsstrukturen in der Eidgenossenschaft und wissenschaftliche Forschung wurde schweizweit institutionalisiert. Diese drei Voraussetzungen ergaben, dass eine Vielzahl von Dokumenten zu Wald, Wetter, Schäden und ihren Auswirkungen angelegt und aufbewahrt wurden. Für die hier vorgelegte Studie wurden Informationen aus einem Zeitraum von rund 150 Jahren (1865-2014) gesammelt und aufbereitet. Auf dieser Grundlage wurden Auswertungen der Beobachtungen zur Entwicklung und räumlichen Verteilung von Wintersturmschäden im Wald sowie der Wettererscheinungen im betroffenen Gebiet vorgenommen.

Bei den hier vorgestellten Untersuchungen wurde über alle 26 schweren Ereignisse mit jeweils mehr als 70,000 m^3 Schadholz ein Anstieg des absoluten wie relativen Schadumfangs und der Schadhäufigkeit über die Zeit festgestellt. Die Schadholzmengen des schwersten Wintersturms des 20. Jahrhunderts („Lothar“, 26.12.1999) erwiesen sich als 25 mal so gross wie die Schäden des schwersten Ereignisses des 19. Jahrhunderts. Seit etwa 1840 dehnte sich die Waldfläche um 62% (Landesforstinventar (LFI)) bzw. 63% (Forststatistik) aus, der stehende Vorrat erhöhte sich um 184% (LFI). Im selben Zeitraum stiegen die Wintertemperaturen in den Sturmschadgebieten um rund 2°C und die Winterniederschläge um etwa 50%. Mit wenigen Ausnahmen waren die Böden zur Zeit aller betrachteten 215 Winterstürme, der 26 schweren Ereignisse sowie 189 Ereignissen mit geringeren Schäden, in den Tieflagen ungefroren und überdurchschnittlich durchfeuchtet. Es wurde ein signifikanter Zusammenhang zwischen den beobachteten schweren Sturmschäden und den maximalen Windspitzen festgestellt ($p = 0.0015$). Zudem stellte sich heraus, dass die relative Häufigkeit von Windgeschwindigkeiten über 30 m s^{-1} zwischen den Perioden 1891-1929 und 1969-2007 von 0.21 auf 2.51 Tage pro Jahr zugenommen hatte, wobei das beobachtete Perioden-Maximum von 32.2 m s^{-1} auf 44.1 m s^{-1} anstieg. Ergebnisse der Studie zu Windgeschwindigkeiten waren Datenreihen seltener Länge, die mit Schwerpunkt auf Starkwindtage homogenisiert wurden: Reihen der täglichen Maxima der Stundenmittel der Winterhalbjahre ab 1891 (1930 bis 1936 ganzjährig), der Tagesmittel der Windgeschwindigkeit 1891 bis 1965 und der maximalen Windspitzen der winterlichen Starkwindtage von mindestens 30 m s^{-1} ab dem 29.11.1933. Die stündlichen Mittelwerte zeigten grosse Maxima der Häufigkeit wie auch der absoluten Werte um das

Jahr 1905 und das Jahr 2000 sowie ein jeweils kleineres Maximum um das Jahr 1955. Die täglichen Windspitzen besassen eine ansteigende Tendenz bezüglich ihrer Häufigkeit und Maxima. Die Ausmasse der im Sturm geschädigten Anteile der stehenden Vorräte standen mit den Druckkräften der maximalen Windspitzen in einem signifikanten Zusammenhang.

Die räumlichen Zusammenhänge von Sturmschäden und Winddrücken wurden in zwei Fallstudien (Orkane „Vivian“ und „Lothar“) mittels unterschiedlich grosser und verschieden geformter Umgebungsflächen (Herkunft der Schadendaten) und ihren Zentrumspunkten (Herkunft der Winddaten) ermittelt. Die Ergebnisse belegten, dass Schadflächenanteile der Wälder und Drücke der gemessenen Windspitzen tendenziell dann in signifikantem Zusammenhang miteinander standen, wenn sich die betrachteten Waldflächen in räumlicher Nähe zur Windmessung befanden. Die Zusammenhänge der Schadanteile der Flächen mit 1 km und 2 km Radius um die Wind-Messstellen mit den Drücken der Windspitzen im Falle des Orkans „Vivian“ besassen sowohl relativ hohe Bestimmtheitsmasse (R^2 = 0.79 und R^2 = 0.67) als auch Signifikanz (p = 0.045 und p = 0.003).

Die Mittelwerte der relativen Sturmschäden pro Ereignis im Betrachtungszeitraum von 1865 bis 2014 variierten stark, von 3.1 m^3 ha^{-1} im Kanton Nidwalden bis 0.0 m^3 ha^{-1} in den Kantonen Tessin und Genf, wobei der Schweizerische Mittelwert bei 0.9 m^3 ha^{-1} lag. Damit wurde die Hypothese bestätigt, dass Wintersturmschäden langfristig räumlich nicht gleichmässig verteilt waren. Massenerhebungen wie der Jura und die Alpen in Mitteleuropa übten offensichtlich einen erheblichen Einfluss auf den Verlauf von Winterstürmen aus, der sowohl schadverstärkende Wirkungen zeigte, wie im Mittelland und in den Voralpen, als auch schadmildernd wirkte, wie in den Inneralpen und auf der Alpensüdseite. Eine Ausnahme bildete die Dynamik seltener meteorologischer Konstellationen mit einem Kaltfrontdurchgang von Norden nach Süden wie beim Orkan „Vivian“, wodurch Hauptschäden auch in den sonst wintersturmgeschützten Inneralpen anfallen konnten.

Die Resultate dieser Studie zeigten anhand der homogenisierten Windmessungen in Zürich, dass Wintersturmschäden im Schweizer Wald in einem engen Zusammenhang zu Windspitzen standen. Zudem waren schwere Wintersturmschäden im Untersuchungsgebiet auf regionaler Ebene nicht gleichverteilt.

Die Gesamtheit der Ergebnisse der hier präsentierten Studie zeigte, wie das Anwachsen des Vorrats und der Geschwindigkeit der Windspitzen sowie, in geringerem Masse, das der Temperaturen und der Niederschläge, gemeinsam zum Anwachsen der beobachteten Schäden beigetragen hat.

Diese Ergebnisse könnten in Modelle für kleinräumige Abschätzungen des Sturmschadrisikos einfliessen und bei forstlichen Planungen Berücksichtigung finden. So könnte in den Voralpen, im Mittelland und im Jura bei der Baumartenwahl oder der Bestimmung des wirtschaftlichen Zieldurchmessers ein grösserer Einfluss geltend gemacht werden als in den Inneralpen oder auf der Alpensüdseite. Diese Auswahl sollte die Resistenz der Bestände in den Regionen verstärken, die in dieser Studie als besonders gefährdet aufgezeigt wurden.

Résumé

La présente thèse avait pour objectif d'étudier les tempêtes hivernales, le plus grand risque naturel pour les forêts suisses, en suivant l'évolution des forêts et des dommages qu'elles ont subis dans un contexte de changements climatiques et de transformations sociales.

À partir du milieu du XIX^{e} siècle, les tempêtes hivernales ont provoqué des dégâts sensibles. A la même époque, les structures administratives de la Confédération se sont consolidées et la recherche scientifique a été institutionnalisée dans tout le pays. Ces trois éléments expliquent pourquoi un grand nombre de documents concernant les forêts, les conditions météorologiques, les dommages et leurs conséquences ont été rédigés et conservés. Pour constituer la base des recherches présentées ici, des données ont été collectées sur une période d'environ 150 ans (1865-2014). Ces données ont permis d'analyser l'évolution et la répartition spatiale des dommages provoqués par les tempêtes hivernales dans les forêts, ainsi que les conditions météorologiques

Pour l'ensemble des 26 événements ayant causé le plus de dommage, avec chacun plus de 70 000 m^{3} de bois abattus, les résultats de la présente thèse montrent une augmentation progressive de l'amplitude absolue et relative des dommages ainsi que de leur fréquence. Les quantités de chablis provoqués par la plus grande tempête du XX^{e} siècle (« Lothar », le 26 décembre 1999) se sont avérées 25 fois supérieures à celles de la plus grande tempête du XIX^{e} siècle. Depuis environ 1840, la surface forestière s'est étendue de 62 % (Inventaire forestier national (IFN)) ou de 63 % (Statistique forestière), les stocks sur pied ont augmenté de 184 % (IFN). Pendant la même période, les températures hivernales ont augmenté d'environ 2 °C, et les précipitations hivernales d'environ 50 % dans les régions concernées par les dommages. À de rares exceptions près, au moment des 215 tempêtes hivernales considérées, dont les 26 les plus graves et 189 autres ayant causé des dommages plus restreints, les sols n'étaient pas gelés à basse altitude, et plus humidifiés que la moyennes. Une corrélation significative a été observée entre les

dommages importants et les vitesses maximales de vent ($p = 0.0015$). Par ailleurs, les résultats ont montré que la fréquence relative des vitesses de vent dépassant 30 m s^{-1} est passée de 0.21 à 2.51 jours par an entre les périodes 1891-1929 et 1969-2007, tandis que le maximum observé pour chaque période est passé de 32.2 m s^{-1} à 44.1 m s^{-1}. Les résultats de l'étude des vitesses de vent constituent des séries de données de longueur exceptionnelle, qui ont été homogénéisées en se concentrant sur les jours de vent fort: les maxima journalier de la moyenne horaire pour le semestre d'hiver à partir de 1891 (pour toute l'année de 1930 à 1936), les moyennes journalières de la vitesse du vent de 1891 à 1965 et les vitesses maximales des rafales des jours de vent fort en hiver d'au moins 30 m s^{-1} à partir du 29.11.1933. Les valeurs moyennes horaires présentent des maxima élevés de fréquence et de valeur absolue aux tournants du XIX^{e} au XX^{e} siècle, et du XX^{e} au XXI^{e} siècle, ainsi qu'un maximum un peu moins important au milieu du XX^{e} siècle. Une tendance positive des fréquences et des maxima des rafales journalières a été relevée. Le volume des chablis en proportion des stocks sur pied s´est avéré significativement corrélé avec les vitesses maximales des rafales.

La corrélation spatiale entre les dommages et les vitesses du vent a été déterminée pour deux études de cas (ouragans « Vivian » et « Lothar ») en utilisant d' une part les surfaces concernées par les dommages, de tailles et de formes différentes, et, d'autre part leur point central où les données anémométriques ont été dérivées des mesures de MétéoSuisse. Les résultats confirment que les proportions de chablis et les vitesses des rafales sont significativement corrélées, lorsque les surfaces forestières concernées se trouvent à proximité du point de mesure de vent. La corrélation entre les proportions de dommages des surfaces de 1 km et de 2 km de rayon autour des stations anémométriques et les vitesses des rafales dans le cas de l'ouragan « Vivian » présentait des coefficients relativement élevés ($R^2 = 0.79$ et $R^2 = 0.67$) ainsi qu'un bon degré de signification ($p = 0.045$ et $p = 0.003$).

Les valeurs moyennes des dommages relatifs par évènement pour la période d'observation 1865-2014 se sont établies à 0.9 m^3 ha^{-1} en moyenne suisse mais varient fortement d'un canton à l'autre, allant de 3.1 m^3 ha^{-1} dans le canton de Nidwald à 0.0 m^3 ha^{-1} dans les cantons du Tessin et de Genève. Ceci confirme l'hypothèse que les dommages des tempêtes hivernales ne se répartissaient pas régulièrement dans l'espace. Les reliefs comme le Jura et les Alpes en Europe centrale ont joué un rôle déterminant dans l'évolution des tempêtes hivernales, pouvant se traduire aussi bien par une augmentation des dommages, notamment sur le Plateau et les Préalpes, que par une atténuation de ceux-ci dans les régions intra-alpines et sur le versant sud des Alpes. Exceptionnellement, des dommages importants ont pu se produire également dans les régions intra-alpines habituellement protégées des tempêtes

hivernales, dans le cas de situations météorologiques rares, comme le passage d'un front froid du nord au sud qui a marqué l'ouragan « Vivian ».

L'analyse des mesures anémométriques homogénéisées de Zurich a confirmé, d'une part, que les dommages provoqués par les tempêtes hivernales dans les forêts suisses étaient fortement corrélées aux vitesses des rafales et, d'autre part, que la répartition spatiale des dommages importants dus aux tempêtes hivernales n'était pas non plus homogène au niveau régional.

L'ensemble des résultats de la présente thèse montre que l'augmentation du volume de bois sur pied, celle de la vitesse des rafales de vent, ainsi que, dans une moindre mesure, celle des températures et des précipitations, se sont conjuguées pour contribuer à l'augmentation observée des chablis.

Les résultats de cette thèse ont pu alimenter les modèles pour des évaluations à l'échelle locale ou régionale du risque de dommages lors des tempêtes. Ils ont également déjà pu être pris en compte dans la pratique, pour la planification forestière. Dans les Préalpes, sur le Plateau et dans le Jura, on a ainsi par exemple pu donner une importance plus grande au choix du type d'essence ou à la détermination de du diamètre ciblé pour l'exploitation que dans les régions intra-alpines ou sur le versant sud des Alpes. Ces choix devraient renforcer la résistance des peuplements aux tempêtes dans les régions dont cette thèse a montré qu'elles étaient particulièrement vulnérables.

Summary

The goal of this dissertation was to study winter storms as the greatest natural risk for Swiss forests on the basis of long-term data on forest development, storm damage, climate change and social transformation.

In the mid-nineteenth century, winter storms began to cause noticeable damage to forests. At the same time, the administrative structures of both the Swiss Confederation and scientific research were institutionalized throughout Switzerland. These three preconditions resulted in the archiving and preservation of a multitude of documents concerning forests, weather, storm damage and the related consequences. For this study, respecting information for a period of 150 years (1865-2014) was gathered and prepared. The data served to analyze temporal trends and the spatial distribution of winter storm damage and weather conditions in Switzerland.

Referring to storm events that produced the 26 largest damages with more than 70'000 m^3 damage wood each, both the amount and the frequency of storm damages increased during the investigation period. The most severe winter storm towards the end of this period ("Lothar", 26.12.1999) ,produced a twenty-four-fold higher volume of damaged timber compared to the damage of the most severe event in the 19th century. Since about 1840, the forest area expanded by 62% according to the National Forest Inventory (Landesforstinventar (LFI)) or 63% following the Swiss forestry statistics (Forststatistik), while the growing stock rose by 184% (LFI). During the same period, winter temperatures increased by around 2° C in the storm-damaged areas and winter precipitation rose by circa 50%. In the majority of 215 winter storm events analyzed, i.e. the 26 most severe and 189 additional ones causing smaller damages, soils at low elevations were not frozen but moister than average. A significant correlation was found between the observed severe storm damage and the maximum gust wind speeds ($p = 0.0015$). In addition, the relative frequency of wind speeds of above 30 m s^{-1} increased from 0.21 to 2.51 days per year between the period of 1891-1929 and the recent period 1969-2007, with maximum gusts rising from 32.2 m s^{-1} to 44.1 m s^{-1}, respectively. The study of wind speeds resulted in unusually long data series which were homogenised with an emphasis on days with strong winds: Series daily maxima of hourly average for the winter half years from 1891 onwards (1930 to 1936 with daily maxima), daily average of wind speeds from 1891 to 1965 and maximum gusts on winter days with strong winds of at least 30 m s^{-1} from 29.11.1933 onwards. For hourly average values of wind speed, both frequencies as well as absolute maximum values peaked at highest levels roughly in 1905 and roughly in 2000, while a smaller peak emerged also roughly in 1955. Daily gust speeds showed an increasing trend regarding both frequency and maximum values. The proportion of growing stocks damaged by storms significantly correlated with maximum wind gust speeds.

Spatial correlations of storm damage and wind pressures were determined in two case studies (storms Vivian and , 1990, and Lothar, 1999) using buffer areas of varying size and form as source of the damage data, and their center points as source of the wind data. Results proved that the proportions of damaged forest areas tended to correlate significantly with the pressures of measured gust speeds when the forest areas under examination were located in close proximity to the place where wind was measured. Correlations between the proportions of damaged forest within a radius of 1 km and 2 km around the wind gauges as well as the wind gust pressures occurring during Vivian exhibited high coefficients of determination ($R^2 = 0.79$, $p=0.045$ and $R^2 = 0.67$, $p=0.003$, respectively).

*A*verage values of the relative storm damage per event varied strongly in the observed period from 1865 to 2014, from 3.1 m^3 ha^{-1} in Canton Nidwalden to 0.0 m^3 ha^{-1} in the cantons of Ticino and Geneva, with

an average value of 0.9 m^3 ha^{-1}. The hypothesis claiming a spatially uneven distribution of storm damages in Switzerland was therefore confirmed. Mountain ranges such as the Jura and the Alps in Central Europe clearly have affected the course of winter storms, and amplified damages in the Swiss Plateau and the Prealps, as mitigated wind damage in the Central Alps and on the south side of the Alps. An exception to this was created by the rare meteorological constellation of a cold front move from north to south, as was the case for winter storm Vivian, leading to the occurrence of major damage in the Central Alps, an area otherwise escaping from winter storms.

On the basis of the homogenized wind measurements in Zurich, the results of this study showed that winter storm damage in Swiss forests is closely correlated to wind gusts. In addition, severe winter storm damage in the area under study was not evenly distributed on the regional level.

The main results of this thesis showed that the increase of growing stock and wind gust speedsas well as, to a minor extent, the rise of temperatures and precipitations contributed to the observed increase of storm damages.

These results could be integrated into models used for small-scale estimations of storm damage risk and could be taken into consideration in forest planning. In the Prealps, the Central Plateau and the Jura regions, emphasis could be given to the choice of tree species or on the definition of the target diameter required than in the Central Alps or on the south side of the Alps to make forest stands more resistant against winter storms especially in the most vulnerable regions shown in the present thesis.

Stichworte: Wintersturmschaden, Windwurf, Waldfläche, Vorrat, regionale Schadverteilung, Temperatur, Niederschlag, Windmessung, Windgeschwindigkeit, Windspitze, Böenspitze, mittlere Windgeschwindigkeit, täglicher Windweg, Homogenisierung, lange Messreihe

Titre: Répartition spatiale et temporelle du risque de dégâts aux forêts suisses provoqués par les tempêtes hivernales

Analyse de la surface forestière, des volumes sur pied, des dégâts dus aux tempêtes et des conditions météorologiques dans un contexte de changements sociétaux de 1865 à 2014

Mot clés: Dégâts des tempêtes hivernales, Chablis, Surface boisée, Stock sur pied, Répartition régionale des dommages, Température, Précipitations, Mesure anémométrique, Vitesse du vent, Vitesse maximale des rafales de vent, Vitesse moyenne du vent, Parcours journalier du vent, Homogénéisation, Série de données de longueur exceptionnelle

English title: Spatio-temporal risk of winter storm damage to Swiss forests.

Balance of forest area, growing stock, storm damage and weather measurements under changing social conditions from 1858 to 2014.

Key words: Winter storm damage, Wind throw, Forest area, Growing stock, Regional damage pattern, Temperature, Precipitation, Wind measurement, Wind speed, Maximum gust speed, Mean wind speed, Daily wind run, Homogenisation, Long data series

Inhaltsverzeichnis

Danksagung 7

Zusammenfassung 9

Inhaltsverzeichnis 17

1. Einführung 23

2. Forschungsgegenstand und Problemstellung 29

2.1. Grundlegendes zu Stürmen 31

2.1.1. Stürme als Naturgefahren 31

2.1.2. Allgemeines zu Stürmen 31

2.1.3. Mittelbreitenzyklonen als Ursache für Stürme 32

2.1.4. Ursachen für das Schädigungspotential von Zyklonen 33

2.2. Windbeobachtung 34

2.2.1. Windschätzung 34

2.2.2. Grundlegende Möglichkeiten der Windmessung 36

2.2.3. Zur Geschichte der Windmessung in der Schweiz 37

2.3. Wald in der Schweiz 38

2.3.1. Walddefinition 38

2.3.2. Wälder der Schweiz 39

2.3.3. Zur Geschichte des Waldes seit dem Beginn der Regenerationszeit 40

2.3.4. Zur Geschichte der Waldinventarisierung in der Schweiz 41

2.4. Sturmschäden im Schweizer Wald 43

2.4.1. Zur Einordnung von Sturmschäden 43

2.4.2. Zur Geschichte der Sturmschäden und ihrer Registrierung 44

2.5. Sturmschadforschung 46

2.5.1. Allgemeines 46

2.5.2. Zum Stand der Erforschung von Windwirkungen an Bäumen 46

2.5.3. Zur Geschichte der Forschung zu Sturmschäden im Wald in der Schweiz 50

2.5.4. Zum Stand der Ursachenforschung am Sturmschaden in der Schweiz 51

2.5.5. Zum Forschungsbedarf hinsichtlich Sturmschäden im Wald 52
2.6. Wissenslücken und daraus für das Projekt abgeleitete Forschungsfragen 53
2.6.1. Katalog der Wintersturm-Schadereignisse im Kontext der Waldentwicklung 53
2.6.2. Zustand des Waldbodens während Wintersturmereignissen 54
2.6.3. Räumliche Lage sturmschadenrelevanter Windmessungen 54
2.6.4. Lange meteorologische Datenreihen für die Sturmschadforschung 55
2.6.5. Entwicklung der Häufigkeit und Schwere von Wintersturm-Schadereignissen im Wald des Kantons Zürich 56
2.6.6. Zusammenhang zwischen Windgeschwindigkeit und Sturmschaden 56
2.6.7. Räumlicher Zusammenhang zwischen Winddrücken und Schadflächenanteilen auf nationaler Ebene 57
2.6.8. Sturmschadmuster auf regionaler Ebene 57
2.7. Literaturverzeichnis zu Einführung, Forschungsgegenstand und Problemstellung 58

3. Artikel 1: Increasing storm damage to forests in Switzerland from 1858 to 2007 75
3.1. Abstract 77
3.2. Introduction 78
3.3. Materials and Methods 80
3.3.1. Severe winter storm damage and damage potential 80
3.3.2. Weather preceding storms and winter climate 82
3.3.3. Case study: daily maximum gust wind speed and forest damage 83
3.4. Results 84
3.4.1. Damage-causing severe winter storms 84
3.4.2. Winter climate and pre-storm weather 88
3.4.3. Daily maximum gust wind speed and forest damage in Zurich 89
3.5. Discussion 92
3.6. Conclusion 94
3.7. Acknowledgements 95
3.8. References 95

4. Wind speed measurements and forest damage in Canton Zurich (Central Europe) from 1891 to winter 2007 105
4.1. Abstract 107
4.2. Introduction 108
4.2.1. Coincidental long-term wind and forest data in the region of Zurich 109
4.3. Data and analysis 110
4.3.1. Wind data 110
4.3.2. Forest damage data 112
4.3.2.1. Damage amounts and metadata 112
4.3.2.2. Forest area data 112
4.3.2.3. Growing stock data 113
4.3.3. Analyses 113
4.3.3.1. Selection of the observation area 113
4.3.3.2. Homogenization of wind data 114
4.3.3.3. Amount of damage 115
4.3.3.4. Comparison of wind and damage 116
4.4. Results 116
4.4.1. Homogenization of the wind data 116
4.4.2. Damage normalization 119
4.4.3. Comparison of wind and damage 120
4.5. Discussion 123
4.5.1. Wind as an explanatory variable 123
4.5.2. Extent of forest damage as a dependent variable 125
4.5.3. Implications for (future) forest management 126
4.6. Conclusion 126
4.7. Acknowledgements 127
4.8. References 128

5. Artikel 3: Relating remotely sensed forest damage data to wind data: storms Lothar (1999) and Vivian (1990) in Switzerland 137
5.1. Abstract 139
5.2. Introduction 140

5.3. Materials and methods 144
5.4. Specific methods 149
5.4.1. Measurements (M) 149
5.4.2. Simulations (S) 150
5.4.3. Expert estimations (X) 150
5.5. Results 151
5.5.1. Measurements 151
5.5.2. Simulations 153
5.5.3. Expert estimations 153
5.6. Discussion 157
5.7. Conclusion 161
5.8. Acknowledgements 161
5.9. References 162

6. Artikel 4: Wintersturmschäden im Schweizer Wald von 1865 bis 2014 169
6.1. Zusammenfassung 171
6.2. Einleitung 172
6.3. Material und Methoden 173
6.3.1. Eingrenzung der Aufgabenstellung 173
6.3.2. Zielgrösse: Schadholzvolumen 173
6.3.3. Bezugsgrössen: Waldfläche, Vorrat und Windstärke 174
6.3.4. Datenqualität 176
6.4. Resultate 176
6.4.1. Anzahl Winterstürme und Schadholzmengen 176
6.4.2. Schäden je Kanton 177
6.4.3. Windstärke und Schäden 178
6.4.4. Zeitliche Entwicklung der Sturmschäden 179
6.5. Diskussion 180
6.5.1. Datenqualität 180
6.5.2. Risiko von Wintersturmschäden 181
6.5.3. Schadholzmengen 182
6.6. Folgerungen 183

6.7. Literatur 184

7. Generelle Diskussion und Schlussfolgerungen 189

7.1. Allgemeiner Überblick 191

7.2. Quellenkritik 193

7.2.1. Datenherkunft 193

7.2.2. Sturm- und Schadendaten 194

7.2.3. Walddaten 195

7.2.4. Winddaten 196

7.2.5. Temperatur- und Niederschlagsdaten 197

7.3. Artikel 1 198

7.3.1. Waldentwicklung und Wintersturm-Schadereignisse 198

7.3.2. Zustand des Waldbodens während Wintersturmereignissen 199

7.3.3. Sturmschadrelevante Winddaten 200

7.4. Artikel 2 200

7.4.1. Lange homogene Windgeschwindigkeits-Datenreihen 200

7.4.2. Entwicklung der Häufigkeit und Schwere von Wintersturm-Schadereignissen im Wald des Kantons Zürich 201

7.4.3. Zusammenhang zwischen Winddruck und Sturmschaden 201

7.5. Artikel 3 202

7.5.1. Räumlicher Zusammenhang zwischen Winddruck und Schadflächenanteil auf nationaler Ebene 202

7.6. Artikel 4 204

7.6.1. Räumliche Sturmschadmuster 204

7.6.2. Aktualisierung von Reihen zu Wintersturmschäden und Windgeschwindigkeiten 204

7.7. Gesamtschau 205

7.8. Ausblick / Weitere Fragen 208

7.9. Literaturverzeichnis zu genereller Diskussion und Schlussfolgerungen 209

Abbildungsverzeichnis 221

Tabellenverzeichnis 225

Anhang 227

Zusätzliches Material zu Artikel 2 229

Publikationen 233

Lebenslauf 235

1. Einführung

Sturmschäden waren bereits seit dem 19. Jahrhundert die grösste Naturgefahr für die Wälder Europas (Schelhaas et al., 2003). Die künftige Entwicklung des Sturmgeschehens dürfte regional unterschiedlich verlaufen, wobei für Mitteleuropa eine Zunahme erwartet wird (Mölter et al., 2016). Auf lokaler Ebene differenziert sich die Sturmgefährdung in der Schweiz, insbesondere durch die jeweilige topographische Lage (Dierer et al., 2014).

Zwei der grundlegenden Eigenschaften des Windes können mit Windrichtung und Windgeschwindigkeit beschrieben werden. Übersteigt der 10-min-Mittelwert der Windgeschwindigkeit 75 km h^{-1} besitzt er Sturm- und ab 120 km h^{-1} Orkanstärke. An der Erdoberfläche wirksame Stürme finden hauptsächlich in der Troposphäre statt, für die man allgemein eine Dicke von 10 km annehmen kann (Kraus und Ebel, 2003). Hohe Gebirgszüge können darum ihren Verlauf beeinflussen.

Die schadenträchtigsten Stürme in Europa wurden von Frontalzyklonen verursacht (Prahl et al., 2015), die sich von Ost nach West bewegten und entgegen des Uhrzeigersinnes drehten (Kraus und Ebel, 2003). Sie erreichten ihre höchsten Windgeschwindigkeiten wenn sich die Kaltfront südlich des Zentrums der Zyklone befand. Schäden entstanden generell dann wenn die Einwirkung auf ein Gut grösser war als ihre physische Widerstandskraft.

Sturmschäden, Waldzustand und Windrichtungen sowie Windstärken und -geschwindigkeiten wurden in der Schweiz seit den 1860er Jahren regulär erfasst, da sich in dieser Zeit die wissenschaftlichen, technischen, verwaltungsorganisatorischen, sozialen und ökonomischen Verhältnisse entsprechend entwickelten. Seit etwa derselben Zeit traten nach mehreren Jahrzehnten wieder nennenswerte Winterstürme mit entsprechenden Schäden in den Wäldern auf (Landolt, 1861). Datensammlungen zu Sturmschäden waren am Beginn der Untersuchung vorhanden (Coaz, 1880; Bütikofer, 1987; Holenstein, 1994; Pfister, 1998; Pfister, 1999). Keine dieser Sammlungen war vollständig bezüglich der Wintersturmschäden in den Wäldern der Schweiz auf kantonalem Level.

Windgeschwindigkeiten wurden seit der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts als Windspitzen und mittlere Windgeschwindigkeiten gemessen. Lange Datenreihen waren selten, da Stationsverlagerungen und Messgerätewechsel Homogenisierungen insbesondere wegen der hohen räumlichen Variabilität des Windes erschwerten (Schüepp, 1973). Komplette lückenlose lange Windmessreihen lagen zu Beginn der Studie nicht vor (Schiesser et al., 1997a).

Die Wälder der Schweiz nahmen seit etwa der Mitte des 19. Jahrhunderts sowohl hinsichtlich ihrer Fläche (Brändli, 2000; Ginzler et al., 2011a) als auch des stehenden Vorrats zu (Kurz et al., 1998; Abegg et

al., 2014). Datenbasierte Zeitreihen auf kantonalem Level waren aber weder zu Waldfläche noch stehendem Vorrat vorhanden.

Windwirkungen auf Bäume einschliesslich Schädigungen wurden auf vielfältige Weise untersucht und die Resultate einzelner Studien zeigten unterschiedliche Haupteinflussfaktoren auf (Hollenstein, 2002; Hanewinkel et al., 2011; Schindler et al., 2012a; Mitchell, 2013; Gardiner et al., 2016). Einige Autoren wiesen darauf hin, dass Untersuchungsergebnisse zu Sturmschäden ohne Einbezug des Windes als Variable mit Vorsicht bzw. unter der Voraussetzung von Annahmen bezüglich der Windverhältnisse zu betrachten waren (Hollenstein, 2002; Dobbertin, 2005; Hanewinkel et al., 2014).

Darum wurde mit der hier vorgelegten Studie der Versuch unternommen, sich dem Zusammenhang von Sturmschaden und Wind mittels einer historisch-räumlichen Herangehensweise einschliesslich ausgewählter Fallstudien zu nähern. Das Ziel der Untersuchung war es, Quantifizierungen des Einflussfaktors Wind durchzuführen.

Für den ersten Artikel dieser Dissertation wurden aufgrund dessen die Datengrundlagen insbesondere zu Sturmschäden, Waldfläche, stehendem Vorrat, Temperatur, Niederschlag und Windspitzen beschafft, zusammengestellt und grundlegende Auswertungen vorgenommen. Die Resultate zu den Entwicklungen der einzelnen Variablen über die Zeit wurden graphisch dargestellt. Die beobachteten Sturmschäden wurden zusätzlich mittels proportionaler Werte im Verhältnis zur Waldflächen- und Vorratssituation im Winter des Jahres 2000 adjustiert. Die Entwicklung der Sturmschäden wurde zudem für unterschiedliche zeitliche Abschnitte und Schadens-Clustergrössen ermittelt, um Veränderungen besser zu verdeutlichen.

Es wurde eine Fallstudie zu den wetterbedingten Standortsfaktoren Gefrorenheit und Feuchte des Bodens durchgeführt. Dafür wurden die Wetterelemente Temperatur und Niederschlag im Zusammenhang mit ihren Wirkungen auf den Waldboden untersucht. Der Grund dafür war, dass verschiedentlich Gefrorenheit/Ungefrorenheit bzw. nicht durchfeuchteter Boden/durchfeuchteter Boden für besonders kleine/grosse Wintersturmschäden in ursächlichen Zusammenhang gebracht wurden. Im Ergebnis der Fallstudie wurde aufgezeigt, wie sich im betroffenen Gebiet die durchschnittliche Temperatur der Winterhalbjahre seit 1864 entwickelte und sich der durchschnittliche Niederschlag über diesen Zeitraum veränderte. Die wetterbedingten Standortfaktoren Gefrorenheit und Feuchte des Bodens wurden nach der Häufigkeit ihres Auftretens dahingehend beurteilt, ob ein jeweils beobachteter Zustand als das Ausmass von Sturmschäden in besonderem Masse beeinflussend gelten konnte oder den Normalfall darstellte.

In einer weiteren Fallstudie wurden Wintersturmschäden und Windspitzen der MeteoSwiss-Station Zürich in ihrer Entwicklung über den Teil des Messzeitraums ausgewertet, für den Daten verfügbar waren. Die Wintersturm-Maxima [m s^{-1}] der Windspitzen wurden zu den beobachteten relativen Schäden [$m^3 ha^{-1}$] in Beziehung gesetzt, um deren Zusammenhang zu ermitteln. Ausserdem wurden alle Windspitzen ab 30 m s^{-1} sowie bei Informationen über beobachtete Wintersturmschäden im Wald auch darunter liegende Windspitzen im Diagramm dargestellt. Hinzugefügt wurden Angaben zu nicht-forstlichen Schäden, dem Vorliegen eines Wintersturms im Falle von Windspitzen ab 35 m s^{-1}, und im Vergleich dazu die beobachteten Ausmasse des Sturmschadens im Wald als Schadanteile am stehenden Vorrat. Diese Darstellungen illustrierten sowohl den Zusammenhang als auch die Entwicklung von Schäden und Windspitzen.

Im zweiten Artikel der hier vorgestellten Studie wurde die eingehendere Arbeit mit Winddaten vorgestellt, da die Ergebnisse der Fallstudie zu Wind und Schaden des ersten Artikels unerwartet enge Zusammenhänge aufzeigte, was erweiterte Untersuchungen rechtfertigte. Es wurde gezeigt wie es gelang, lange Datenreihen aus Anemometer-Messungen sowohl für die Windspitze als auch für mittlere Windgeschwindigkeiten zu finden, zusammenzustellen und mittels Daten von Parallelmessungen und Metadaten zu homogenisieren. Zudem wurden Daten der Wintersturmschäden des Kantons Zürich auf Forstkreis-Level zusammengestellt. Anschliessend wurden die geschädigten Vorratsanteile im Forstkreis des Ortes der Windmessung bzw. allen anderen Forstkreisen in Beziehung zu den Winddrücken der Windspitzen und mittleren Windgeschwindigkeiten gesetzt. Aus den ermittelten Verhältnissen wurden einerseits Rückschlüsse auf den Zusammenhang zwischen den verschiedenen Windparametern und den Schäden, andererseits auf den räumlichen Zusammenhang des Ortes der Windmessung mit den aufgetretenen Schäden gezogen.

Zudem wurden Wintersturm-Schadereignisse von 1895 bis 2004 in 5-Jahres-Cluster eingeteilt und die Summen der Anteile der geschädigten stehenden Vorräte ermittelt. Über eine gleichartige zeitliche sowie eine betragsmässige Clusterung wurden mit den Windspitzen und Stundenmittelwerten entsprechende Darstellungen angefertigt. Damit wurde erreicht, dass sowohl Häufigkeiten als auch beobachtete Maxima der einzelnen Variablen in ihrer Entwicklung dargestellt als auch visuell miteinander verglichen werden konnten.

Die im dritten Artikel vorgestellte Studie hatte, nach den erfolgreichen Darstellungen der Zusammenhänge vornehmlich zeitlich verteilter Wind- und Schadendaten in den Artikeln 1 und 2, zum Gegenstand, Zusammenhänge räumlich verteilter Wind- und Schadendaten mittels Fallstudien vertieft

nachzuweisen. Als Datengrundlagen waren Luftbild-Schadeninventare der Stürme „Vivian“ und „Lothar“, die Befliegungslinien zu den Schadeninventaren sowie Rasterdaten zur Bewaldung der Schweiz aus der Arealstatistik als Layer im Geographischen Informationssystem ArcGIS vorhanden. Hinzu kamen Winddaten mit Lagekoordinaten zu Windspitzen sowie mittleren Windgeschwindigkeiten aus Beobachtungen der MeteoSchweiz sowie von einem Modelllauf aus dem selben Hause. Ausserdem lagen Isotachenkarten einer Expertenschätzung seitens der MeteoSchweiz vor. Die Ergebnisse der Verschneidung von Wald-, Schad- und Windmessort-Umgebungsflächen wurde mit den räumlich entsprechenden Maximalwerten der Winddrücke in Beziehung gesetzt. Als Resultat stellte sich heraus, welcher Windparameter am besten mit den Schadflächenanteilen der Wälder korrelierte.

Der Studie, die dem vierten Artikel zugrunde lag, hatte wiederum lange Zeitreihen von Wind- und Schadendaten zum Gegenstand, nachdem die Untersuchung der verfügbaren Ressourcen räumlich verteilter Wind- und Schadendaten abgeschlossen und nicht erweiterbar war. Verlängerte Zeitreihen der Wind- und Schadendaten boten neu die Möglichkeit, insbesondere die Daten der jüngsten Vergangenheit einzubeziehen, im Falle der Windspitzen auch Daten früher Messjahre. Für die Reihe der 26 schweren Wintersturmschäden wurden Schadholzvolumen und geschädigte Anteile des stehenden Vorrats im Diagramm dargestellt. Die Entwicklung der Windspitzen in 5-Jahres-Clustern nach Häufigkeit und Maxima-Clustern, einschliesslich der Anzahlen beobachteter schwerer Winterstürme, konnte bei der Aktualisierung nicht nur bis auf den Winter 2014, sondern bezüglich ihres Beginns auf das Jahr 1891 ausgedehnt werden.

Zum anderen wurde im vierten Artikel das Resultat der 150jährigen Zeitreihe der schweren Wintersturmschäden auf kantonalem Level veröffentlicht. Es wurden dafür die Mittelwerte der waldflächenbezogenen, relativen, Schadholzmengen [m^3ha^{-1}] je Kanton und für die Schweiz berechnet und nach der Höhe des mittleren Schadumfangs geordnet dargestellt.

Den Abschluss der Dissertation bildete eine generelle Übersicht, in der sowohl die erzielten Resultate der hier vorliegenden Studie dargestellt und diskutiert wurden, als auch ein Ausblick auf künftige Forschungen unternommen wurde, für die Resultate aus dieser Untersuchung dienlich sein könnten.

Die in der vorliegenden Arbeit wiedergegebenen anderenorts veröffentlichten Aufsätze beinhalten wo nötig insbesondere redaktionelle Verbesserungen und können darum von den originalen Publikationen abweichen. Es wurden keine sachlichen Veränderungen der Inhalte gegenüber der ursprünglichen Untersuchung vorgenommen.

2. Forschungsgegenstand und Problemstellung

2.1. Grundlegendes zu Stürmen

2.1.1. Stürme als Naturgefahren

Als Folge des derzeitigen globalen Klimawandels wurden zunehmende Risiken durch Naturgefahren beobachtet und ein Anhalten dieses Trends für die Zukunft als sicher angesehen (IPCC, 2014). Dabei stellen Naturgefahren für das Leben und die Gesundheit von Menschen sowie für materielle Werte ein permanentes Schadrisiko dar. Die Höhe des Risikos kann nach Ort und Zeit variieren. Sie ist sowohl von der Präsenz und Ausprägung der jeweiligen Naturgefahr selbst als auch der vorhandenen Menge von gefährdetem Gut abhängt, das der Naturgefahr ausgesetzt ist. Diese Umstände beeinflussen ihre sozio-ökonomische Wirkung entscheidend (IPCC, 2012).

Stürme gehören zu den physikalischen atmosphärischen Naturgefahren. Sie sind insbesondere durch sich rasch bewegende Luftmassen gekennzeichnet. Stürme, die Sturmfluten verursachten, und Erdbeben stellten in der jüngeren Vergangenheit beinahe abwechselnd das kostenträchtigste Schadereignis, gefolgt von Überflutungen, Stürmen und Überschwemmungen (Faust, 2008; MunichRE, 2015). Dabei wurde für Mittel- und Nordeuropa prognostiziert, dass extreme Windgeschwindigkeiten im Winter zunehmen werden (Kovats et al., 2014). Bereits seit dem 19. Jahrhundert und mit weiter zunehmender Tendenz im 20. Jahrhundert waren Sturmschäden die grösste Naturgefahr für die Wälder Europas (Schelhaas et al., 2003). Dieser Trend sollte sich auch in der Zukunft fortsetzen (Seidl et al., 2014b).

2.1.2. Allgemeines zu Stürmen

Grundlegende Eigenschaften des Windes können mit Windgeschwindigkeit und Windrichtung beschrieben werden. Bei grossem Druck- und Energiegefälle zwischen verschiedenen Luftmassen kann die Strömung sehr stark werden. Übersteigt der in der Standardhöhe von 10 m über dem Erdboden (WMO, 2006) gemessene 10-min-Mittelwert der Windgeschwindigkeit 21 m s^{-1} (Flemming, 1994) bzw. 75 km h^{-1} (Kraus und Ebel, 2003), besitzt der Wind Sturmstärke. Erreicht die Windgeschwindigkeit einen 10-min-Mittelwert von mindestens 120 km h^{-1}, hat der Sturm Orkanstärke erreicht. Werden nur kurzzeitig Windgeschwindigkeiten der Sturmstärke erreicht, so kann man von Sturmböen sprechen. Diese sind für die Versicherungswirtschaft das Mass für die Anerkennung als Sturmschaden, in solchen Fällen also Sturmböenschaden.

Je höher die Geschwindigkeit ist, mit der der Wind weht, in umso kürzerer Zeit realisiert sich der Transport der betroffenen Luftmasse. Somit leisten Stürme wichtige Beiträge beim Ausgleich wegen unterschiedlich hoher Sonneneinstrahlung entstandener Energie-Gefälle in der Troposphäre.

An der Erdoberfläche wirksame Stürme finden hauptsächlich in der untersten Atmosphärenschicht statt, wie auch die meisten der das Wettergeschehen an der Erdoberfläche bestimmenden Prozesse. Diese Schicht, die Troposphäre, hat eine Dicke von ca. 10 bis 15 km und repräsentiert ca. 75 bis 90 % der Masse der Atmosphäre (Exner, 1925; Kraus und Ebel, 2003). Gebirgszüge wie der Jura mit Höhen bis 1700 m oder die Alpen mit Höhen bis weit über 4000 m stellen darum Hindernisse dar, die grossen Einfluss auf den Verlauf von Stürmen ausüben können.

2.1.3. Mittelbreitenzyklonen als Ursache für Stürme

In Europa verursachen Stürme die grössten Schäden (Prahl et al., 2015). Solche Stürme werden von Mittelbreitenzyklonen der nördlichen Hemisphäre hervorgerufen. Andere in Europa auftretenden Stürme wie Föhnsturm, Gewittersturm, Tornado, Regional-/Lokalsturm, Ostwindsturm (schweizerisch: Bisensturm) betreffen nur viel kleinere Gebiete oder besitzen geringere Intensität als die stärksten Westwindstürme.

Je nach der aktuellen Ausprägung von Azorenhoch und Islandtief trifft die von der amerikanischen Ostküste zuströmende Westwindtrift auf Europa (Neu, 2009). Wo sich warme tropische und kalte polare Luft entsprechend annähern, entstehen horizontale Tiefdruckwirbel, die Ausdehnungen in der Grössenordnung mehrerer Tausend Kilometer erreichen können. Diese Wirbel bestehen aus Warm- und Kaltluftsektor, die jeweils durch Fronten voneinander getrennt sind. Sie werden darum beispielsweise auch Frontalzyklonen (Wernli et al., 2003), Mittelbreitenzyklonen oder extratropische Zyklonen genannt. Bei ihrer Entstehung schiebt sich warme Luft im Osten nach Norden und Kaltluft fliesst im Westen in südliche Richtung. Das erzeugt einen Drehsinn des Systems entgegen des Uhrzeigersinns. Über dem Nordatlantik können sich Zyklonen weitgehend ungestört entwickeln. Sie sind in der Lage, innerhalb von kurzer Zeit grosse Energiemengen über grosse Distanzen zu transportieren. Je schneller das geschieht, desto höhere Windgeschwindigkeiten treten dabei auf (Kraus und Ebel, 2003).

Da sich Frontalzyklonen west-ostwärts ziehend im Gegen-Uhrzeigersinn drehen, addieren sich Dreh- und Zugbewegung zu höheren Geschwindigkeiten im Süden des Zentrums der Zyklone. Allgemein gilt: je stärker das Druckgefälle ist, umso stärker weht der Wind innerhalb der Zyklone. Gelangt ein solches

Tiefdrucksystem in eine entsprechende Entfernung zu grösseren Bodenerhebungen wie Gebirgszügen, dann kann die Aspirationswirkung des Tiefs dort Föhnwinde auslösen, die ihrerseits Sturmstärke erreichen und Schäden verursachen können (Coaz, 1880). Grosse Zyklonen können Randzyklonen bilden, die auch Mesozyklonen genannt werden, früher auch als „Theilminimum“ (Coaz, 1880) bezeichnet wurden. Die ursprüngliche Zyklone wird dann oft als Haupt- oder Mutterzyklone bezeichnet (WSL und BUWAL, 2001). Randzyklonen haben Durchmesser von meist deutlich unter 1000 km, bewegen sich an der Peripherie der Hauptzyklone in deren Drehrichtung und rotieren ihrerseits (Kraus und Ebel, 2003). Damit können sie besonders hohe Geschwindigkeiten über der Erdoberfläche erreichen.

2.1.4. Ursachen für das Schädigungspotential von Zyklonen

Winterliche Mittelbreitenzyklonen stellen für die west- und mitteleuropäischen Wälder das grösste Schadrisiko dar (Schelhaas et al., 2003; Gardiner et al., 2010). Diese Zyklonen transportieren grosse Energiemengen von Süd nach Nord. Je nach Rauigkeit der Erdoberfläche setzen die Zyklonen auf ihrem Weg kleine Anteile ihrer Energie dort als Reibungsverluste um. Werden dabei Menschen oder Güter getroffen und war die dabei umgesetzte Energie zu gross, so spricht man zuallermeist von Wintersturmschaden (OcCC, 2007; Prahl et al., 2015). Der Grund für die Saisonalität des Schädigungspotentials liegt in der winterlich höheren Energiedifferenz zwischen Tropen und Polargebiet. In den meisten Fällen nehmen diese Zyklonen in ihrer Stärke rasch ab wenn sie auf ihrer Zugbahn vom Nordatlantik her den europäischen Kontinent erreicht haben, das heisst ihr Kerndruck steigt dann relativ schnell. Das muss aber nicht zwingend der Fall sein. Dies zeigte insbesondere eine Mesozyklone, die erst über dem Festland ihren tiefsten Kerndruck erreichte und bislang unbekannt grosse Schäden in den Wäldern Europas verursachte. Diese Randzyklone war unter dem Namen „Lothar“ bekannt (WSL und BUWAL, 2001).

Um die Energie, die vonnöten war, einen Baum zu entwurzeln, ihn ganz oder teilweise zu brechen, oder auch nur Blätter bzw. Nadeln abzureissen, wird das Tiefdrucksystem geschwächt. Da die zur Umsetzung verfügbare Energie einer grossen Mittelbreitenzyklone in der Grössenordnung des Zerstörungspotentials von Wasserstoffbomben liegt (Kraus und Ebel, 2003), lässt sich erahnen, dass selbst bei der Erzeugung von Millionen Kubikmetern Schadholz nur relativ kleine Teile des Energievorrats eines Wintersturms umgesetzt werden.

Dass nur die stärksten Frontalzyklonen die grössten Schäden anrichten können, liegt im Zusammenspiel von der Intensität des Energieumsatzes auf grossen Flächen und der Seltenheit ihres Auftretens begründet. Wären Stürme wie „Lothar“ oder „Vivian“ häufiger, z.B. jährlich wiederkehrende Ereignisse, so würde man aufwändigeres Befestigen von Dachziegeln oder sturmfestere Alternativen zum Dachziegel fraglos als normal hinnehmen. Solche weitreichenden Wahlmöglichkeiten stehen allerdings nur im technischen Bereich des Habes und Gutes zur Verfügung. Beim Besitztum am Wald tritt der Sonderfall ein, dass es sich hier vorrangig um ein Eigentum an Forstpflanzen, zumeist Bäumen, handelt. In diesem Falle ist der Waldbesitzende aus praktischen Gründen bezüglich der Befestigung seiner Bäume auf die vorhandenen Böden seiner Waldstandorte und bei der Baumartenwahl auf Holzgewächse angewiesen. Unter den heutigen Gegebenheiten naturnaher Forstwirtschaft kann man den Boden als eher unveränderliche Komponente des Waldes ansehen, von Ausnahmen wie etwaigen Versauerungsprozessen abgesehen (Braun et al., 2003; Mayer et al., 2005). Somit kann der Mensch nicht viel an der Verankerungsunterlage seiner Waldbäume ändern (Kuhn, 1995). Hinsichtlich der Wahl der Baumarten gibt es hingegen einen natürlichen Spielraum, dessen Nutzung von den Interessen des Waldbesitzenden abhängig ist, so dem gewünschten Grad der Naturnähe oder dem erwarteten Ertrag an Nutzholz, um nur zwei Aspekte zu nennen. In jedem Falle bleibt die Auswahl aber auf Holzgewächse beschränkt –und damit auch die Bandbreite der maximal möglichen schadlosen Energieaufnahme der einzelnen Individuen im Falle eines sie betreffenden Sturms. Innerhalb dieses Spannungsfeldes versuchen Waldeigentümer und -bewirtschafter, ihre Forstpflanzen möglichst gut gegen drohende Schadeinflüsse wie Sturmeinwirkungen zu schützen. Sie werden dabei auch durch neue wissenschaftliche Erkenntnisse unterstützt, Sturmschäden, und damit der schwersten Bedrohung des Waldes, vorzubeugen (Usbeck, 2010; Hanewinkel et al., 2015; Gardiner et al., 2016). Einen weiteren Beitrag dazu sollte auch die hier vorliegende Studie leisten.

2.2. Windbeobachtung

2.2.1. Windschätzung

Wind, die bewegte Luft an sich, ist für das blosse menschliche Auge nicht sichtbar, da Luft weit überwiegend aus farblosen Gasen besteht (Stickstoff, Sauerstoff, Argon, Kohlendioxid, Wasserdampf). Trotzdem sind dem Menschen auch ohne die Zuhilfenahme von Messgeräten zutreffende

Einschätzungen der Windkomponenten Geschwindigkeit und Richtung durchaus möglich. Man macht sich hierbei zunutze, dass die unsichtbare gasförmige Luft als bewegtes Fluid Kraftwirkungen auf flüssige Fluide, wie zum Beispiel Wasser, und feste Körper ausübt. Grundsätzlich kann man hinsichtlich der Windschätzung nun unterscheiden, ob die vom Menschen zu Einschätzung benutzte Windwirkung auf die schätzende Person selbst oder Bestandteile seiner wahrnehmbaren Umgebung trifft.

Schätzt der Mensch die Windwirkung auf sich selbst ein, so können verschiedene Sinne angesprochen werden, wie z.B. bei der Feststellung der Windrichtung der Hörsinn (Flemming, 1994). Eine solcherart persönliche Schätzung ist natürlich nur für den direkt einwirkenden Wind möglich. Hier muss sich das Individuum dem Wind an der gewünschten Messstelle selbst aussetzen. Das ist aber bisweilen nicht vorteilhaft. Gerade bei stärkerem Wind ziehen es viele Menschen vor, sich selbst an einem windgeschützten Ort aufzuhalten und trotzdem eine zutreffende Einschätzung zur aktuellen Windsituation vorzunehmen.

Bei der indirekten Windschätzung hilft die optische Wahrnehmung oft am besten, aber auch der Hörsinn kann insbesondere bei der Einschätzung der Windgeschwindigkeit nützlich sein. Bei der phänomenologischen Windschätzung macht sich der Mensch zunutze, dass das bodennahe Windfeld seine Kraftwirkungen auf Flüssigkeiten und feste Körper je nach deren Beschaffenheit zeigt. Bei Flüssigkeiten sind dies insbesondere je nach Windstärke differenzierbare Stadien der Wellen- und Schaumkronenbildung. Feste Körper können Wirkungen unterschiedlich starker Winde im elastischen oder plastischen Bereich der Deformation zeigen, oder auch die Bewegung fester Partikel in der Luft, wie z.B. Rauch. Hier können sich Windwirkungen zum Beispiel vom ruhenden Blatt am Zweig eines Baumes bis zur Zerstörung vorher fest gefügter Holzgebäude bemerkbar machen, oder im senkrechten Aufsteigen oder der spezifischen Ablenkung von Rauchsäulen, je nach Windstärke.

Windwirkungen wie die hier Beschriebenen treten regelmässig ein. Darum ist es möglich, sie Kategorien zuzuweisen und daraus Skalen zu entwickeln. Die wohl Bekannteste und am häufigsten Angewendete dieser Windwirkungsskalen ist die Beaufort-Skala (Schüepp, 1950; Flemming, 1994; Kraus und Ebel, 2003), die im Falle besonders starker Winde ergänzt werden kann, so z.B. durch die Fujita-Skala (für Tornados und Downbursts, mittlerweile weiterentwickelt zur Enhanced Fujita-Skala, in den USA üblich) oder TORRO-Skala (für Tornados und Downbursts, in Europa angewendet, basiert auf gemessenen Windgeschwindigkeiten).

2.2.2. Grundlegende Möglichkeiten der Windmessung

Die technisch einfachsten Messgeräte für die horizontale Bewegung der Luft sind für die Windgeschwindigkeit die Windplatte, oder Plattenanemometer, und für die Windrichtung die Windfahne. Beide Messgeräte sind durch zumindest eine bewegliche Platte gekennzeichnet, die entsprechend des Windes ihre Lage ändert. Die Wirkungsweise ist in beiden Fällen mechanisch und beruht darauf, dass die Platten dem Strömungsdruck der Luft ausweichen. Windplatten dienen zur Windstärkemessung. Es gibt die Grundprinzipien Schwing- und Druckplatte. Bei Ersterer ermöglicht eine horizontale Aufhängung, dass sich die Platte von der Senkrechten in Richtung der Waagerechten auslenkt, bei der Druckplatte, dass die senkrecht zur Windrichtung stehende Platte linear verschoben wird und dadurch ein Zeiger ausschlägt. Bei der Windfahne, bekannt insbesondere als Abschluss von Turmdächern, ist die Aufhängung vertikal, sodass die Platte in die Richtung des Windes gedreht wird. Um Schätzungenauigkeiten abzuhelfen, können Plattenanemometer durch Skalen ergänzt werden, die im Gegensatz zu den beweglichen Platten fix montiert sind. Im einfachsten Falle werden diese Messgeräte manuell abgelesen und die so ermittelten Werte üblicherweise händisch in Listen vermerkt. Solche Ablesungen finden zu festgelegten Uhrzeiten statt, meist dreimal täglich.

Die Messung der Windrichtung wird meist durch Windfahnen sichergestellt, wobei die Registrierung der Windrichtungen üblicherweise automatisch, normalerweise mittels elektrischer Übertragung, erfolgt. Für die Messung der Windgeschwindigkeit wurden verschiedene Systeme entwickelt, sowohl für die Messung der mittleren Windgeschwindigkeiten als auch der Böen. Das Flügelrad-Anemometer wurde im 17. Jahrhundert erfunden, im 18. Jahrhundert Staurohr-Anemometer, im 19. Jahrhundert das Schalen-Anemometer und im 20. Jahrhundert entsprechend des technischen Fortschritts eine Vielzahl weiterer Systeme wie das Ultraschall-Anemometer, Laser-Doppler-Anemometer oder Hitzdrahtanemometer (Wikipedia, 2016b). Die heutzutage am häufigsten in meteorologischen Bodenstationen verwendeten Anemometer dürften Schalenanemometer für die mittlere Windgeschwindigkeit, Staudruck-Anemometer für die Böen und Ultraschall-Anemometer für die dreidimensionale Messung beider Windgeschwindigkeits-Parameter sein. Wurden automatische Registrierungen früher häufig mittels mechanischer Übertragung auf analoge Weise vorgenommen, so sind heutzutage drahtgebundene bzw. drahtlose digitale Übertragungs- und Aufzeichnungsmethoden üblich.

2.2.3. Zur Geschichte der Windmessung in der Schweiz

Die Windfahne, auch als Wetterfahne bekannt, dürfte auf dem Boden der Schweiz bereits vor deren Gründung in Benutzung gewesen sein. Die älteste Überlieferung der Beschreibung einer Windfahne stammte aus dem antiken Griechenland und rührte von vor dem Beginn der heute in Mitteleuropa üblichen Zeitrechnung her. Schon diese Windfahne bildete den Abschluss eines Turmdaches, ähnlich wie heute noch vielfach sichtbar ist. Somit war die Messung der Windrichtung in der Schweiz genau so alt wie die Schweiz. Die Messung von Windgeschwindigkeiten in der Schweiz betraf sicherlich nur einen kürzeren Zeitraum, da die Windplatte als ältestes Anemometer zwischen 1450 (in Italien) und 1667 (in Grossbritannien) mindestens drei Mal erfunden wurde (Wikipedia, 2016a). Waren Windplatten noch recht einfache technische Einrichtungen, so stellten Windrad- und Schalenanemometer lange Zeit relativ hohe Anforderungen an den Aufwand bei ihrer Herstellung und Unterhaltung. Trotzdem wurden bereits vor dem Start des regulären Schweizerischen Messnetzes im Dezember 1863 nicht nur Windplatten sondern auch selbstregistrierende Anemometer angeschafft und in Betrieb gesetzt, so durch den Kanton Bern innerhalb seiner meteorologischen Centralanstalt auf der Sternwarte in Bern in den Jahren 1861 und 1863 (Wild, 1866), wo bis 1978 Windmessungen vorgenommen wurden. Seit Dezember 1863, dem Beginn des meteorologischen Jahres 1864, wurden in der Schweiz meteorologische Messungen innerhalb des nationalen Messnetzes vorgenommen, wobei von Beginn an auch Windmessungen integriert waren. In Zürich begann die Windmessung mit einem Schalen-Anemometer im Sommer 1872 auf dem Dach des Semper-Observatoriums (Billwiller, 1873). 1882 wurde das meteorologische Observatorium auf dem Säntis und damit die erste meteorologische Station im Hochgebirge der Schweiz in Betrieb genommen, die auch mit einem Anemometer ausgerüstet war. Mit dem Jahr 1891 wurde die Windmessung in Zürich auf den Anemometer-Turm des neu erbauten Physikgebäudes der ETH Zürich verlagert, wofür dort ein neues Anemometer installiert wurde (Billwiller, 1893), das bis zum 16. November 1933 seinen Dienst versah. Mit der Inbetriebnahme des neuen Hauptsitzes der 1881 gegründeten Schweizerischen Meteorologischen Zentralanstalt (MZA, ab 1979 Schweizerischen Meteorologischen Anstalt, SMA, seit 2000 Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie, MeteoSchweiz) bezog auch das seit dem 29. November 1933 messende Anemometer im Jahre 1949 seinen neuen Standort in der Krähbühlstrasse (Schüepp, 1973), wo dessen Registrierungen am 3. September 1993 eingestellt sowie es im Jahre 2002 abgebaut und eingelagert wurde. Die meisten Wetterstationen der MeteoSchweiz wiesen dem gegenüber kürzere Wind-Messreihen auf. Das galt auch für die Station Neuchâtel, wo immerhin seit 1864 an ungefähr demselben Ort Wind gemessen wurde.

Die Messungen wurden hier allerdings erst seit den Zeiten des 2. Weltkrieges mit einem Anemometer ausgeführt, stellten aber eine homogene Datenreihe dar (Schüepp, 1973).

Seit der Inbetriebnahme der ersten Anemometer in der Mitte des 19. Jahrhunderts hatte ihre Anzahl über Jahrzehnte zugenommen. Erst mit der Einführung des Automatischen Messnetzes (ANETZ, 60 Messstationen) im Jahre 1981 wurde ein nationales Messnetz installiert, welches untereinander vergleichbare Winddaten lieferte (MeteoSchweiz und BfL, 1980). Nach Ergänzung, Aus- und Ersatzbauten wurden zum heutigen automatischen Messnetz, SwissMetNet, 260 Stationen gezählt, wobei auf 151 Stationen davon Windmessungen vorgenommen wurden (MeteoSchweiz, 2016).

Kontinuierlich gemessen und registriert wurden in den ersten Jahrzehnten der regulären Schweizer Windmessung die Windrichtung sowie die Windgeschwindigkeit für die Parameter stündliche mittlere Windrichtung, stündlicher Windweg und Windspitze (Uttinger, 1968). Mit der Inbetriebnahme des ANETZ waren die Daten der Böenpitzen und stündlichen Mittelwerte der Windgeschwindigkeit sowie die entsprechenden Windrichtungen verfügbar. Anfangs der 1990er Jahre kamen die 10-Minuten-Mittelwerte hinzu.

2.3. Wald in der Schweiz

2.3.1. Walddefinition

Die Frage, was ein Wald ist, kann sehr unterschiedlich beantwortet werden (Bürgi, 1998; Brändli, 2000; BUWAL und WSL, 2005). Einer jeden Walddefinition liegt mindestens ein Zweck zugrunde, der von der definierenden Anspruchsgruppe verfolgt wird und den Inhalt der Definition entsprechend beeinflusst.

Die zwei derzeit am häufigsten verwendeten Arten von Walddefinitionen beschreiben Wald entweder als eine mit Forstpflanzen bestockte Fläche, von der zumindest ein entsprechend der jeweiligen Definition bestimmter Anteil Derselben überschirmt sein muss und die eine festgelegte Mindestausdehnung besitzt, wie im LFI (EAFV, 1988; Brassel und Brändli, 1999; Brändli, 2010; Abegg et al., 2014) angewendet, oder eine Fläche, deren gültige katastermässige Zuordnung auf Wald lautet, wie z.B. in der eidgenössischen Forststatistik benutzt. Diese beiden Arten der Walddefinition haben zur Folge, dass eine Bodenbedeckung mit Bäumen, oder auch Baumbedeckung, auch ausserhalb des Waldes angetroffen

werden kann, andererseits nicht aller Wald von Bäumen bedeckt sein muss. So ergab es sich, dass in der Schweiz bei einem Waldanteil von 29.4 % der Baumanteil 27.0 % der Landesfläche betrug und sich zwar 93.9 % der Bäume im Wald, aber immerhin 6.1 % aller Bäume ausserhalb des Waldes, im Nichtwald, befanden (Ginzler et al., 2011b).

2.3.2. Wälder der Schweiz

Das Territorium der Schweiz befindet sich in Europa zwischen dem 46. Und 48. Grad nördlicher Breite und damit in den mittleren Breiten, die hier durch ein gemässigtes sommerfeuchtes Klima gekennzeichnet sind. Abgesehen vom Alpenraum liegt die Schweiz in der Zone der sommergrünen Laubwälder (Walter, 1970). Reliefbedingt treten aber starke klimatische Abweichungen auf, die besonders in den höhergelegenen Gebirgsgegenden immergrüne Nadelwälder der entsprechenden Klimazonen wachsen lassen (Leibundgut, 1951).

Unter natürlichen Bedingungen wäre der Boden der Schweiz weitgehend bewaldet, abhängig vom Standort mit verschiedenen Waldgesellschaften, abgesehen hauptsächlich von den nicht durch Wald erschliessbaren Gewässern, kleinklimatisch zu ungünstigen Lagen und Flächen oberhalb der Waldgrenze, die heute bei 1700 bis 2200 m ü.M. liegt. In den tiefen Lagen bildeten Laub- und Mischwälder die hauptsächliche Bodenbedeckung. Mit zunehmender Höhe über dem Meeresspiegel nimmt der Laubholzanteil ab. Die am höchsten gelegene Waldgrenze in den Kontinentalen Hochalpen werden durch Gebirgsnadelwälder gebildet (Ott et al., 1997). Auf der Alpensüdseite kann auch die Buche den oberen Waldgürtel abschliessen.

Der heutige, mit 56% hohe, Anteil des Nadelwaldes an der gesamten Waldfläche ist nicht nur Ergebnis des vorherrschenden Klimas sondern auch Resultat der Bewirtschaftung der Wälder (BUWAL und WSL, 2005), die den Grossteil der Waldfläche insbesondere in den Tieflagen nachhaltig verändert hat. Ein vielfach sichtbares Zeichen davon ist die starke Verbreitung der Fichte bis in die tiefsten Lagen. Die am höchsten gelegenen Wälder sind klimatisch bedingt auch heute zumeist Gebirgsnadelwälder (Ott et al., 1997), wobei die Waldgrenze heute in der Regel unter der natürlichen Waldgrenze liegt, was oft in der historischen Landnutzung begründet liegt. Die Ursache dafür ist in der Regel die Alpbeweidung (Burga und Perret, 1998).

2.3.3. Zur Geschichte des Waldes seit dem Beginn der Regenerationszeit

Die Entwicklung des Waldes hing nicht nur vom Klima und dessen Veränderungen über die Zeit ab. Die Geschichte des Waldes in Mitteleuropa war eng mit der Geschichte der da lebenden Menschen verknüpft. Nach langen Zeiten der Zurückdrängung des Waldes seit dem Beginn der Besiedelung des Gebietes der heutigen Schweiz setzte eine noch heute andauernde Phase der Wiederbewaldung ein. Der Höhepunkt der Entwaldung dürfte in der Schweiz um die Mitte des 19. Jahrhunderts erreicht worden sein (Mather und Fairbairn, 2000). Um 1840 wurde die Waldfläche auf 710,000 Hektare geschätzt (BUWAL und WSL, 2005), was eine Bewaldung von knapp 17% der Landesfläche bedeutete.

Zu dieser Zeit gingen auch tiefgreifende gesellschaftliche und wirtschaftliche Veränderungen in der Schweiz einher (Schuler et al., 2000). In diese Zeit fiel in der Schweiz die Regenerationszeit, ein gesellschaftlicher Zeitabschnitt, der durch liberale Erneuerungen wie der Inkraftsetzung liberaler Verfassungen oder auch den Erlass von Forstordnungen in mehreren Kantonen gekennzeichnet war und in dem 1843 die Gründung des Schweizerischen Forstvereins stattfand. Gleichzeitig schritt auch in der Schweiz die Industrialisierung voran, wenngleich durch fehlende moderne Verkehrswege und andere Randbedingungen wie die unvollständige Vereinheitlichung der Mass- und Münzsysteme unter vorerst komplizierteren Bedingungen als in den Nachbarstaaten (Mathieu et al., 2016). Infolge besonders der wirtschaftlichen Entwicklung und der Bevölkerungszunahme war mangels Alternativen einerseits der Holzbedarf besonders hoch, andererseits durch die gesellschaftlichen Zustände der Wald häufig einer dem reinen Gegenwartsdenken untergeordneten und nicht nachhaltigen Nutzung ausgesetzt (Schuler et al., 2000). Mit den Neuerungen in der Regenerationszeit wurden die Stimmen lauter, die auch bezugnehmend auf wissenschaftliche Erkenntnisse forderten, in nationalem Massstab zu denken und nachhaltig zu handeln. Letztlich führte die Regeneration 1848 zur Gründung des heutigen Bundesstaates. In ihm gehörte mit dem Kampf um die Verhinderung der in diesen Zeiten zunehmend auftretenden Hochwässer (Pfister, 2009) auch die Naturgefahrenprävention zu den nun lösbar gewordenen nationalen Aufgaben. Hierbei kam dem Erkennen und Bekämpfen des desolaten Zustands vieler Waldungen zunächst vorrangig in den Hochgebirgsregionen (Landolt, 1862) grosse Bedeutung zu. Daraus folgte, dass im Jahr 1874 die Oberaufsicht über die Wasserbau- und Forstpolizei im Hochgebirge der Eidgenossenschaft übertragen wurde, für dessen Umsetzung 1876 das Gesetz über die Forstpolizei im Hochgebirge in Kraft trat. Ab 1897 entfiel die Einschränkung auf das Hochgebirge, sodass das Forstpolizeigesetz von 1902 Gültigkeit für alle Waldungen der Schweiz erlangte. 1991 wurde das seit 1902 geltende Gesetz durch das noch heute gültige Bundesgesetz über den Wald ersetzt. Alle diese Gesetze und die zu ihrer Vollziehung erlassenen Verordnungen hatten zum Ziel, den Wald zu erhalten

und zu mehren sowie die nachhaltige Nutzung zu sichern, wozu auch ein fach- und sachgerechter Forstdienst zählte (Schuler, 2007).

Die Zunahme des Waldes ab der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts beruhte also anfangs auf dem umgesetzten Willen zum Gegensteuern einer befürchteten Holznot und der Abwendung von Naturgefahren durch obrigkeitliche Massnahmen wie der Einführung rechtlicher Regelungen zum Schutze des Waldes und dem Aufbau einer geregelten Forstwirtschaft auf wissenschaftlicher Basis (Flury, 1925). Später kamen auch passive Faktoren zum Tragen wie die Substituierung des Roh- und Werkstoffes sowie Energieträgers Holz durch andere Material- und Energiequellen und der Wandel in der Produktionsweise der Landwirtschaft (Mather und Fairbairn, 2000). Vor wenigen Jahren war die Schweiz zu rund 30% bewaldet, wobei die Wälder zu 56% aus Nadelwald, 19 % Mischwald und 25 % Laubwald bestanden und eine jährliche Zunahme um 0.4% verzeichnet wurde (BUWAL und WSL, 2005). Neueste Ergebnisse aus den Erhebungen der Jahre 2009-2013 zum Landesforstinventar 4b zeigten eine Waldfläche von 30.1% (±0.2%) des Waldes ohne Gebüschwald (Abegg et al., 2014) und damit geringere Veränderungen der Waldfläche als zuvor.

2.3.4. Zur Geschichte der Waldinventarisierung in der Schweiz

Erste Inventar-Versuche auf nationaler Ebene fielen in die Jahre der aufkommenden Regenerationszeit und wurden während dieser wiederholt bzw. fortgeführt. An diesen Erhebungen nahmen aber nicht alle Kantone teil, sodass die Ergebnisse bruchstückhaft blieben (Franscini, 1829; Franscini, 1848; Franscini, 1851), wobei zudem in der 1829 veröffentlichten „Statistik der Schweiz“ die gesamte Landesfläche noch „auf 47,900 Geviert-Kilometer angenommen“ wurde. In seiner zweiten, gänzlich umgearbeiteten Auflage „Neue Statistik der Schweiz“ entschied sich Franscini für eine gesamte Oberfläche von „circa 41,170 Quadratkilometer“ aus einer Auswahl von fünf verschiedenen Angaben, die von ihren jeweiligen Autoren zu dieser Zeit für gültig erklärt waren, allerdings in ihren Extrema um über 20% voneinander abwichen (Franscini, 1848). Angaben zur Waldfläche hingegen waren Franscini zu dieser Zeit von 12 Kantonen bekannt, die rund 47% seiner angenommenen Fläche der Schweiz repräsentieren und die er zudem teilweise als unvollständig oder fragwürdig einstufte. Auf dieser Grundlage schätzte er den Anteil der Bewaldung der Schweiz auf „ungefähr siebzehn Hundertstel des Gebiets“ (Franscini, 1848). „Um 1840 schätzten Experten die Waldfläche der Schweiz auf etwa 0.710 Millionen Hektaren.“ (BUWAL und WSL, 2005), was bei der Annahme einer Gesamtfläche der Schweiz von 41,285 km^2 in etwa der selben Fläche wie in Franscini (1848) entspricht. Die „Neue Statistik der Schweiz“ erfuhr einen Nachtrag, in der die

Landesfläche aufgrund einer neuen Mitteilung des Leiters der trigonometrischen Vermessung der Schweiz als „der Wahrheit weit näher kommend“ von „in Geviertkilometern 40,200 ungefähr“ angegeben wurde (Franscini, 1851). In dieser Quelle waren Angaben zu den Waldflächen von 15 Kantonen vorhanden, die damals zu „beiläufig 1/5 ihres eigenen Flächeninhaltes“ bewaldet waren und „etwas über die Hälfte“ der Fläche der Schweiz repräsentierten, wobei hier keine Angabe über eine Annahme der allgemeinen Gültigkeit für die ganze Schweiz enthalten war.

Die Ergebnisse der ersten schweizweit durchgeführten Erhebung im Auftrag des Schweizer Bundes wurde 1862 veröffentlicht und erbrachten eine Bewaldung der Schweiz von 18.8% der Landesfläche (Landolt, 1862), wobei die Angaben teilweise auf Schätzungen und nicht auf eigentlichen Messungen beruhten. Seit dem Berichtsjahr 1877 wurden die Waldflächen aus kantonalen Angaben regelmässig erhobenen und zusammengestellt sowie in fast lückenloser Folge jährlich durch die Schweizerische Bundesverwaltung veröffentlicht. Dabei war in den ersten Jahrzehnten eine zunehmende Vollständigkeit der erfassten Flächen zu verzeichnen, da anfangs Waldflächen zum Teil „aus dem topographischen Atlas entnommenen Zahlen“ (Flury, 1925) entsprachen. Die eigentliche Vermessung der Waldflächen (SHLD, 1883) war 1924 noch nicht abgeschlossen, jedoch weiter vorangeschritten als die ganze Grundbuchvermessung, für die damals „noch der Zeitraum bis 1976 vorgesehen“ war (Flury, 1925).

Eine erste Ermittlung des schweizerischen Waldareals zu wissenschaftlichen Zwecken datierte auf die frühen 1970er Jahre und hatte aufgrund der dafür nötigen ökologisch orientierten Walddefinition ein zur Forststatistik abweichendes Ergebnis zur Folge (Ott, 1972). Eigentliche, in sich konsistent geplante, ausgeführte und ausgewertete vollständige Waldflächenangaben aus Landesforstinventaren waren erst ab Mitte der 1980er Jahre verfügbar (EAFV, 1988; Brassel und Brändli, 1999; Brändli, 2010; Abegg et al., 2014).

Die stehenden Vorräte waren erst seit viel späterer Zeit Gegenstand nationaler Erhebungen. Die erste diesbezügliche Untersuchung war noch beschränkt auf die vorratsbezogenen Angaben der Ende 1951 gültigen Wirtschaftspläne der öffentlichen Waldungen der Schweiz (EIFJF, 1954). Was bereits für die Waldflächen galt war auch beim Vorrat der Fall: Eigentliche, in sich konsistent geplante, ausgeführte und ausgewertete vollständige Angaben aus Landesforstinventaren waren erst ab Mitte der 1980er Jahre verfügbar (EAFV, 1988; Brassel und Brändli, 1999; Brändli, 2010; Abegg et al., 2014).

2.4. Sturmschäden im Schweizer Wald

2.4.1. Zur Einordnung von Sturmschäden

Für den Schweizer Wald stellen Stürme das grösste Schadrisiko dar (WSL und BUWAL, 2001; Schelhaas et al., 2002). Die Grössenordnung der Schadholzmengen, bis zu denen Schäden je Ereignis im Wald erwartet werden können, liegt für Winterstürme bei 10^7 Kubikmetern, für Föhnstürmen bei 10^6 Kubikmetern, für Lokal-/Regionalstürme bei 10^5 Kubikmeter und die übrigen Stürme bei 10^4 Kubikmetern (unpublizierte Grundlagendaten).

Die Hauptwindrichtung der den Wäldern der Schweiz gefährlichsten Stürme, der Winterstürme, liegt in einem Bereich zwischen Südwest und Nordwest, was in der Zugrichtung der Frontalzyklonen begründet ist. Die Kerne der in der Schweiz schadenträchtigen Zyklone ziehen nördlich der Schweiz in einem Abstand weniger Hundert Kilometer, z.B.“Lothar“, bis gegen 1000 km, z.B. Kyrill, vorbei (MünchnerRückversicherungs-Gesellschaft, 2001; Zimmerli und Renggli, 2015). Je nach Lage der in das Tief eingebetteten Kaltfront kommt diese aus westlichen, z. B. „Lothar“ (WSL und BUWAL, 2001), bis nördlichen, z.B. „Vivian“ (Holenstein, 1994), Richtungen auf die Schweiz zu, muss die Schweiz aber nicht unbedingt erreichen, wie es z.B. bei „Kyrill“ der Fall war (Spatzierer et al., 2007).

Föhnstürme sind auf die Föhngebiete begrenzt, die insbesondere die grossen Alpentäler betreffen, als Fallwinde die Täler entlangwehen und noch in Sturmstärke das Vorland erreichen können (MeteoSchweiz, 2015). Lokal-/Regionalstürme sind durch ihr Auftreten in nur einem bestimmten Gebiet gekennzeichnet und können reliefbedingt auftreten. Durch konvektive Ereignisse hervorgerufene Stürme können in allen Teilen der Schweiz auftreten. Bisenstürme betreffen hauptsächlich das Schweizer Mittelland und dessen Begrenzungen Jurasüdfuss und Alpennordrand und äussern sich als nordwestliche Winde, die auch in ihren starken Ausprägungen in den Tieflagen –bevorzugt im Genferseeraum– die Grenze zum Sturm meist nicht stark überschreiten, durchaus aber Schäden in den Wäldern verursachen können (BAFU, 2009).

2.4.2. Zur Geschichte der Sturmschäden und ihrer Registrierung

Längste Zeitreihen zu Sturmereignissen lagen für Südkorea vor und gingen bis ins Mittelalter zurück (Yoo et al., 2015). Rein forstlich orientierte Schadereignis-Inventare umfassten üblicherweise nur geringere Zeitabschnitte (Schelhaas et al., 2003; Nilsson et al., 2004; Hanewinkel et al., 2008; Gardiner et al., 2010; Hanewinkel et al., 2014). Dort wude nicht näher dargestellt, ob in den davor liegenden Zeiten keine entsprechenden Ereignisse stattfanden. Hinweise darauf konnten allgemeinere Untersuchungen über Sturmschäden in derselben Region geben.

Auswertbare zeitgenössische Aufzeichnungen zu Sturmschäden auf dem Gebiet der Schweiz datierten bis ins späte 15. Jahrhundert zurück (Wullschleger, 1974; Pfister, 1998; Pfister, 1999). Die Zusammenstellung dieser Zeitreihe hat ergeben, dass um 1680 eine rund 100jährige Periode zahlreicherer Quellen zu Sturmschadenbeobachtungen einsetzte. Diesem Zeitraum schloss sich wiederum eine über 50jähige Zeitspanne mit nur einzelnen derartigen Informationen an. Nach der Mitte des 19. Jahrhunderts nahm dann die Anzahl der Berichte zu Sturmschäden sprunghaft zu und verblieb auf sehr hohem Niveau bis um 1920. Anschliessend gingen Nachrichten über solche Beobachtungen stark zurück, verblieben aber bis zum Ende des untersuchten Zeitraums, 1960, auf höherem Niveau als in der rund 200 Jahre zurück liegenden Periode (Pfister, 1998). Beschränkte man sich nur auf die quellenseitig eindeutig abgesicherten schweren und sehr schweren Stürme, dann entstand eine Ereignislücke von 1757 bis 1875 (Pfister, 1998; WSL und BUWAL, 2001).

Zum Ausbleiben von Wintersturmschadensmeldungen kam hinzu, dass zu diesen Zeiten über anderweitig verursachte Sturmschäden am Wald berichtet wurde, so durch Gewitter, oder das Auftreten von lokalen Stürmen in Gebirgstälern, und dass der Hauptschaden des Sturmes im Wald die zu starke Erhöhung der Verdunstung war (Coaz, 1861). Die Wirkung des Sturmes auf Nadelwälder beschrieb Coaz (1861) folgendermassen: „Leichte Winde lassen das steife, kaum merklich gestielte Nadelblatt unbewegt, der Sturm aber braust durch den Nadelwald wie ein gewaltiger Strom und wiegt die stolzen Häupter.“ In einer andern Quelle wurde über die Sturmschadanfälligkeit von Bäumen berichtet, dass vom Borkenkäfer befallene Fichten, deren Befall durch zu intensive Harznutzung begünstigt wurde, im so geschwächten Zustand Windwurf durch Sturmwinde erlitten (Kasthofer, 1828). Für den Winter 1859/1860 wurde berichtet, dass nach einer Reihe von „guten“ Jahren ein „schlechtes“ auftrat, da nach längerer Zeit wieder Winterstürme erhebliche Schäden im Wald verursacht hatten (Landolt, 1861).

Im Jahr 1880 wurden wegen drei Schadsturmereignissen des Jahres 1879, zwei Winterstürmen mit 570,967 m^3 und 115,105 m^3 Schadholz sowie einem konvektiven Ereignis mit 2,150 m^3 Schadholz, eine

Ereignisanalyse publiziert (Coaz, 1880), worin der schadenträchtigste dieser drei Stürme wegen seiner Stärke und Zerstörungen als „ausserordentliche Naturerscheinung“ betrachtet wurde. Später wurde dieser Sturm als das Jahrhundertereignis der Stürme des 19. Jahrhunderts bezeichnet (Pfister, 1998).

Im 19. und frühen 20. Jahrhundert kam es in einigen Kantonen wiederholt vor, dass die Sturmschäden nur in den Staatswäldern und/oder in den öffentlichen Wäldern erfasst und veröffentlicht wurden. Bisweilen wurden anstelle von Zahlen zu Schadholzvolumen oder geschädigten Waldflächen auch verbale Einschätzungen zu den entstandenen Sturmschäden angegeben. Spätestens anfangs des 20. Jahrhunderts war „der Wind in Sturmstärke ein gefürchteter Feind“ (Flury, 1925).

Bis in die zweite Hälfte des 20. Jahrhunderts trat kein weiterer „Jahrhundertsturm“ auf. Nennenswert war aber der Föhnorkan vom 5. Januar 1919, dessen Waldschäden noch heute in ihren Folgen als praktisch gleichaltrige Bestände in den Föhntälern der Alpennordseite, besonders im Rheintal, sichtbar waren. Der Föhnsturm vom 7. August 1962 hinterliess 2 Mio. m^3 Schadholz (Sturmarchiv, 2016), grösstenteils im Berner Oberland. Diese Sturmholzmenge sollte aber nur für kurze Zeit das schwerste bekannte Sturmereignis bleiben, denn im Februar und März 1967 richtete eine Wintersturm-Serie einen Schaden von über 2.7 Mio. m^3 an. Übertroffen wurden diese Schäden im ausgehenden 20. Jahrhundert zuerst vom Wintersturm „Vivian“ am 27. Februar 1990 mit 4.9 Mio. m^3 (Holenstein, 1994) und am 26. Dezember 1999 vom Wintersturm „Lothar“ mit 12.7 Mio. m^3 (WSL und BUWAL, 2001). Ab dem Beginn der 1960er Jahre wurden zwar nach den Schadereignissen Erhebungen durchgeführt, die dabei entstandenen Unterlagen waren später nur noch zu den schwersten Ereignissen auffindbar (Pfister, 1998). Einige Jahre nach dem Orkan „Lothar“ wurde dieses Problem für die Schäden im Wald dahingehend gelöst, dass ereignisbezogen seitens des BAFU bei den Kantonen Schadholz-Mengenschätzungen eingefordert wurden. Dieses Verfahren entsprach dem erfolgreichen der Vorgehen des eidg. Handels- und Landwirthschafts-Departements nach dem Orkan vom 20. Februar 1879 (Coaz, 1880) sowie dem schwedischen Schadens-Meldeverfahren (Nilsson et al., 2004).

2.5. Sturmschadforschung

2.5.1. Allgemeines

Stürme sind seltene Ereignisse, die insbesondere durch extreme Windgeschwindigkeiten gekennzeichnet sind. Es wurde bereits Resultate einer Anzahl von Studien zu (extremen) Windgeschwindigkeiten bzw. Winddrücken oder auch Sturmereignissen, dabei namentlich der Abschätzung ihrer Wiederkehrwahrscheinlichkeit, insbesondere mittels extremwertstatistischer Methoden veröffentlicht (WSL und BUWAL, 2001; Ceppi et al., 2008; Gilleland et al., 2013; Stucki et al., 2014; Case et al., 2016; Hong et al., 2016; Martins et al., 2016; Patlakas et al., 2016; Pinheiro und Ferrari, 2016; Shin et al., 2016; Wang und So, 2016). Weitere Gesichtspunkte der Sturmschadforschung sind z.B. die Analyse beobachteter Schäden einzelner Ereignisse (Bazzigher und Schmid, 1969; Holenstein, 1994; Kuhn, 1995; WSL und BUWAL, 2001; Dobbertin, 2005) oder die Reanalyse historischer Schadstürme (Brönnimann et al., 2012; Stucki et al., 2014; Stucki et al., 2015; Welker et al., 2016).

2.5.2. Zum Stand der Erforschung von Windwirkungen an Bäumen

Wind wirkt auf alle Landpflanzen (Gardiner et al., 2016), wozu auch die zur Baumbedeckung zählenden Bäume gehören. Entsprechend wirken diese Bäume wiederum als Hindernisse für die ungestörte Luftbewegung auf die bodennahe Ausprägung des Windes (Ross und Vosper, 2005; Dupont et al., 2008; Qiu et al., 2008; Markfort et al., 2010; Ruck et al., 2012).

Bei Betrachtungen zu Windwirkungen an Bäumen werden oft zwischen Bäumen in städtischen Gebieten (Ciftci et al., 2014), in Obstplantagen (Koizumi et al., 2008) und in Wäldern (Schindler et al., 2012a) unterschieden. Bei Letzteren kann man wiederum Literatur zu unterschiedlichen Wäldern bzw. Beständen finden, so z.B. Wäldern verschiedener Klimazonen (Canham et al., 2001; Martin und Ogden, 2006; Bouchard et al., 2009; Zell und Hanewinkel, 2015), zu Ur- oder Sekundärwäldern (Butler et al., 2014), künstlich angelegten Beständen (Schindler et al., 2012b), ungleichaltrigen (Hanewinkel et al., 2014) oder gleichaltrigen Beständen (Bergeron et al., 2009), zu Rein- (Schütz et al., 2006b) oder Mischbeständen (Griess et al., 2012), Beständen mit reduzierten Bestockungsgraden (Clark und Mitchell, 2007; Gibbons et al., 2007; Frank und Ruck, 2008; Zeng et al., 2009), isolierten Beständen (Clark et al., 2007), oder auch bestimmten Bestandesteilen wie Waldrändern (Cassiani et al., 2008).

Unterschiedliche natürliche Windquellen sind Anlass der Forschung (Mitchell, 2013), speziell zum Beispiel Tornados (Blanchard, 2013), Hurrikane (Canham et al., 2010), tropische Stürme (Kamimura et al., 2013) oder Westwindstürme (Quine, 1991), darunter Winterstürme. Windwirkungen werden auch unabhängig von speziellen Windquellen untersucht, wie Baumschwingungen (Mayer, 1987; Moore und Maguire, 2005; James et al., 2006; Spatz et al., 2007; Schindler et al., 2012b) und einwirkende physikalische Parameter wie Kräfte und Momente betrachtet (Moore et al., 2005; Vanomsen, 2006; Lundström et al., 2007a; Lundström et al., 2007b; Lundström et al., 2007c; Queck et al., 2012).

Die Untersuchung der Ursachen von Sturmschäden im Wald hat bereits eine relativ lange Tradition (Landolt, 1861; Coaz, 1880; Woelfle, 1936; Woelfle, 1937a; Woelfle, 1937b; Rottmann, 1986; König, 1995), wobei mit voranschreitendem Kenntnisstand und ständig verbesserten technischen Möglichleiten auch die Ergebnispalette grösser wird. Heute kann man Bereiche unterscheiden wie Ereignisanalyse, In-situ-Versuche, Laborversuche und Modelle.

Aus **Analysen einzelner Schadereignisse** resultierten teilweise unterschiedliche Bestandes- und Standortsfaktoren als **wichtige Einflussgrössen** bzw. weniger wichtige Variablen. Die Auswertung eines einzelbaum-basierten Sturmschadeninventars des Orkans „Lothar“ erbrachte unter Zuhilfenahme modellierter Winddaten die **Baumhöhe** als wichtigste Einflussgrösse. Weit weniger wichtig waren das Verhältnis der Baumhöhe zum Brusthöhendurchmesser und die Baumart (in absteigend er Reihenfolge: Fichte (*Picea abies* (L.) Karst.), die Gruppe Tanne (*Abies alba* Miller) - Douglasie (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) und die Gruppe Waldföhre (*Pinus sylvestris* L.) - Lärchen (Larix spp.)). **West- bis südliche Expositionen** und **wassergesättigte Böden** hatten höhere Wahrscheinlichkeiten für Schäden als andere Expositionen bzw. Böden (Schmidt et al., 2010). Auf der Grundlage der Daten eines Schadeninventars des Orkans Kyrill, das entsprechende Geländemodell, Angaben zum forstlichen Management, die Bestandes- und Standortsdaten sowie Informationen zu den Waldtypen enthielt, ergaben sich als wichtigste Einflussgrössen, in absteigende Reihenfolge: **Höhe über dem Meeresspiegel**, **Bestandeshöhe**, **Exposition einschliesslich Exponiertheit gegenüber Nachbarbeständen**, hydromorphe Böden, Fichtenanteil je nach Standort, Abstand vom Bestandesrand (Risiko nimmt mit zunehmender Entfernung vom Rand ab). Geringeren Einfluss hatte die Bestandesdichte, wobei das Risiko mit abnehmender Dichte zunahm (Mikita et al., 2012). Ausgehend von inventarisierten Lothar-Schäden in Lothringen, Frankreich, wurden zwei verschiedene Strukturen von Buchen-Beständen (*Fagus sylvatica* L.) basierend auf einer vereinfachten Analyse der mechanischen Eigenschaften der Bäume unter Einbeziehung des Biegemoments mittels zweier unterschiedlicher Modelle auf Einzelbaum-Level untersucht: Weibull-Verteilung der Festigkeiten und logistische Regression. Als Haupt-Einflussgrösse auf das

Schadensausmass wurde die **Baumhöhe** festgestellt, hinzu kam der **Kronendurchmesser**. (Bonnesoeur et al., 2013). Basierend auf GIS und Inventurdaten wurde eine Schätzung der Wintersturm-Schadwahrscheinlichkeit in Wäldern in Baden-Württemberg vorgenommen. Überstiegen die Böen 35 m s^{-1}, waren bei den Stürmen Wiebke und „Lothar" **Nadelwälder in stark exponierten Lagen auf wechselfeuchten Böden mit Buntsandstein-Grundgestein** am wahrscheinlichsten geschädigt (Schindler et al., 2012c). Bei einer ähnlichen Untersuchung des Inventars des Orkans „Lothar" waren es **Nadelwälder auf sauren, frischen bis feuchten Böden der Buntsandstein-Formation** (Schindler et al., 2009). Die Untersuchung des Einflusses der Bewirtschaftung auf das Ausmass von Sturmschäden erbrachte bei der Anwendung Generalisierter Linearer Gemischter Modelle auf Inventurdaten von Langzeitbeobachtungen auf Bestandes- bis Einzelbaumebene die Haupteinflussgrössen **Baumart** und **Baumhöhe**. Die Bewirtschaftung erklärte bis zu 20% des Sturmrisikos (Albrecht et al., 2012).

Bei Versuchen vor Ort handelte es sich üblicherweise um **Umzugsversuche**, bei denen **signifikante Zusammenhänge** der einwirkenden Zugkräfte auf gemessene Variablen ermittelt wurden. Daten aus Umzugsversuchen eigneten sich auch als Eingangsgrössen für mechanistische Modelle (Cucchi et al., 2005). In der jüngeren Vergangenheit wurden Versuche mit verschiedenen Baumarten und Baumartengruppen publiziert. Die Strandföhre (*Pinus pinaster* Ait.) (Cucchi et al., 2004) zeigte auf podsoligen Böden einen engen Zusammenhang des **kritischen Biegemoments zum Produkt aus Baumhöhe und Quadrat des Brusthöhendurchmessers (BHD)**. Für Balsamtanne (*Abies balsamea* L.) (Achim et al., 2005) resultierten die grössten Korrelationskeffizienten wenn das **kritische Biegemoment zur Stammmasse oder der Baummasse** in Beziehung gesetzt wurde. Fichte (*Picea abies* (L.) Karst.) , deren statische Momente beim Umziehen aufgenommen wurden, war mit dem **Quadrat des BHD zum kritischen statischen Moment** in ihrem Zusammenhang signifikant (Vanomsen, 2006). Western Redcedar (*Thuja plicata* Donn ex D. Don) und Western Hemlock (*Tsuga heterophylla* (Raf.) Sarg.) bewiesen bezüglich **Umzugswiderstand und Stammmasse** den engsten Zusammenhang (Byrne und Mitchell, 2007). Koniferen, gepflanzt in vulkanische Böden, erwiesen artspezifische Werte, wobei die Koniferenart mit der höchsten Umzugs-Resisenz sich auch im beobachteten Sturmschaden als am standfestesten hielt (Koizumi et al., 2007).

Bei anderen Versuche vor Ort wurden weitere Zusammenhänge untersucht, wie der **Zusammenhang des Wurzelwachstums mit Windrichtungen**. Fichte (*Picea abies* (L.) Karst.), Weisstanne (*Abies alba* Mill.) und Waldföhre (*Pinus sylvestris* L.) orientierten ihr Wurzelwachstum in Richtung des Windes, wobei dies **überwiegend in der Richtung der Hauptwindrichtung und weniger in der Richtung der seltenen starken Winde** gefunden wurde (Lundström et al., 2007b). Fichte (*Picea abies* (L.) Karst.) zeigte im

Wuchsverhalten **Adaption bezüglich der Hauptwindrichtung und saisonalen Windrichtungen**. Bei jungen Bäumen trat dies differenzierter auf als bei älteren Bäumen (Lundström et al., 2008).

Aufgrund der unstetigen und schwierig reproduzierbaren räumlichen und zeitlichen Eigenschaften des natürlichen Windes eigneten sich Modellversuche im **Windkanal**, **signifikante Zusammenhänge** von Baum- und Bestandeseigenschaften mit Windeinflüssen festzustellen. Im physischen Modell getestete Interaktionen zwischen Böen und Waldrändern (Tischmacher und Ruck, 2013) zeigten nach deren Überströmung **abwärts gerichtete Moment-Fluss-Spitzen 1.5 bis 4 Baumlängen nach dem Waldrand**. Die Stabilität verschiedener Bewirtschaftungssysteme wurde untersucht (Gardiner et al., 2005), wobei kein deutlicher Unterschied zwischen den einzelnen Systemen gefunden werden konnte, **nur ein leichter Vorzug des Bewirtschaftungssystems mit unterständigen Bäumen** erkennbar war. Die Verformung frischer, im Windkanal platzierter Laubholz-Baumkronen (Vollsinger et al., 2005) erbrachte Proportionalität zwischen **Strömungswiderstand und dem Produkt aus Kronenmasse und Windgeschwindigkeit** sowie dem **Produkt des Quadrats der Windgeschwindigkeit und der windgeschwindigkeitsspezifisch wirksamen Kronenfläche**.

Mittels komplexer **Modelle**, die nicht selten wiederum einen Komplex von Teilmodellen darstellten, wurde versucht, **signifikante Zusammenhänge** der Sturmschadrisiken auf Landschafts-, Bestandes- oder Einzelbaum-Niveau abzuschätzen. Mechanistische Modelle wurden dabei für die Windrisiko-Abschätzung verwendet (Gardiner et al., 2008; Hanewinkel et al., 2010). Ziel der Modelle war die Abschätzung des Sturmschadrisikos. So wurden zum Beispiel drei Versionen des hybrid-mechanistischen Windrisikomodells ForestGALES getestet (Hale et al., 2015), wobei **Baumhöhe** und **lokale Windgeschwindigkeit** als Haupteinflussfaktoren auf das Ausmass der Sturmschäden im Nadelwald auf Bestandes-Level gefunden wurden. WindFIRM/ForestGALES_BC arbeitete auf Einzelstamm-Basis, konnte verschiedene Baumarten und Baumhöhen verarbeiten und zeigte gute Übereinstimmung mit Observationen, wobei die **Baumhöhe** die wichtigste Variable war (Byrne und Mitchell, 2013). WINDA arbeitete auf Landschafts-Ebene und zeigte **gute Übereinstimmung zwischen modellierten und observierten Sturmschäden** im Wald (Blennow und Sallnäs, 2004).

Als ein weitergehender Schritt konnte die **Verknüpfung von Sturmschadrisiko-Modellen mit Vegetationsmodellen** gesehen werden. Das Wachstumsmodell PP3, verknüpft mit GALES, dem Risikomodell, das Teil des Entscheidungshilfe-Systems ForestGALES war, wurde auf Strandföhre (*Pinus pinsater* Ait.) angewendet: Die Erhöhung der Windgeschwindigkeit zeigte deutlichste Effekte modellierter Schäden mit steigender **Oberhöhe** (Cucchi et al., 2005). Ein neues Waldwachstumsmodell

unter Einbeziehung von Sturmschäden, dessen Prototyp erste Versuche erfolgreich bestanden hatte, zeigte sich bezüglich der simulierten Schäden vorerst mehr abhängig von den Input-Daten wie **Baumart** und **Baumhöhen** als von unterschiedlichen forstlichen Management-Regimes (Albrecht et al., 2015). Ein dynamisches Vegetationsmodell mit Einbezug von Sturmschaden, das empirische und mechanische Modelle einbezog und für das regionale Level in Schweden abgestimmt war, berechnete Schadanteile auf Kohorten-Ebene (Lagergren et al., 2012). Ein Modell zur Abschätzung der Produktivität von Wäldern in Südwestdeutschland auf Einzelbaum-Level unter Einbezug von Klimawandel, Sturmereignissen und unterschiedlicher Bewirtschaftung ergab, dass der **Frequenz der Sturmereignisse** die höchste Bedeutung zukam und die **Bewirtschaftung** Platz zwei einnahm. Änderungen durch Klimawandel, Temperatur und Niederschläge, zeigten geringeren Einfluss (Zell und Hanewinkel, 2015).

Ein wichtiges Ziel der Sturmschadforschung war, einen Beitrag zur Erarbeitung von Entscheidungshilfen zu leisten. Der Zweck solcher Entscheidungshilfen war es insbesondere, politische und wirtschaftliche Entscheidungsträger in ihrem Aufgabenbereich zu unterstützen, bei der Vorbeugung bzw. Bewältigung von Schadereignissen dienlich zu sein. So wurden z.B. bereits technische Entscheidungshilfen für das Management zur Vorbeugung von Sturmschäden erstellt (Kamimura et al., 2008) oder auch Entscheidungshilfen für das Management im Falle eingetretener Sturmschäden (BAFU, 2008; Riguelle et al., 2015).

2.5.3. Zur Geschichte der Forschung zu Sturmschäden im Wald in der Schweiz

In der zweiten Hälfte des 18. und im beginnenden 19. Jahrhundert wurden zunehmend häufiger Zustände der Wälder in der Schweiz kritisiert. Diese betrafen mangelhafte Bewirtschaftung sowie eine auch darum zunehmend befürchtete Holznot (d. J., 1859). Gegen Mitte des 19. Jahrhunderts kam Befürchtungen zu waldzustandsbedingt vermeidbaren Auswirkungen von Naturgefahren hinzu. Das führte dazu, dass sich in dieser Zeit in zunehmendem Masse Interessierte fanden, die forstliche Forschung auf der Basis des damaligen Standes der Wissenschaft vorantrieben (Flury, 1925).

Während der ersten Jahrzehnte der Sturmschadforschung auf wissenschaftlicher Basis wurden ereignisbezoge Erhebungen durchgeführt, wobei die beobachteten Schäden mit den um die Zeit des Sturmes herrschenden Wetterbedingungen in Zusammenhang gebracht wurden (Mousson, 1864). Auf derartigen Grundlagen veröffentlichte Berichte stützten sich auf gemessene Werte der

Schadholzmengen, gemessenen meteorologischen Daten und sturmschadbezogene Erlebnisberichte von zuständigen Forstfachpersonen sowie deren individuelle Deutungen (Landolt, 1861; Coaz, 1880).

Mit den Veröffentlichungen zu den Schäden der Wintersturmserie 1967 zeigte sich der Übergang von der Wiedergabe gesammelter Erlebnisberichte und Inventare zu komplexen Erhebungen und rechentechnischen Auswertungen zu Einflussgrössen, die bisher aus persönlichen Eindrücken heraus als die Höhe der Schäden mitbestimmend dargestellt wurden (Bosshard, 1967; Bazzigher und Schmid, 1969). Gleichzeitig wurde deutlich, dass gegenüber Grossereignissen verhältnismässig geringfügigen Schäden kaum noch Beachtung geschenkt wurde (Pfister, 1998). Als eine weitere Veränderung wurden die Schadholzmengen zudem zunehmend geschätzt statt eigentlich gemessen.

Seit den 1990er Jahren wurden Sturmschadereignisse verstärkt auch im Kontext historischer Ereignisse betrachtet, um sie besser einordnen und entsprechende Schlüsse ziehen zu können (Schiesser et al., 1997a; Schiesser et al., 1997b; Pfister, 1998; Pfister, 1999). Ein Auslöser dafür konnte insbesondere der Orkan „Vivian“ im Februar 1990 gewesen sein, der Schäden bis dahin unbekannten Ausmasses hinterliess.

2.5.4. Zum Stand der Ursachenforschung am Sturmschaden in der Schweiz

Die Wälder der Schweiz nahmen nach Fläche und stehendem Vorrat seit Jahrzehnten zu (EAFV, 1988; Brassel und Brändli, 1999; Brändli, 2010; Abegg et al., 2014). Zudem wurde erwartet, dass extreme Windgeschwindigkeiten im Gebiet der Schweiz künftig zunehmen werden (Kovats et al., 2014). Das bedeutete, dass sowohl Gefahr als auch Risiko von Sturmschäden weiter zunehmen (IPCC, 2014). Dabei hatten die Wälder der Schweiz seit 1990 mit „Vivian“ (Holenstein, 1994) und „Lothar“ (WSL und BUWAL, 2001) bereits zweimal den schwersten bis dahin bekannten Sturmschaden hinnehmen müssen. Hinterliess „Vivian“ in der Schweiz noch Schäden in der Grössenordnung einer Jahresnutzung, so waren es bei „Lothar“ 280 Prozent der jährlichen Nutzung (WSL und BUWAL, 2001). Bei beiden Stürmen handelte es sich um Winterstürme, verursacht durch Mittelbreitenzyklonen, deren Ausdehnung als Tiefdruckgebiet ein Mehrfaches der grössten Ausdehnung der Schweiz mass (Schüepp, 1995; WSL und BUWAL, 2001). Trotzdem traten bedeutende Teile der Schäden dieser Stürme in den Wälder der Schweiz in unterschiedlichen Gegenden auf. „Vivian“ schädigte mehr in den Inneralpen und „Lothar“ mehr im Mittelland, wobei es eine Überlappungszone in den Voralpen gab. Zudem wurden Unterschiede bei der

Zuordnung des Zusammenhangs der Schäden im Wald zu verschiedenen Parametern zwischen „Vivian“ und „Lothar“ festgestellt (Holenstein, 1994; Dobbertin, 2005).

„Vivian“-Schäden waren am häufigsten bei Hangneigungen von 50-80%, bei „Lothar“ waren es 0-20%. Die Schäden konzentrierten sich bei „Vivian“ auf Höhenlagen von 1200-1600 m über dem Meeresspiegel (Schüepp et al., 1994), bei „Lothar“ gab es dagegen „nur sehr geringe Unterschiede in der Schadverteilung mit der Meereshöhe“ (Dobbertin, 2005). „Vivian“ schädigte am häufigsten auf flachgründigen Böden (Kuhn, 1995), „Lothar“ auf tief- und sehr tiefgründigen Böden (Dobbertin, 2005). Für die „Vivian“-Schäden wurde einerseits das lokale Windregime als hauptsächlich verursachend gefunden und dass standörtliche Einflüsse deswegen in den Hintergrund traten (Schüepp et al., 1994), wobei andererseits „die standortskundliche Ursache der Sturmschäden“ als umso deutlicher hervorgehoben wurde (Kuhn, 1995). Den direkten Einfluss des Windes zu berücksichtigen war in verschiedenen Studien in der Schweiz nicht möglich (Schüepp et al., 1994; Dobbertin, 2005; Hanewinkel et al., 2014). Er wurde darum global abgeschätzt (Schüepp et al., 1994), oder zeigte für die Schweiz keinen signifikanten Zusammenhang zu den Schäden (Mayer et al., 2005; Schütz et al., 2006a). Einen engen Zusammenhang zwischen Schaden und Wind vermutend (Dobbertin, 2005) oder auf Folgen des Fehlens der Einwirkung als Variable hinweisend (Hollenstein, 2002) wurde in einigen Studien auch zur Vorsicht beim Umgang mit den Auswertungen hingewiesen.

Es wurden in jüngerer Zeit Resultate zu Forschungen vorgestellt, die modellierte Rekonstruktionen von Sturmschadereignissen beinhalten. Diese Studien basierten auf Wind-Reanalysedaten bzw. deren dynamischer feinerer Skalierung. Dabei handelt es sich relativ neue Verfahrensweise, die bereits heute überzeugend gute Ergebnisse zulässt (Brönnimann et al., 2012; Stucki et al., 2014; Stucki et al., 2015; Welker et al., 2016).

2.5.5. Zum Forschungsbedarf hinsichtlich Sturmschäden im Wald

Aktuelle Herausforderungen für Sturmschadenmodelle sind die Vervollkommnung des Prozessverständnisses, das Vertiefen der mechanistischen Grundlagen der Störungsmodelle und das Integrieren multipler Störungsprozesse in dynamische Ökosystemmodelle. Resultate aus diesen Bereichen können in Entscheidungshilfen einfliessen, die das forstliche Management unterstützen (Hanewinkel et al., 2010; Seidl et al., 2011).

Tendenziell geht heute die Wald-Sturmschadforschung eher vom Bestandes-Level zur Einzelbaum-Ebene, also mehr ins Detail. Die Vorzüge dafür liegen im grossen Detailwissen, das dann auch wieder auf höherer Generalisierungsstufe zur Verfügung steht, z.B. Einzelbaum-Wissen für Bestandes-Schadrisiken. In diesem Bereich ist zweifellos sehr grosser Forschungsbedarf vorhanden, der sich nicht nur in den bereits veröffentlichten Publikationen widerspiegelt, sondern auch zu weiterer Forschung auf diesem Gebiet führt. Gleichzeitig deutet dies darauf hin, dass hier bereits eine eingespielte Forschungslandschaft existiert, in der Lösungen der erkannten Fragestellungen angegangen werden.

Bei näherer Betrachtung von Übersichtskarten zu extremen Winterstürmen wurde allerdings auffällig, dass Verteilungen von bodennahen Windgeschwindigkeiten und Sturmschäden in Wäldern grossflächig nicht nur durch die Zugbahn des Tiefdruck-Kerns und die räumliche Verteilung des Waldes bestimmt zu sein schienen. Dadurch stellte sich die Frage, ob nicht auch grösserskalige Sturmschadrisiko-Verteilungsmuster existierten, die von den derzeit in Benutzung bzw. Entwicklung befindlichen Modellen (noch) nicht entsprechend berücksichtigt wurden. Sollte das der Fall gewesen sein, dann könnte dieses neue Wissen eröffnen, regional unterschiedliche Schadrisiken einzubeziehen.

Eine Möglichkeit, grossräumige Risiken zu erkennen, lag in der Aufarbeitung von Aufzeichnungen zu möglichst vielen Ereignissen. Eine Studie auf räumlich-historischer Basis konnte die gewünschten Resultate erbringen. Als Grundlage wurden möglichst vollständige und qualitativ hochwertige Daten und Metadaten zu allen Sturmschadereignissen eines möglichst grossen Zeitraums benötigt. Das betraf im vorliegenden Fall Informationen hinsichtlich Meteorologie, forstlicher Verhältnisse und Sturmschäden im Wald. Zu Beginn der Studie waren die benötigten Datenreihen sowie Metadaten grossenteils nicht verfügbar.

2.6. Wissenslücken und daraus für das Projekt abgeleitete Forschungsfragen

2.6.1. Katalog der Wintersturm-Schadereignisse im Kontext der Waldentwicklung

In Studien über Sturmschäden in Wäldern, oder generell zu Windwirkungen auf Bäume, wurde oft auf spezielle Umstände fokussiert. So wurden einzelne oder wenige Ereignisse betrachtet (Coaz, 1880;

Bazzigher und Schmid, 1969; Holenstein, 1994; Dobbertin, 2002; Braun et al., 2003; Mayer et al., 2005; Schindler et al., 2012c), wurden Daten relativ kleiner Untersuchungsgebiete verwendet (Peltola, 1996; Ciftci et al., 2014; Hanewinkel et al., 2014; Deegen und Matolepszy, 2015) oder Fallstudien zu speziellen Einflussgrössen wie Baumarten bearbeitet (Bruchert und Gardiner, 2006; Schindler, 2008; Albrecht et al., 2013; Bonnesoeur et al., 2013; Jelonek et al., 2013) oder Bewirtschaftung (König, 1995; Flesch und Wilson, 1999; Moore et al., 2013; Wallentin und Nilsson, 2014). Eine historische Studie zu räumlichen und mengenmässigen Umfängen von Waldschäden, einschliesslich Sturmschäden, in der Schweiz erfasste einen Zeitraum, der vor nunmehr über 50 Jahren endete (Bütikofer, 1987).

Um ein aktuelles Gesamtbild der Entwicklung der Sturmschäden in den Wäldern der Schweiz für die vergangenen 150 Jahre zu erhalten, erschien es angezeigt, eine darauf ausgerichtete historische Untersuchung durchzuführen.

2.6.2. Zustand des Waldbodens während Wintersturmereignissen

In der vorhandenen Literatur zu Einflussgrössen, die das Ausmass von Sturmschäden in Wäldern bestimmen, wurden neben anderen auch der Grad der Durchfeuchtung des Bodens oder das Vorliegen durchfrorenen Bodens als bedeutsam eingestuft (Coaz, 1880; Kamimura et al., 2012; Seidl et al., 2014a), wobei bisher keine gesicherte Aussage darüber gefunden werden konnte, ob im Untersuchungsgebiet zu verschiedenen Schadereignissen im Wald auch generell unterschiedliche Bodenzustände vorgelegen haben dürften.

Auch dieser Frage wurde darum für die hier vorliegenden Studie nachgegangen.

2.6.3. Räumliche Lage sturmschadenrelevanter Windmessungen

Es war eine breite Palette von Literatur vorhanden, das Thema Windwirkung an Bäumen berührte: zum Thema Windwirkung auf Pflanzen allgemein (Gardiner et al., 2016), speziell zu Windschäden in Wäldern (Rottmann, 1986; Mitchell, 2013; Hanewinkel et al., 2015) oder noch spezieller zu Windwurf von einzelnen Bäumen (Moore, 2014). Dabei liess sich eine breite Übereinkunft ablesen, dass ein Schaden eintrat wenn die Windeinwirkung zu gross war (Coaz, 1880; Quine, 1991; Gardiner et al., 2016). Allerdings war es aufwändig, die adäquate Zuordnung von Wind und Sturmschaden am Wald numerisch schlüssig darzustellen (Seidl et al., 2014a), oder überhaupt unmöglich, geeignete Winddaten einbeziehen

zu können (Hanewinkel et al., 2014). Das lag weniger in den Variablen begründet, die den Wald an seinem Standort kennzeichnen, als dass die Ursache dafür viel mehr in der hohen räumlichen und zeitlichen Variabilität des Windes begründet war, zu der sich ausserdem noch die Kompliziertheit seiner Messung gesellte (Hann, 1869; IPCC, 2013).

Damit durfte die Frage als noch offen gelten, ob es möglich war, geeignete Winddaten zu finden und verfügbar zu machen, mit denen Sturmschäden im Untersuchungsgebiet erklärt werden konnten.

2.6.4. Lange meteorologische Datenreihen für die Sturmschadenforschung

Sollten Studiengegenstände innerhalb gewisser Zeiträume betrachtet werden, so müssten entweder entsprechend verwendbare Daten verfügbar sein oder verfügbar gemacht werden. Ansonsten entstanden Datenlücken. Zu einem Problem konnte insbesondere bei langen Reihen beobachteter Daten werden, dass über die Zeit der Messperiode Änderungen eingetreten waren, die zwar nicht die Datenreihe an sich abbrachen, aber zu systematischen Änderungen in den aufgenommenen Werten führten. Solche Umstände mussten erkannt und wenn möglich durch Homogenisierungen behoben werden. Modellierte lange Reihen, wie der Zwanzigtes-Jahrhundert-Reanalyse-Datensatz (Compo et al., 2011) bzw. auf deren Grundlage ereignisbezogen erzeugte räumlich höher aufgelöste Daten (Stucki et al., 2014; Stucki et al., 2015; Welker et al., 2016) konnten in die hier vorgelegte Studie nicht einbezogen werden.

Für verschiedene Wettervariablen lagen lange Zeitreihen vor, die als homogene Datensätze verfügbar waren (Auer et al., 2001; Auer et al., 2007; Matulla et al., 2008; Füllemann et al., 2011; Clemmensen et al., 2014). In Bezug auf Wind waren zwar homogene Reihen zu Sturmwetterlagen vorhanden (Matulla et al., 2008; Clemmensen et al., 2014), die aber aus barometrischen Drücken (Matulla et al., 2008) oder grösserenteils Windstärkeschätzungen nach der Beaufortskala (Clemmensen et al., 2014) abgeleitet wurden. Für das spezielle Anliegen der hier präsentierten Studie erschienen aber nur Datenreihen bestehend aus Messwerten permanenter Windgeschwindigkeitsmessungen als geeignet. Barometrische Drücke sagten zwar sehr viel über die Stärke des Tiefdrucksystems aus, das den Sturm an sich verursacht, erfassten aber nicht unbedingt die Details der Vorgänge in der Kaltfront, in der jedoch die höchsten Windgeschwindigkeiten und die grössten Turbulenzen im Sturm auftraten (Kraus und Ebel, 2003). Windstärkeschätzungen hatten einen hohen Aussagewert über die bodennahe Windsituation in der Umgebung der Beobachtungsstelle, brachten aber den Nachteil mit sich, dass sie meist nur zu drei

täglichen Standardterminen erhoben wurden (Clemmensen et al., 2014). Alles, was zwischen diesen Terminen passierte, war dann nicht Gegenstand der Aufzeichnung. Das dürfte häufig auch die höchsten Windgeschwindigkeiten eines Sturmes betroffen haben.

Damit stellte sich die Frage, ob es überhaupt möglich wäre, geeignete Winddaten zu finden, da für eine Station ab 1891 verfügbare Rohdaten eine 40jährige Datenlücke aufwiesen (Schiesser et al., 1997a) und die räumlich nächstgelegene Boden-Windmessstation ein anderes Windregime zeigte (Uttinger, 1968). Für eine Verwendbarkeit sowohl der vorhandenen wie auch der noch zu findenden Daten stand überdies die Frage nach ihrer Homogenität bzw. Homogenisierbarkeit im Raume.

2.6.5. Entwicklung der Häufigkeit und Schwere von Wintersturm-Schadereignissen im Wald des Kantons Zürich

Eine aktuelle Übersicht über die Wintersturmereignisse, die den Kanton Zürich betrafen, sowie die Zuordnung der entsprechenden gemessenen Windgeschwindigkeiten waren nicht verfügbar. Zusammenstellungen der Wintersturmereignisse endeten bislang 1960 mit dem Hinweis auf Nichtverfügbarkeit neuerer Daten, insbesondere zu nicht-extremen Ereignissen (Pfister, 1998).

Daraus ergaben sich die im Projekt zu lösenden Fragen, ob nunmehr Schadendaten auch zu nicht-extremen Wintersturm-Schadereignissen bis in die neueste Zeit insbesondere für den Kanton Zürich verfügbar waren, ob Winterstürme im Kanton Zürich innerhalb des Untersuchungszeitraums in ihrer Anzahl zugenommen hatten und ob die zu den Zeiten der Ereignisse beobachteten maximalen Windgeschwindigkeiten Veränderungen zeigten.

2.6.6. Zusammenhang zwischen Windgeschwindigkeit und Sturmschaden

Es traten sowohl unterschiedliche Windgeschwindigkeiten zu unterschiedlichen Zeiten als auch an unterschiedlichen Orten auf. Im Falle des Eintretens von Sturmschäden im Wald konnte man feststellen, dass nach unterschiedlichen Ereignissen Schäden nicht immer am selben Ort verursacht wurden (Holenstein, 1994; WSL und BUWAL, 2001). Es galt als allgemein anerkannt, dass ein Sturmschaden eintrat wenn die Windeinwirkung zu gross war (Coaz, 1880; Quine, 1991; Gardiner et al., 2016).

Als Ursache für Schäden durch Winterstürme im Wald wurden eine lange Andauer extremer andauernder Windwerte (Holenstein, 1994), hohe mittlere Windgeschwindigkeiten (Schüepp et al., 1994), das kurzzeitige Einwirken extremer Windgeschwindigkeiten, der Böen (Quine, 1991; Lagergren et al., 2012; Bonnesoeur et al., 2013), oder auch bei Resonanz von Böeneinwirkungen und Baum-Eigenschwingungen (Mayer, 1987; Peltola, 1996; Rudnicki et al., 2008) genannt.

Die daraus resultierende Frage war, welcher der verfügbaren Wind-Parameter sich am besten eignete, das Ausmass der Schäden zu erklären.

Die Einflussgrössen, die das Ausmass von Sturmschäden im Wald bedingten, konnte Skalen zugeordnet werden, in denen sie ihre Wirksamkeit am deutlichsten zeigten. Hierbei wurde die Windgeschwindigkeit der regionalen Skala zugeordnet (Xi et al., 2008). Diese Resultate stammten von einer Untersuchung zu Hurricane- und Tornadoschäden.

In den Untersuchungen zur vorliegenden Studie waren darum die Fragen zu klären, ob auch für Winterstürme die Windgeschwindigkeiten zur Erklärung des Auftretens von Sturmschäden im Wald auf der regionalen Skala aussagekräftige Resultate liefern konnten und welcher Windparameter dazu am besten geeignet war.

2.6.7. Räumlicher Zusammenhang zwischen Winddrücken und Schadflächenanteilen auf nationaler Ebene

Wind ist ein räumlich sehr variables Wetterelement. Es konnte auf Bestandes- und Landschaftsebene nicht adäquat gemessen werden, um damit Sturmschäden zu erklären, wohl aber auf regionalem Level (Xi et al., 2008). Da dies für Wälder in Carolina, USA, unter der Einwirkung von Hurrikanen und Tornados galt, war die Frage zu beantworten, ob Gleiches auch für Schäden von Winterstürmen in Schweizer Wäldern gelten konnte.

2.6.8. Sturmschadmuster auf regionaler Ebene

Bislang wurde noch nicht explizit untersucht, ob schwere Winterstürme in den Wäldern der Schweiz Schadmuster auf regionalem Level hinterliessen oder solche Sturmschäden über lange Zeitspannen gesehen räumlich gleichverteilt auftraten.

Bisherige räumlich-historisch basierte Untersuchungen zu Sturmschäden im Wald fokussierten auf Stürme allgemein, ohne Unterscheidung ob sie durch Winter-, Föhn-, Gewitter- oder auch andere Stürme verursacht wurden (Schelhaas et al., 2003; Nilsson et al., 2004; Hanewinkel et al., 2008). Frühere Untersuchungen zu Sturmschadmustern auf regionalem Level mit Resultaten für die Wälder der ganzen Schweiz konnten nicht gefunden werden (Bütikofer, 1987). Es erschien aber nach der Durchsicht von Veröffentlichungen zu einzelnen Ereignissen (Coaz, 1880; Bosshard, 1967; Holenstein, 1994; WSL und BUWAL, 2001) interessant, die Frage sowohl nach der regionalen Verteilung von Sturmschäden in der Schweiz als auch einer Trennung der Stürme nach ihrer Ursache vorzunehmen. Das war Grund genug, die Frage nach Wintersturm-Schadmustern auf regionaler Ebene in den Fragenkatalog für die hier vorgelegte Studie aufzunehmen.

2.7. Literaturverzeichnis zu Einführung, Forschungsgegenstand und Problemstellung

Abegg, M., Brändli, U.-B., Coldi, F., Fischer, C., Herold-Bonardi, A., Huber, M., Keller, M., Meile, R., Rösler, E., Speich, S., Traub, B. und Vidondo, B., 2014. Viertes Schweizerisches Landesforstinventar - Ergebnisse und Karten im Internet zum LFI 2009-2013 (LFI4b). (Published online 06.11.2014; Dated: 14.04.2015). 21.02.2016. http://www.lfi.ch/resultate/

Achim, A., Ruel, J.C., Gardiner, B.A., Laflamme, G. und Meunier, S., 2005. Modelling the vulnerability of balsam fir forests to wind damage. Forest Ecol Manag, 204(1): 35-50.

Albrecht, A., Hanewinkel, M., Bauhus, J. und 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(1): 229-247.

Albrecht, A., Kohnle, U., Hanewinkel, M. und Bauhus, J., 2013. Storm damage of Douglas-fir unexpectedly high compared to Norway spruce. ANNALS OF FOREST SCIENCE, 70(2): 195-207.

Albrecht, A.T., Fortin, M., Kohnle, U. und Ningre, F., 2015. Coupling a tree growth model with storm damage modeling - Conceptual approach and results of scenario simulations. Environ. Modell. Softw., 69: 63-76.

Auer, I., Böhm, R. und Schöner, W., 2001. Austrian long-term climate 1767-2000. Multiple instrumental climate time series from Central Europs. Östereichische Beiträge zu Meteorologie und Geophysik, 25: 1-147.

Auer, I., Bohm, R., Jurkovic, A., Lipa, W., Orlik, A., Potzmann, R., Schoner, W., Ungersbock, M., Matulla, C., Briffa, K., Jones, P., Efthymiadis, D., Brunetti, M., Nanni, T., Maugeri, M., Mercalli, L., Mestre, O., Moisselin, J.M., Begert, M., Muller-Westermeier, G., Kveton, V., Bochnicek, O., Stastny, P., Lapin, M., Szalai, S., Szentimrey, T., Cegnar, T., Dolinar, M., Gajic-Capka, M., Zaninovic, K., Majstorovic, Z. und Nieplova, E., 2007. HISTALP - historical instrumental climatological surface time series of the Greater Alpine Region. Int J Climatol, 27(1): 17-46.

BAFU, 2008. Sturmschaden-Handbuch. Vollzugshilfe für die Bewältigung von Sturmschadereignissen von nationaler Bedeutung im Wald. 3. überarbeitete Auflage, Bundesamt für Umwelt, Bern.

BAFU, 2009. Sturm "Quinten" verursacht weniger Waldschäden als befürchtet. 25.03.2016. www.bafu.admin.ch/wald/01256/12717/index.html?lang=de&msg-id=25376

Bazzigher, G. und Schmid, P., 1969. Sturmschaden und Fäule. Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen, 120(10): 521-535.

Bergeron, C., Ruel, J.C., Elie, J.G. und Mitchell, S.J., 2009. Root anchorage and stem strength of black spruce (Picea mariana) trees in regular and irregular stands. Forestry, 82(1): 29-41.

Billwiller, R., 1873. Der Gewittersturm vom 28. Juli 1872 in der nördlichen Schweiz und seine Ursachen. Schweizerische Meteorologische Beobachtungen, 9: XIII-XXIV.

Billwiller, R., 1893. Einleitung. Annalen der Schweizerischen Meteorologischen Central-Anstalt 1891, 28: V-VI.

Blanchard, D.O., 2013. A comparison of wind speed and forest damage associated with tornadoes in northern Arizona. Weather Forecast, 28: 408-417.

Blennow, K. und Sallnäs, O., 2004. WINDA - a system of models for assessing the probability of wind damage to forest stands within a landscape. Ecol. Model., 175(1): 87-99.

Bonnesoeur, V., Fournier, M., Bock, J., Badeau, V., Fortin, M. und Colin, F., 2013. Improving statistical windthrow modeling of 2 Fagus sylvatica stand structures through mechanical analysis. Forest Ecol Manag, 289: 535-543.

Bosshard, W., 1967. Erhebungen über die Schäden der Winterstürme 1967. Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen, 118: 806-821.

Bouchard, M., Pothier, D. und Ruel, J.C., 2009. Stand-replacing windthrow in the boreal forests of eastern Quebec. Canadian Journal of Forest Research-Revue Canadienne De Recherche Forestiere, 39(2): 481-487.

Brändli, U.-B., 2000. Waldzunahme in der Schweiz - gestern und morgen. Informationsblatt Forschungsbereich Landschaft, 45: 1-4.

Brändli, U.-B.R. (Editor), 2010. Schweizerisches Landesforstinventar. Ergebnisse der dritten Erhebung 2004–2006. Schweizerisches Landesforstinventar. Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL, Birmensdorf, Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern, Birmensdorf and Bern, 312 pp.

Brassel, P. und Brändli, U.-B., 1999. Schweizerisches Landesforstinventar. Ergebnisse der Zweitaufnahme 1993-1995. Verlag Paul Haupt, Bern-Stuttgart-Wien, 442 pp.

Braun, S., Schindler, C., Volz, R. und Flückiger, W., 2003. Forest damages by the storm "Lothar" in permanent observation plots in Switzerland: the significance of soil acidification and nitrogen deposition. Water, Air, and Soil Pollution, 142: 327-340.

Brönnimann, S., Martius, O., von Waldow, H., Welker, C., Luterbacher, J., Compo, G.P., Sardeshmukh, P.D. und Usbeck, T., 2012. Extreme winds at northern mid-latitudes since 1871. Meteorologische Zeitschrift, 21(1): 13-27.

Bruchert, F. und Gardiner, B., 2006. The effect of wind exposure on the tree aerial architecture and biomechanics of sitka spruce (Picea sitchensis, Pinaceae). American Journal of Botany, 93(10): 1512-1521.

Burga, C.A. und Perret, R., 1998. Vegetation und Klima der Schweiz seit dem jüngsten Eiszeitalter. Ott Verlag, Thun.

Bürgi, M., 1998. Waldentwicklung im 19. und 20. Jahrhundert. Veränderungen in der Nutzung und Bewirtschaftung des Waldes und seiner Eigenschaft als Habitat am Beispiel der öffentlichen Waldungen im Zürcher Unter- und Weinland., Zürich.

Bütikofer, N., 1987. Historische Waldschäden der Schweiz (1800 - 1960), Universität Bern, Bern, 94 pp.

Butler, S.M., White, A.S., Elliott, K.J. und Seymour, R.S., 2014. Disturbance history and stand dynamics in secondary and old-growth forests of the Southern Appalachian Mountains, USA. J. Torrey Bot. Soc., 141(3): 189-204.

BUWAL und WSL, 2005. Waldbericht 2005 – Zahlen und Fakten zum Zustand des Schweizer Waldes. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, Bern, Birmensdorf, 152 pp.

Byrne, K.E. und Mitchell, S.J., 2007. Overturning resistance of western redcedar and western hemlock in mixed-species stands in costal British Columbia. Can J For Res, 37: 931-939.

Byrne, K.E. und Mitchell, S.J., 2013. Testing of WindFIRM/ForestGALES_BC: A hybrid-mechanistic model for predicting windthrow in partially harvested stands. Forestry, 86(2): 185-199.

Canham, C.D., Papaik, M.J. und Latty, E.F., 2001. Interspecific variation in susceptibility to windthrow as a function of tree size and storm severity for northern temperate tree species. Canadian Journal of Forest Research, 31(1): 1-10.

Canham, C.D., Thompson, J., Zimmerman, J.K. und Uriarte, M., 2010. Variation in Susceptibility to Hurricane Damage as a Function of Storm Intensity in Puerto Rican Tree Species. Biotropica, 42(1): 87-94.

Case, B.S., Zawar-Reza, P. und Tait, A., 2016. Simulating topoclimatic data to support bioclimatic research in alpine environments: application and assessment of a mesoscale atmospheric model. Int. J. Climatol., 36(2): 885-899.

Cassiani, M., Katul, P. und Albertson, J.D., 2008. The effects of canopy leaf area index on airflow across forest edges: large-eddy simulation and analytical results. Bound-Lay Meteorol, 126: 433-460.

Ceppi, P., Della-Marta, P.M. und Appenzeller, C., 2008. Extreme Value Analysis of wind speed observations over Switzerland. Arbeitsbericht MeteoSchweiz, 219: 42.

Ciftci, C., Arwade, S.R., Kane, B. und Brena, S.F., 2014. Analysis of the probability of failure for open-grown trees during wind storms. Probab. Eng. Eng. Mech., 37: 41-50.

Clark, T.L. und Mitchell, S.J., 2007. Three-dimensional simulations of air flow and momentum transfer in partially harvested forests. Bound-Lay Meteorol, 125: 505-524.

Clark, T.L., Mitchell, S.J. und Novak, M., 2007. Three-dimensional simulations and wind-tunnel experiments on airflow over isolated forest stands. Bound-Lay Meterol, 125: 487-503.

Clemmensen, L.B., Hansen, K.W.T. und Kroon, A., 2014. Storminess variation at Skagen, northern Denmark since AD 1860: Relations to climate change and implications for coastal dunes. Aeolian Res., 15: 101-112.

Coaz, J.W., 1861. Der Wald. Zwei Vorträge gehalten zu Chur. Verlag von Wilhelm Engelmann, leipzig, 80 pp.

Coaz, J.W.F., 1880. Die Stürme vom 20. Februar, 25. Juni und 5. Dezember 1879 und der durch dieselben in den Waldungen der Schweiz verursachte Schaden. Jenet & Reinert, Bern, 57 pp.

Compo, G.P., Withaker, J.S., Sardesmukh, P.D., Matsu, N., Allan, R.J., Yin, X., Gleason, B.E., Vose, R.S., Rutledge, G., Bessemoulin, P., Brönnimann, S., Brunet, M., Crouthamel, R.I., Grant, R.N., Groisman, P.Y., Jones, P.D., Kruk, M.C., Kruger, A.C., Marshall, G.J., Maugen, M., Mok, H.Y., Nordi, O., Ross, T.F., Trigo, R.M., Wang, X.L., Woodruff, S.D. und Worley, S.J., 2011. The Twentieth century reanalysis project. Q J Roy Meteor Soc, 137(654): 1-28.

Cucchi, V., Meredieu, C., Stokes, A., Berthier, S., Bert, D., Najar, M., Denis, A. und Lastennet, R., 2004. Root anchorage of inner and edge trees in stands of Maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) growing in different podzolic soil conditions. Trees, 18: 460-466.

Cucchi, V., Meredieu, C., Stokes, A., de Coligny, F., Suarez, J. und Gardiner, B.A., 2005. Modelling the windthrow risk for simulated forest stands of Maritime pine (Pinus pinaster Ait.). Forest Ecol Manag, 213(1-3): 184-196.

d. J., D., 1859. Was nützt es? Schweiz Z Forstwes, 10(7): 97-115.

Deegen, P. und Matolepszy, K., 2015. Economic balancing of forest management under storm risk, the case of the Ore Mountains (Germany). J. For. Econ., 21(1): 1-13.

Dierer, S., Müller, S., Stucki, P., Brönnimann, S. und Romppainen-Martius, O., 2014. Karten der Sturmgefährdung in der Schweiz. Flächendeckende Darstellung der Böenspitzen in der Schweiz für verschiedene Wiederkehrperioden. Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bundesamt für Meteorologie ind Klimatologie MeteoSchweiz, Bern, 86 pp.

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(1/2): 187-205.

Dobbertin, M., 2005. Erfassung der Bestandesdaten und Schäden auf dem repräsentativen 4x4-km Sanasilva-Netz. In: M. Indermühle, Raetz, P., Volz, R. (Editor), LOTHAR Ursächlichen Zusammenhänge und Risikobewertung. Synthese des Teilprogramms 6. Umwelt-Materialien. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bern, pp. 39-52.

Dupont, S., Brunet, Y. und Finnigan, J.J., 2008. Large-eddy simulation of turbulent flow over a forested hill: Validation and coherent structure identification. Q J Roy Meteor Soc, 134(636): 1911-1929.

EAFV, 1988. Schweizerisches Landesforstinventar: Ergebnisse der Erstaufnahme 1982-1986. Berichte der Eidgenössischen Anstalt für das Forstliche Versuchswesen (EAFV), 305, 1-375 pp.

EIFJF, 1954. Der stehende Holzvorrat in den öffentlichen Waldungen der Schweiz. Erhebungen 1951 / 52. Eidgenössische Inspektion für Forstwesen, Jagd und Fischerei (EIFJF), Bern, 34 pp.

Exner, F.M., 1925. Die dynamische Meteorologie. Julius Springer, Wien, 421 pp.

Faust, E., 2008. Grosse Naturkatastrophen aus dem Blickwinkel eines Rückversicherers. 01.03.2016. https://www.geow.uni-heidelberg.de/md/chemgeo/geow/forschungsgruppen/kosmogeochem/faust.pdf

Flemming, G., 1994. Wald Wetter Klima. Deutscher Landwirtschaftsverlag Berlin GmbH, Berlin, 136 pp.

Flesch, T.K. und Wilson, J.D., 1999. Wind and remnant tree sway in forest cutblocks. II. Relating measured tree sway to wind statistics. Agricultural and Forest Meteorologie, 93(4): 243-258.

Flury, P., 1925. Die forstlichen Verhältnisse der Schweiz. Kommissionsverlag von Beer & Cie., Zürich, Zürich, 246 pp.

Frank, C. und Ruck, B., 2008. Numerical study of the airflow over forest clearings. Forestry, 81(3): 259-277.

Franscini, S., 1829. Statistik der Schweiz. Heinrich Remigius Sauerländer, Aarau.

Franscini, S., 1848. Neue Statistik der Schweiz, Erster Band. Hallersche Buchdruckerei, Bern.

Franscini, S., 1851. Neue Statistik der Schweiz. Nachtrag, Nachtrag. Hallersche Buchdruckerei, Bern.

Füllemann, C., Begert, M., Croci-Maspoli, M. und Brönnimann, S., 2011. Digitalisieren und Homogenisieren von historischen Klimadaten des Swiss NBCN - Resultate aus DigiHom. Arbeitsberichte der MeteoSchweiz, 236. Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie, MeteoSchweiz, Zürich, 48 pp.

Gardiner, B., Marshall, B., Achim, A., Belcher, R. und Wood, C., 2005. The stability of different silvicultural systems: a wind-tunnel investigation. Forestry, 78(5): 471-484.

Gardiner, B., Byrne, K., Hale, S., Kamimura, K., Mitchell, S.J., Peltola, H. und Ruel, J.C., 2008. A review of mechanistic modelling of wind damage risk to forests. Forestry, 81(3): 447-463.

Gardiner, B., Blennow, K., Carnus, J.-M., Fleischer, P., Ingemarson, F., Landmann, G., Lindner, M., Marzano, M., Nicoll, B., Orazio, C., Peyron, J.-L., Reviron, M.-P., Schelhaas, M.J., Schuck, A., Spielmann, M. und Usbeck, T., 2010. Destructive Storms in European Forests: Past and Forthcoming Impacts, European Forest Institute EFI, Atlantic European Regionel Ofice - EFIATLANTIC, Joensuu.

Gardiner, B., Berry, P. und Moulia, B., 2016. Review: Wind impacts on plant growth, mechanics and damage. Plant Sci, 245: 94-118.

Gibbons, P., Cunningham, R.B. und Lindenmayer, D.B., 2007. What factors influence the collaps of trees retained on logged sites? A case-control study. For Ecol Manag, 255: 62-67.

Gilleland, E., Brown, B.G. und Ammann, C.M., 2013. Spatial extreme value analysis to project extremes of large-scale indicators for severe weather. Environmetrics, 24(6): 418-432.

Ginzler, C., Brändli, U.-B. und Hägeli, M., 2011a. Waldflächenentwicklung der letzten 120 Jahre in der Schweiz. Schweiz Z Forstwes, 162(9): 337-343.

Ginzler, C., Mathys, L. und Thürig, E., 2011b. Die Baumbedeckung in der Schweiz. Schweiz Z Forstwes, 162(9): 344-349.

Griess, V.C., Acevedo, R., Härtl, F., Staupendahl, K. und Knoke, T., 2012. Does mixing tree species enhance stand resistance against natural hazards? A case study for spruce. For Ecol Manag, 267: 284-296.

Hale, S.E., Gardiner, B., Peace, A., Nicoll, B., Taylor, P. und Pizzirani, S., 2015. Comparison and validation of three versions of a forest wind risk model. Environ. Modell. Softw., 68: 27-41.

Hanewinkel, M., Breidenbach, J., Neeff, T. und Kublin, E., 2008. Seventy-seven years of natural disturbances in a mountain forest area - the influence of storm, snow, and insect damage analysed with a long-term time series. Canadian Journal of Forest Research-Revue Canadienne De Recherche Forestiere, 38(8): 2249-2261.

Hanewinkel, M., Peltola, H., Soares, P. und Gonzalez-Olabarria, J.R., 2010. Recent approaches to model the risk of storm and fire to European forests and their integration into simulation and decision support tools. Forest Systems, 19: 30-47.

Hanewinkel, M., Hummel, S. und Albrecht, A., 2011. Assessing natural hazards in forestry for risk management: a review. European Journal of Forest Research, 130(3): 329-351.

Hanewinkel, M., Kuhn, T., Bugmann, H., Lanz, A. und Brang, P., 2014. Vulnerability of uneven-aged forests to storm damage. Forestry, 87(4): 525-534.

Hanewinkel, M., Albrecht, A. und Schmidt, M., 2015. Können Windwurfschäden vermindert werden? Eine Analyse von Einflussgrössen. Schweiz Z Forstwes, 166(3): 118-128.

Hann, J., 1869. Untersuchungen über die Winde der nördlichen Hemisphäre und ihre klimatologische Bedeutung. Sitzb. d. k. Akad. D. Wissensch. II. Abth., I.X. Bd.(Juli-Heft): unnumbered.

Holenstein, B., 1994. Sturmschäden 1990 im Schweizer Wald. In: BUWAL (Editor), Schriftenreihe Umwelt. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bern, pp. 41.

Hollenstein, K., 2002. Herleitung eines Modells zur Abschätzung der mechanischen Stabilität von Waldbeständen. Ergebnisse des Komponentenprojekts C. Polyprojekt PRIMALP, ETH Zürich, Zürich.

Hong, H.P., Ye, W. und Li, S.H., 2016. Sample size effect on the reliability and calibration of design wind load. Struct. Infrastruct. Eng., 12(6): 752-764.

IPCC (Editor), 2012. Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation. A special report of working groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, 582 pp.

IPCC, 2013. Climate Change 2013: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Quin, G.-K., Plattner, M. Tingor, S.K.Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.

IPCC, 2014. Summary for policymakers. In: C.B. Field, V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandera, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Lewy, S. MacCracken, P.R. Mastrandera and L.L. White (Editors), Climate Change 2014: Impacts, Adaption, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, USA, pp. 1-32.

James, K.R., Haritos, N. und Ades, P.K., 2006. Mechanical stability of trees under dynamic loads. Am J Bot, 93(10): 1522-1530.

Jelonek, T., Walkowiak, R., Jakubowski, M. und Tomczak, A., 2013. Indices of tree stability in Scots pine stands damaged by wind. Sylwan, 157(5): 323-329.

Kamimura, K., Gardiner, B., Kato, A., Hiroshima, T. und Shiraishi, N., 2008. Developing a decision support approach to reduce wind damage risk - a case study on sugi (Cryptomeria japonica (L.f.) D.Don) forests in Japan. Forestry, 81(3): 429-445.

Kamimura, K., Kitagawa, K., Saito, S. und Mizunaga, H., 2012. Root anchorage of hinoki (Chamaecyparis obtuse (Sieb. Et Zucc.) Endl.) under the combined loading of wind and rapidly supplied water on soil: analyses based on tree-pulling experiments. European Journal of Forest Research, 131(1): 219-227.

Kamimura, K., Saito, S., Kinoshita, H., Kitagawa, K., Uchida, T. und Mizunaga, H., 2013. Analysis of wind damage caused by multiple tropical storm events in Japanese Cryptomeria japonica forests. Forestry, 86(4): 411-420.

Kasthofer, K., 1828. Der Lehrer im Walde. Ein Lesebuch für Schweizerische Landschulen, Landleute und Gemeindsverwalter, welche über die Waldungen zu gebieten haben, 1. Chr. Albr. Jenni, Bern, 158 pp.

Koizumi, A., Oonuma, N. und Sasaki, Y.T., K., 2007. Difference in uprooting resistance among coniferous species planted in soils of vulcanic orogin. J For Res, 12: 237-242.

Koizumi, A., Hajime, A., Hirotaka, H. und Yutaka, I., 2008. Windthrow resistance of apple trees grafted in an orchard. J Wood Sci, 54: 10-15.

König, A., 1995. Sturmgefährdung von Beständen im Altersklassenwald: ein Erklärungs- und Prognosemodell. J. D. Sauerländer´s Verlag, Frankfurt am Main, 194 pp.

Kovats, R.S., Valentini, R., Bouwer, L.M., Georgopoulou, E., Jacob, D., Martin, E., Rounsevell, M. und Soussana, J.-F., 2014. Europe. In: C.B. Field, V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandera, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Lewy, S. MacCracken, P.R. Mastrandera and L.L. White (Editors), Climate Change 2014:

Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: RegionalAspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, USA, pp. 1267-1326.

Kraus, H. und Ebel, U., 2003. Risiko Wetter: Die Entstehung von Stürmen und anderen atmosphärischen Gefahren. Springer Berlin Heidelberg

Kuhn, N., 1995. Die standörtliche Abhängigkeit der Vivian-Windwürfe. Informationsblatt des Forschungsberiches Landschaftsökologie, Nr. 28: 1-3.

Kurz, D., Alveteg, M. und Sverdrup, H., 1998. Acidification of Swiss Forest Soils. Development of a Regional Dynamic Assessment. Environmental Documentation, No. 89. Swiss Agency for the environment, Forests and Landscape (SAEFL), Bern, 115 pp.

Lagergren, F., Jonsson, A.M., Blennow, K. und Smith, B., 2012. Implementing storm damage in a dynamic vegetation model for regional applications in Sweden. Ecol. Model., 247: 71-82.

Landolt, E., 1861. Witterungserscheinungen im Jahr 1860 und deren Einfluss auf die Vegetation und die Waldarbeiten. Schweiz Z Forstwes, 11: 29-33.

Landolt, E., 1862. Bericht an den hohen Schweizerischen Bundesrath über die Untersuchungen der Schweiz. Hochgebirgswaldungen, vorgenommen in den Jahren 1858, 1859 und 1860. J. A. Weingart, Bern, 367 pp.

Leibundgut, H., 1951. Der Wald. Eine Lebensgemeinschaft. Forschung und Leben. Wissenschaftliche Bibliothek der Büchergilde Gutenberg, 19. Büchergilde Gutenberg, Zürich, 223 pp.

Lundström, T., Heiz, U., Stoffel, M. und Stockli, V., 2007a. Fresh-wood bending: linking the mechanical and growth properties of a Norway spruce stem. Tree Physiol, 27(9): 1229-1241.

Lundström, T., Jonas, T., Stöckli, V. und Ammann, W., 2007b. Anchorage of mature conifers: resistive turning moment, root-soil plate geometry and growth orientation. Tree Physiol, 27: 1217-1227.

Lundström, T., Jonsson, M.J. und Kalberer, M., 2007c. The root-sooil syszem of Norway spruce subjected to turning moment: resistance as a function of rotation. Plant Soil, 300(1-2): 35-49.

Lundström, T., Jonas, T. und Volkewin, A., 2008. Analysing the mechanical performance and growth adaptation of Norway spruce using a non-inear finite-element model and experimental data. J Exp Bot, 59(9): 2513-2528.

Markfort, C.D., Perez, A.L.S., Thill, J.W., Jaster, D.A., Porté-Angel, F. und Stefan, H.G., 2010. Wind sheltering of a lake by a tree canopy or bluff topography. Warer Resour Res, 46(3): 1-13.

Martin, T.J. und Ogden, J., 2006. Wind damage and response in New Zealand forests: a review. New Zealand Journal of Ecology, 30(3): 295-310.

Martins, N.E., Martin-Perez, B. und Baskaran, A., 2016. Application of statistical models to predict roof edge suctions based on wind speed. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., 150: 42-53.

Mather, A.S. und Fairbairn, J., 2000. From Floods to Reforestation: The Forest Transition in Switzerland. Environment and History, 6: 399-421.

Mathieu, J., Backhaus, N., Hürlimann, K. und Bürgi, M. (Editors), 2016. Geschichte der Landschaft in der Schweiz. Von der Eiszeit bis zur Gegenwart. Orell Füssli, Zürich, 384 pp.

Matulla, C., Schoner, W., Alexandersson, H., von Storch, H. und Wang, X.L., 2008. European storminess: late nineteenth century to present. Clim. Dyn., 31(2-3): 125-130.

Mayer, H., 1987. Wind-induced tree sways. Trees, 1(4): 195-206.

Mayer, P., Brang, P., Dobbertin, M., Hallenbarter, D., Renaud, J.P., Walthert, L. und Zimmermann, S., 2005. Forest storm damage is more frequent on acidic soils. ANNALS OF FOREST SCIENCE, 62(4): 303-311.

MeteoSchweiz und BfL, 1980. Projekt ANETZ 1974-1980. Automatisches meteorologisches Mess- und Beobachtungsnetz. MeteoSchweiz und Bundesamt für Landwirtschaft (BfL), Zürich, 25 pp.

MeteoSchweiz, 2015. Der Föhn. 25.03.2016. www.meteoschweiz.admin.ch/home/klima/vergangenheit/klima-der-schweiz/berichte-rund-ums-jahr/foehn.html

MeteoSchweiz, 2016. Automatisches Messnetz. Bundesamt für MEteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz.

Mikita, T., Klimanek, M. und Kolejka, J., 2012. Usage of multidimensional statistic methods with MAXTOPEX factor for Windthrow risk assessment. ALLGEMEINE FORST UND JAGDZEITUNG, 183(3-4): 63-74.

Mitchell, S.J., 2013. Wind as a natural disturbance agent in forests: a synthesis. Forestry, 86(2): 147-157.

Mölter, T., Schindler, D., Albrecht, A.T. und Kohnle, U., 2016. Reviwe on the projections of future storminess over the North Atlantic European Region. Atmos, 7(4): 1-40.

Moore, G.M., 2014. Wind-Thrown Trees: Storms or Management? Arboriculture & Urban Forestry, 40(2): 53-69.

Moore, J.R., Gardiner, B.A., Blackburn, G.R.A., Brickman, A. und Maguire, D.A., 2005. An inexpensive instrument to measure the dynamic response of standing trees to wind loading. Agricultural and Forest Meteorology, 132(1-2): 78-83.

Moore, J.R. und Maguire, D.A., 2005. Natural sway frequencies and damping ratios of trees: influence of crown structure. Trees, 19: 363-373.

Moore, J.R., Manley, B.R., Park, D. und Scarrott, C.J., 2013. Quantification of wind damage to New Zealands planted forests. Forestry, 86(2): 173-183.

Mousson, A., 1864. Bericht über die Organisation meteorologischer Beobachtungen in der Schweiz, Zürich, 69 pp.

MünchnerRückversicherungs-Gesellschaft, 2001. Winterstürme in Europa (II). Schadenanalyse 1999 - Schadenpotentiale. http://www.munichre.com/

MunichRE, 2015. Loss events worldwide 1980 - 2014. 01.03.2016. https::/www.munichre.com/site/touch-naturalhazards/get/documents_E-567437233/mr/assetpool.shared/Documents/5_Touch/_NatCatService/Significant-Natural-Catastrophies//2014/10-costiest-events-ordered-by-overall-losses.pdf

Neu, U., 2009. Influence of global warming on extratropical storms. Swiss Re, Zürich.

Nilsson, C., Stjernquist, I., Barring, L., Schlyter, P., Jonsson, A.M. und Samuelsson, H., 2004. Recorded storm damage in Swedish forests 1901-2000. Forest Ecol Manag, 199(1): 165-173.

OcCC (Editor), 2007. Klimaänderung und die Schweiz 2050. Erwartete Auswirkungen auf Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft, Bern, 168 pp.

Ott, E., 1972. Erhebungen über den gegenwärtigen Zustand des Schweizer Waldes als Grundlage waldbaulicher Zielsetzungen. Teil A. In: W. Bosshard (Editor), Mitteilungen. Schweizerische Anstalt für das forstliche Versuchswesen, pp. 1-193.

Ott, E., Frehner, M., Frey, H.-U. und Lüscher, P., 1997. Gebirgsnadelwälder. Ein praxisorientierter Leitfaden für eine standortgerechte Waldbehandlung. Verlag Paul Haupt, Bern, Stuttgart, Wien, 287 pp.

Patlakas, P., Galanis, G., Barranger, N. und Kallos, G., 2016. Extreme wind events in a complex maritime environment: Ways of quantification. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., 149: 89-101.

Peltola, H., 1996. Swaying of trees in response to wind and thinning in a stand of Scots pine. Bound-Lay Meterol, 77(3-4): 285-304.

Pfister, C., 1998. Raum-zeitliche Rekonstruktion von Witterungsanomalien und Naturkatastrophen 1496-1995, Zürich, 140 pp.

Pfister, C., 1999. Wetternachhersage - 500 Jahre Klimavariationen und Naturkatastrophen (1496-1995). Verlag Paul Haupt, Bern - Stuttgart - Wien, 304 pp.

Pfister, C., 2009. Die "Katastrophenlücke" des 20. Jahrhunderts und der Verlust traditionellen Risikobewusstseins. GAIA, 18(3): 239-246.

Pinheiro, E.C. und Ferrari, S.L.P., 2016. A comparative review of generalizations of the Gumbel extreme value distribution with an application to wind speed data. J. Stat. Comput. Simul., 86(11): 2241-2261.

Prahl, B.F., Rybski, D., Burghoff, O. und Kropp, J.P., 2015. Comparison of storm damage functions and their performance. Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 15(4): 769-788.

Qiu, J., Gu, Z.L. und Wang, Z.S., 2008. Numerical study of the response of an atmospheric surface layer to a spatially nonuniform plant canopy. Bound-Lay Meteorol, 127: 293-311.

Queck, R., Bienert, A., Maas, H.-G., Harmansa, S., Goldberg, V. und Bernhofer, C., 2012. Wind fields in heterogeneous conifer canopies: parameterisation of momentum absorption using high-resolution 3D vegetation scans. Eur J Forest Res, 131: 165-176.

Quine, C.P., 1991. Recent storm damage to trees and woodlands in southern Britain, HMSO, London.

Riguelle, S., Hebert, J. und Jourez, B., 2015. WIND-STORM: A Decision Support System for the Strategic Management of Windthrow Crises by the Forest Community. Forests, 6(10): 3412-3432.

Ross, A.N. und Vosper, S.B., 2005. Neutral turbulent flow over forested hills. Q J Roy Meteor Soc, 609: 1841-1862.

Rottmann, M., 1986. Wind- und Sturmschäden im Wald: Beiträge zur Beurteilung der Bruchgefährdung, zur Schadensvorbeugung und zur Behandlung sturmgeschädigter Nadelholzbestände. J. D. Sauerländer´s Verlag, Frankfurt am Main, 128 pp.

Ruck, B., Frank, C. und Tischmacher, M., 2012. On the influence of windward edge structure and stand density on the flow characteristics at forest edges. Eur J Forest Res, 131: 177-189.

Rudnicki, M., Meyer, T.H., Lieffers, V.J., Silins, U. und Webb, V.A., 2008. The periodic motion of lodgepole pine trees as affected by collisions with neighbors. Trees-Structure and Function, 22(4): 475-482.

Schelhaas, M.J., Nabuurs, G.J., Sonntag, M. und Pussinen, A., 2002. Adding natural disturbances to a large-scale forest scenario model and a case study for Switzerland. Forest Ecol Manag, 167(1-3): 13-26.

Schelhaas, M.J., Nabuurs, G.J. und Schuck, A., 2003. Natural disturbances in the European forests in the 19th and 20th centuries. Global Change Biology, 9(11): 1620-1633.

Schiesser, H.-H., Pfister, C. und Bader, J., 1997a. Winter Storms in Switzerland North of the Alps 1864/1865-1993/1994. Theor. Appl. Climatol., 58: 1-9.

Schiesser, H.-H., Waldvogel, A., Schmid, W. und Willemse, S., 1997b. Klimatologie der Stürme und Sturmsysteme anhand von Radar- und Schadendaten. Schlussbericht NFP 31. vdf, Hochschulverlag an der ETH Zürich, Zürich, 132 pp.

Schindler, D., 2008. Responses of Scots pine trees to dynamic wind loading. Agricultural and Forest Meteorology, 148(11): 1733-1742.

Schindler, D., Grebhan, K., Albrecht, A. und Schonborn, J., 2009. Modelling the wind damage probability in forests in Southwestern Germany for the 1999 winter storm 'Lothar'. International Journal of Biometeorology, 53(6): 543-554.

Schindler, D., Bauhus, J. und Mayer, H., 2012a. Wind effects on trees. Eur J Forest Res, 131: 159-163.

Schindler, D., Fugmann, H., Schönborn, J. und Mayer, H., 2012b. Coherent response of a group of plantation-grown Scots pine trees to wind loading. Eur J Forest Res, 131: 191-202.

Schindler, D., Grebhan, K., Albrecht, A., Schonborn, J. und Kohnle, U., 2012c. GIS-based estimation of the winter storm damage probability in forests: a case study from Baden-Wuerttemberg (Southwest Germany). International Journal of Biometeorology, 56(1): 57-69.

Schmidt, M., Hanewinkel, M., Kandler, G., Kublin, E. und Kohnle, U., 2010. An inventory-based approach for modeling single-tree storm damage - experiences with the winter storm of 1999 in southwestern Germany. Canadian Journal of Forest Research-Revue Canadienne De Recherche Forestiere, 40(8): 1636-1652.

Schüepp, M., 1950. Wolken, Wind und Wetter. Forschung und Leben. Wissenschaftliche Bibliothek der Büchergilde Gutenberg, 14. Büchergilde Gutenberg, Zürich, 263 pp.

Schüepp, M., 1973. Klimatologie der Schweiz, Wind. Supplement to Annales of the Swiss Meteorological Institute, 107.

Schüepp, M., Schiesser, H.H., Huntrieser, H., Scherrer, H.U. und Schmidtke, H., 1994. The winterstorm "Vivian" of 27 February 1990: about the meteorological development, wind forces and damage situation in the forests of Switzerland. Theor. Appl. Climatol., 49: 183-200.

Schüepp, M., 1995. VIVIAN. Sturmperiode Februar 1990. Arbeitsberichte der Schweizerischen Meteorologischen Anstalt, Nr. 182. Schweizerische Meteorologische Anstalt, Zürich, 17 pp.

Schuler, A., Bürgi, M., Fischer, W. und Hürlimann, K., 2000. Wald- und Forstgeschichte. Skript zur Vorlesung 60-316. In: A.W.-u.F. Professur für Forsteinrichtung und Waldwachstum (Editor). ETH Zürich, Departement Forstwissenschaften, Zürich.

Schuler, A., 2007. Forstgesetze. 21.02.2016. http://www.hls-dhs-dss.ch/textes/d/D13802.php

Schütz, J.-P., Götz, M., Schmid, W. und Mandallaz, D., 2006a. Vulnerability of spruce (Picea abies) and beech (Fagus sylvatica) forest stands to storms and consequences for silviculture. European Journal of Forest Research, 125(3): 291-302.

Schütz, J.P., Götz, M., Schmid, W. und Mandallaz, D., 2006b. Vulnerability of spruce (Picea abies) and beech (Fagus sylvatica) forest stands to storms and consequences for silviculture. European Journal of Forest Research, 125(3): 291-302.

Seidl, R., Fernandes, P.M., Fonseca, T.F., Gillet, F., Jonsson, A.M., Merganicova, K., Netherer, S., Arpaci, A., Bontemps, J.D., Bugmann, H., Gonzalez-Olabarria, J.R., Lasch, P., Meredieu, C., Moreira, F., Schelhaas, M.J. und Mohren, F., 2011. Modelling natural disturbances in forest ecosystems: a review. Ecol. Model., 222(4): 903-924.

Seidl, R., Rammer, W. und Blennow, K., 2014a. Simulating wind disturbance impacts on forest landscapes: Tree-level heterogeneity matters. Environ. Modell. Softw., 51: 1-11.

Seidl, R., Schelhaas, M.-J., Rammer, W. und Verkerk, P.J., 2014b. Increasing forest disturances in Europe and their impact on carbon storage. Nat Clim Change, 4(806-810).

Shin, J.Y., Ouarda, T. und Lee, T., 2016. Heterogeneous mixture distributions for modeling wind speed, application to the UAE. Renew. Energy, 91: 40-52.

SHLD, 1883. Instruktion für die Detailvermessung der Waldungen im eidg. Forstgebiet. Schweizerisches Handels- und Landwirthschafts-Departement (SHLD), Bern.

Spatz, H.-C., Brüchert, F. und Pfisterer, J., 2007. Multiple resonance damping or how do trees escape dangerously large oscillations? Am J Bot, 94(10): 1603-1611.

Spatzierer, M., Sävert, t. und Laps, S., 2007. Orkantief KYRILL - 18., 19.01.2007 (Tief Nr. 33) - Der schwerste Orkan seit Jahrzehnten. www.unwetterzentrale.de/uwz/348.html

Stucki, P., Brnönimann, S., Martius, O., Welker, C., Imhof, M., von Wattenwyl, N. und Philipp, N., 2014. A catalog of high-impact windstorms in Switzerland since 1859. Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 14(11): 2867-2882.

Stucki, P., Brönnimann, S., Martius, O., Welker, C., Rickli, R., Dierer, S., Bresch, D.N., Compo, G.P. und Sardeshmukh, P.D., 2015. Dynamical Downscaling and Loss Modeling for the Reconstruction of Historical Weather Extremes and Their Impacts: A Severe Foehn Storm in 1925. Bull. Amer. Meteorol. Soc., 96(8).

Sturmarchiv, 2016. Stürme. 22.02.2016. http://www.sturmarchiv.ch/index.php?title=Stürme

Tischmacher, M. und Ruck, B., 2013. Interaction of gusts and forest edges an experimental wind-tunnel study. Forestry, 86(5): 523-532.

Usbeck, T., 2010. Vor dem nächsten Sturm - Erkenntnisse aus den Folgen des Orkans "Lothar": Seminar an der SHL Zollikofen. Wald und Holz, 7: 25-27.

Uttinger, H., 1968. Die Zahl der Tage mit Windspitzen von mindestens 20 Metern pro Sekunde in Zürich (1934-1967). Veröffentlichungen der Schweizerischen Meteorologischen Zentralanstalt, 8. City-Druck AG, Zürich, 22 pp.

Vanomsen, P., 2006. Der Einfluss der Durchforstung auf die Verankerung der Fichte hinsichtlich ihrer Sturmresistenz. Diss. ETH, 16532. Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Zürich, 247 pp.

Vollsinger, S., Mitchell, S.J., Byrne, K.E., Novak, M.D. und Rudnicki, M., 2005. Wind tunnel measurements of crown streamlining and drag relationships for several hardwood species. Canadian Journal of Forest Research-Revue Canadienne De Recherche Forestiere, 35(5): 1238-1249.

Wallentin, C. und Nilsson, U., 2014. Storm and snow damage in a Norway spruce thinning experiment in southern Sweden. Forestry, 87(2): 229-238.

Walter, H., 1970. Vegetationszonen und Klima. Ulmer, Stuttgart, 244 pp.

Wang, Y.X. und So, M.K.P., 2016. A Bayesian hierarchical model for spatial extremes with multiple durations. Comput. Stat. Data Anal., 95: 39-56.

Welker, C., Martius, O., Stucki, P., Bresch, D., Dierer, S. und Brönnimann, S., 2016. Modelling economic losses of historic and present-day high-impact winter windstorms in Switzerland. Tellus Ser. A-Dyn. Meteorol. Oceanol., 68.

Wernli, H., Bader, S. und Hächler, P., 2003. Winterstürme. In: O.O.c.s.l.c.c.B.O.f.F.d. Klimaänderung) (Editor), Extremereignisse und Klimaänderung. OcCC, Bern, pp. 81-84.

Wikipedia, 2016a. Seite "Windplatte". In: Wikipedia, Die freie Enzyklopädie. Bearbeitungsstand 23.02.201623:30 UTC. 26.03.2016. https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Windplatte&oldid=152752054

Wikipedia, 2016b. Seite "Anemometer". In: Wikipedia, Die freie Enzyklopädie. Bearbeitungsstand 23.02.201623:30 UTC. 26.03.2016. https://de.wikipedia.org/w/index..php?title=Anemometer&oldid=151818258

Wild, H., 1866. Die selbstregistrirenden meteorologischen Instrumente der Sternwarte in Bern. Carl's Repertorium, II. R. Oldenbourg, München, 51 pp.

WMO, 2006. World Meteorological Organization: Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation. Preliminary seventh edition. WMO-No., 8: 1-569.

Woelfle, M., 1936. Sturmschäden im Wald - I. Mitteilung. Fostwissenschaftlichen Centralblatt, 58(2. Septemberheft): 605 - 617.

Woelfle, M., 1937a. Sturmschäden im Wald - II. Mitteilung. Fostwissenschaftlichen Centralblatt, 59: 77 - 92.

Woelfle, M., 1937b. Sturmschäden im Wald - III. Mitteilung (Schluss). Fostwissenschaftlichen Centralblatt, 59(2. Septemberheft): 575 - 586.

WSL und BUWAL (Editors), 2001. Lothar. Der Orkan 1999. Ereignisanalyse. Eidg. Forschungsanstalt WSL, Bundesamt für Wald, Schnee und Landschaft BUWAL, Birmensdorf, Bern, 365 pp.

Wullschleger, E., 1974. Der Windfall vom 18. januar 1739 in der Grafschaft Baden und einige forstgeschichtliche Betrachtungen hierzu. Schweiz Z Forstwes, 125(8): 564-576.

Xi, W.M., Peet, R.K., Decoster, J.K. und Urban, D.L., 2008. Tree damage risk factors associated with large, infrequent wind disturbances of Carolina forests. Forestry, 81(3): 317-334.

Yoo, C., Park, M., Kim, H.J., Choi, J., Sin, J. und Jun, C., 2015. Classification and evaluation of the documentary-recorded storm events in the Annals of the Choson Dynasty (1392-1910), Korea. J. Hydrol., 520: 387-396.

Zell, J. und Hanewinkel, M., 2015. How treatment, storm events and changed climate affect productivity of temperate forests in SW Germany. Reg. Envir. Chang., 15(8): 1531-1542.

Zeng, H.C., Peltola, H., Vaisanen, H. und Kellomaki, S., 2009. The effects of fragmentation on the susceptibility of a boreal forest ecosystem to wind damage. Forest Ecol Manag, 257(3): 1165-1173.

Zimmerli, P. und Renggli, D., 2015. Winterstürme in Europa: Nachricht von längst vergessenen Katastrophen, 24 pp.

3. Artikel 1: Increasing storm damage to forests in Switzerland from 1858 to 2007

Increasing storm damage to forests in Switzerland from 1858 to 2007

Tilo Usbeck[1], Thomas Wohlgemuth[1], Matthias Dobbertin[1], Christian Pfister[2], Anton Bürgi[1], Martine Rebetez[3]

[1] WSL Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research, Birmensdorf, Switzerland

[2] University of Berne, Bern, Switzerland

[3] WSL Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research, Lausanne, Switzerland

Agricultural and Forest Meteorology 150, 1: 47-55

3.1. Abstract

The most severe damage to forests in Central Europe occurs during winter storms caused by Northern Hemispheric mid-latitude cyclones. Storm events in the winter semesters of the past 150 years were investigated to quantify changes and evaluate whether damage rates, forest properties and climate had changed. Records of damage extent (wind throw/snap/breakage), forest area and growing stock in Switzerland were comparatively analysed. Storm damage (m^3) was 17 times greater during the period 1958–2007 than during the period 1908–1957 and 22 times greater than in the period 1858–1907. Forest area in Switzerland has increased by 63% and growing stock by 292% over the past 150 years. The significant recent increase in storm damage could only partially be explained by increased growing stock. Weather reports prior to storms indicated that severe storm damage occurred almost always when soils were unfrozen (96%) and wet (96%). During the observation period mean winter temperature has increased by nearly 2 °C and winter precipitation has increased by nearly 50% in the study region. In the Zurich region, daily maximum gust wind speed and storm damage were compared. Maximum gust wind speed above 35 m s^{-1} was associated with extensive storm damage. Catastrophic storm damage and maximum gust wind speed measured during storms have increased during recent decades. In conclusion, increasing growing stock, warm winter temperature and high precipitation, and even more markedly,

increasing maximum gust wind speed have all contributed to the recent increase in windstorm damage to forests.

3.2. Introduction

Winter storms cause severe damage to Swiss forests (Schmidtke and Scherrer, 1997; Schelhaas et al., 2002). All winter storms originate from extra-tropical cyclonal processes (Schiesser et al., 1997a,b) during the winter half year from October to March and reach maximum wind speed south of their centres, especially in cold front situations (WSL and BUWAL, 2001). However, severe winter storms causing catastrophic forest damage have been rare in Switzerland (Lamb, 1991). During the last two centuries only six such events were classified catastrophic (Pfister, 1999; WSL and BUWAL, 2001).

The severity and extent of storm damage in forests are a function of three types of factors (Hubrig, 2004; Schmoeckel and Kottmeier, 2008):

- the damage potential, i.e., the amount of growing stock exposed to strong winds;
- the susceptibility to wind, which varies for example with tree species or stand height;
- and the extent and severity of the causing event, i.e., storm extent, wind speed, and gusts.

The damage potential and its development over time are important for studies analysing long-term trends in storm damage in forests (Schelhaas et al., 2002; WSL and BUWAL, 2001). In Europe, forest growing stock has increased over the last five decades (Nabuurs et al., 2003) and so has its damage potential (Schelhaas et al., 2002).

Susceptibility of forests to storms has been intensively studied (Hubrig, 2004; Schmoeckel and Kottmeier, 2008). Earlier studies of winter storm damage to Swiss forests focused almost exclusively on their susceptibility to particular cyclonal storm event series (e.g., 21, 23 and 28 February 1967; Vivian and Wiebke 1990; Kurt, Lothar and Martin 1999) or to single storm events (Landolt, 1861; Coaz, 1880; Bosshard, 1967; Bazzigher and Schmid, 1969; Holenstein, 1994; Schmidtke and Scherrer, 1997; WSL and BUWAL, 2001; Indermühle et al., 2005; Schütz et al., 2006). Forest damage has been separately analysed for the storms Vivian in 1990 (Kuhn, 1995) and Lothar in 1999 (Mayer et al., 2005). In the two studies, various factors such as stand height, conifer proportion, altitude, slope and soil pH were found to

correlate with the extent of damage. Dobbertin (2002) compared the damage in both events, Vivian (5 million m^3) and Lothar (14 million m^3), and found similarities in damage probabilities, e.g., for stand height, development stage, percentage of conifers, soil-water logging and soil depth. However, cross-validation using data from the two storms to predict damage failed. In a few studies a relation between weather conditions and soil stability was detected. High soil moisture content caused by high precipitation and temperatures above 0 °C can weaken soil stability, and in contrast, freezing can increase soil stability (Bosshard, 1967; Combe, 1998).

Finally, the extent of storm damage to forests depends on the wind in space and time, in particular on the dynamic wind field and its interaction with dimensions of trees or stand structures (Lundström et al., 2008; Schindler, 2008), in particular gap size (Panferov and Sogachev, 2008), topography (e.g., Rottmann, 1986; Schmoeckel and Kottmeier, 2008), crown shape (Sellier et al., 2008; Moore and Maguire, 2005), dumping effects (Spatz et al., 2007; Moore and Maguire, 2008), wind gust frequency (Lee, 2000), and their dynamic interactions (Rudnicki et al., 2001).

However, for correlative studies of long-term trends in wind damage and on large-scale storm events, information on most of the damage-causing factors mentioned above is not readily available.

In our study, we analyse severe winter storm damage since the late 1850s in Swiss forests on the basis of few but available variables concerning damage potential, susceptibility to wind and wind severity. For damage potential we used data on forest area and growing stock per hectare. Further we used the meteorological conditions prior to the storm, i.e., precipitation and below or above zero temperature that affect soil stability and indirectly the susceptibility of trees against uprooting. For wind variables we selected the daily maximum hourly wind gust from the Swiss meteorological station Zurich, which had been shown as a good proxy for storm severity in a prior study (Usbeck et al., 2009).

Severe winter storm damage is defined here as forest damage in timber volumes in three or more cantons exceeding 70,000 m^3. This limit was chosen to obtain storms with large-scale impact and sufficiently reliable damage estimates. Reliable data on forest growing stock, damage and meteorological data with sufficiently fine-resolution are available for the last 150 years. In order to detect general causes of winter storm damage, we correlated available winter storm damage data of severe winter storm damage events with the explanatory variables on forest area, growing stock, temperature, precipitation and wind speed.

We addressed the following questions:

1. Has severe winter storm damage increased during the last 150 years and, if so, is this increase related to increasing damage potential?
2. Which weather conditions prior to severe winter storms correlate best with the extent of storm damage, and have these weather conditions changed during the past 150 years?
3. How important is maximum gust wind speed in respect to forest damage and what is its general role in explaining winter storm damages?

3.3. Materials and Methods

We used both historical and recent forest and meteorological data, mainly from federal and cantonal publications and databases of the past 150 years covering an area of roughly 35,000 km^2 with highly structured landscape. The first large inventory of forested areas in Switzerland started in 1858. Detailed information on winter storm damage to forests in subregions (cantons) has also been available since the late 1850s. A meteorological network of measuring stations was installed in 1863. Reliable maximum gust wind speed has been recorded since 1891.

The amount of damage (m^3) from severe winter storms since 1858 was compared with various explanatory variables. Daily maximum gust wind speed (U_{DMG}) was correlated to nearby recorded forest damage. Daily average temperature (T_{DA}) and daily total precipitation (P_{DS}) served as explanatory variables to explain soil status at the time of the damaging events.

3.3.1. Severe winter storm damage and damage potential

Total forest area was detected by using data from various federal statistics with first references for the year 1862 and available continuously without any large gaps from 1877 onwards (Landolt, 1862; Schweizerischer Bundesrat, 1878; EOFI, 1878–1994; ESA, 1907–1974, 1975–1977; BFS, 1978–1994; BUWAL, 1995–2007). Priority was given to the statistics of the federal forest service. Irregularities in the data refer to the time before the first National Forest Inventory (NFI 1; EAFV, 1988). In all cases we used

original data, as the deviations, e.g., shifts in methods, were relatively small. Missing data were linearly interpolated. We fitted a 9-year moving average for the total forest area.

Forest growing stock has only recently been assessed for the whole of Switzerland (Mantel, 1990). Kurz et al. (1998) presented a model of national average growing stock per unit area for the period 1800–2050. We adopted this estimation for the time period 1860–1951 and interpolated linearly between the different forest inventories for the time after 1952. Growing stock was extrapolated for the years 2006 and 2007 by adapting the equation of the interpolation between NFI 2 and NFI 3 (Brassel and Brändli, 1999; LFI/WSL, 2007).

Data for the occurrence, extent and frequency of winter storms derived mainly from official records, i.e., federal or cantonal. We distinguished three 50-year time periods: 1858–1907, 1908–1957 and 1958–2007. To achieve a finer resolution and to better detect trends, severe winter storm damage was sub-divided into five damage classes exceeding 70,000 m^3 (1–5): 70,000–177,500 m^3, 177,501–285,000 m^3, 285,001–392,500 m^3, 392,501–500,000 m^3 and >500,000 m^3. The amount of winter storm damage to forests was adjusted proportionally to the total forest area and growing stock at the time of storm event Lothar (December 1999) by employing the following equation (1):

$$ad_w = afd_w \, tfA_{2000} \, tfA_w^{-1} \, gs_{2000} \, gs_w^{-1} \qquad (1)$$

with ad_w is the adjusted amount of damage in winter w [m^3]; afd_w is the estimated amount of damage in winter w [m^3]; tfA_{2000} is the total forest area in winter 1999/2000 [ha]; tfA_w is the total forest area in the winter w of the winter storm [ha]; gs_{2000} is the growing stock in winter 1999/2000 [m^3 ha^{-1}]; gs_w is the growing stock in the winter w of the winter storm [m^3 ha^{-1}].

In the equation the winter semester with the largest storm damage, i.e., 1999/2000 from Lothar, served as reference (standardisation) for the other data.

We computed means for estimated and adjusted winter storm damage for the three 50-year periods. The probability that the amount of winter storm damage recorded in the last 50-year period had occurred randomly was tested by using resampling techniques (Manly, 1997). Using the 150 years of winter storm damage data as the basic population of severe winter storms, 10,000 samples of 50 randomly selected years were generated without replacement. This procedure is identical to randomly selecting different permutations of 50 years and thus differs from bootstrapping, which is done with replacement (see discussion in Manly, 1997). We then calculated the proportion of samples with higher estimated and adjusted severe winter storm damage sums that were reported into the most recent 50-

year period. This procedure was repeated 10 times and proportions were expressed in means, minima and maxima.

3.3.2. Weather preceding storms and winter climate

Meteorological variables were exclusively derived from the data of the Swiss Federal Office of Meteorology and Climatology MeteoSwiss (MeteoSchweiz, 1865–2006), using both the present database via software Climap and published records of MeteoSwiss. The national meteorological network was established in 1863 (Mousson, 1864) and has since produced standardised measurements.

For the 1864–2007 period, 12 homogenised data series of T_{DA}, T_{MA}, P_{DS} and P_{MS} are available. Wind data were generally recorded three times a day as Beaufort-values until 1980 and afterwards as 10-min average and maximum gust wind speed. Before 1981, only few lowland stations of the meteorological network were equipped with anemometers. Out of these, the Zurich climate station, i.e., the climate station of the headquarters of the national meteorological service since 1864, has been producing reliable and homogenisable wind data from 1891 onwards (Maurer et al., 1909; Uttinger and Schüepp, 1951; Schüepp, 1973; Uttinger, 1968; Usbeck et al., 2009) that have also served for other winter storm studies in Switzerland (Schiesser et al., 1997a,b).

We selected meteorological stations located in different forest zones in Switzerland, distinguishing between the locations that were damaged at least once (damage regions), and those with no damage in the period studied (non-damage regions). Eight meteorological data series originated from stations located in the winter storm damage zone of Switzerland. Winter climate was computed using homogenised T_{MA} and P_{MS} data for December (D), January (J) and February (F). We smoothed the winter season mean temperature according to Pfister (1984) and the following equation (2) for the winter $N_{+2'}$:

$$N_{+2'} = (N + 2N_{+1} + 4N_{+2} + 2N_{+3} + N_{+4})10^{-1} \quad (2)$$

Linear trends for both temperature- and precipitation-smoothed winter means were calculated and used for providing graphical and readily identifiable short- and long-term trends.

To detect weather conditions preceding winter storms, temperature and precipitation information was derived either from data (T_{DA} and P_{DS}) or by quantification of verbal weather report information. We considered all winter storm days with reported forest damage or U_{DMG} of at least 30 m s^{-1} as focus days. Further, weather reports up to 10 days in advance of the storm event day were evaluated with respect

to daily long-term means and whether soil states could be assumed to be frozen/unfrozen and wet/not-wet in the Swiss lowlands. Published daily weather reprints (aftercasts) served as data for this qualitative survey. Weather aftercasts cover large areas and are kept in archives. Spatially fine-resolution homogenised temperature and precipitation data were not yet at hand for all regions below the timberline. Nevertheless, we consider the qualitative information from aftercasts reliable and detailed enough to derive semi-quantitative data for the soil condition in the study region. For example, we categorised the term 'freezing day in the lowlands' in a prestorm period as 'frozen soil' for the Swiss lowlands on the day of a strong U_{DMG} event. Similarly, 'widespread rainfall in the Pre-Alps' was simplified and classified as 'wet soil' for the Pre-Alps. If several dry days preceded a winter storm day and precipitation started after the winter storm event itself, the storm event day was declared 'soil not-wet'. If the days before the storm events were described as freezing days, and the day when storms occurred was actually mild, the storm event day was still judged 'soil frozen'. Finally, we counted the differently classified storm event days and considered both the ratios between the numbers of storm event days with 'frozen soil' and 'unfrozen soil' (temperature caused soil condition) and the ratio between 'wet soil' and 'not-wet soil' (precipitation caused soil condition).

3.3.3. Case study: daily maximum gust wind speed and forest damage

In a case study region, we analysed the temporal trend of gust wind speed and its correlation with reported nearby forest damage during winter storms. Between 1891 and 1980, gust wind speed was measured at only a few stations in Switzerland. There is no homogenised series on wind speed for the whole observation period (MeteoSchweiz, 1865–2006) in the MeteoSwiss database nor was gust wind speed measured continuously using similarly standardised methods during this period. We therefore used the data from the Zurich MeteoSwiss station, which covers a long-time series in the midst of the damage zone. Measurements started in January 1891 and have continued after a short-distance move in close proximity to the old locality (Usbeck et al., 2009). Missing data were completed by values published in the local newspaper Neue Zürcher Zeitung (NZZ, 1891–1933).

A strong maximum gust wind speed was defined as an U_{DMG} of 30 m s^{-1} and more. First, the number of winter days (October to March, ONDJFM) with strong maximum gust wind speed was counted from January 1891 to winter 2006–2007, and for periods January 1891–1929, 1930–1968, and 1969–2007. Second, the relative frequency of days with strong maximum gust wind speed was calculated by employing the ratio between the number of days with strong U_{DMG} of the period and the number of

winters of the period. Then, the total maximum gust wind speed per period was selected to compare extreme values among each other and with damage levels. Both Pearson's correlation and Spearman's rank correlation coefficients were calculated between the fraction of the growing stock damaged and the maximum gust wind speed using logarithmically transformed data.

In the case study region winter storm damage was expressed as total damage amount in m^3 ha^{-1} and as relative value in percentage of the total growing stock. Because small forest damage was not always reported, in particular since the end of the 1960s, we added published information about non-forest damage to all events of at least 35 m s^{-1} U_{DMG}, e.g., damage to people, trees in urban regions, orchards, infrastructure, buildings, and vehicles (hit by wind thrown trees). Finally, we checked the scatter plot of all strong U_{DMG} events and winter storm damage reports with less strong U_{DMG} for any relationship between U_{DMG} and levels of <0.05%, <0.5% and ≥0.5% damage of the growing stock during the observed period for temporally and quantitatively distinctive features.

3.4. Results

3.4.1. Damage-causing severe winter storms

The total forest area in Switzerland has increased from 768,478 ha in 1860 to 1,250,000 ha in 2006, which corresponds to an overall increase of 63% (Figure 3.4.1). In 2006, 30.3% of the total surface in Switzerland was covered by forest.

In 1860 and 2006 growing stock in Switzerland tripled (292%; Figure 3.4.1). Since the Lothar storm event (1999), numbers have remained stable (Figure 3.4.1).

Table 3.4.1 in total, 25 out of the 26 detected severe winter storms between 1858 and 2007 were quantitatively recorded. Only qualitative information is at hand for a severe winter storm in 1860 (Landolt, 1861). The amounts of estimated damage per 50-year period and the details on storm frequency are given in Table 3.4.2. The storm damage during the period 1958–2007 was estimated to be 17 times greater than during the period 1908–1957 and 22 times greater than during the period 1858–1907, and storm frequency was about twice as high compared to the period 1858–1907 or the period 1908–1957 to the period 1958–2007. The randomised sampling using 10 reruns from 10,000 samples of

each 50 years resulted in an average proportion of 0.0016 of samples with higher total damage than had been measured in 1958–2007 (min: 0.0010, max: 0.0021). A likelihood test showed that differences between time periods with respect to damage amount are significant (one-sided test; *p*-value = 0.05).

For the 25 severe winter storms we found data at a cantonal level (in total for 90.4% of all cases). Little or no data were found for Canton Ticino, which usually is not affected by winter storm damage, and for Canton Geneva, where damage is not reported because of its small forest area. Most severe, i.e., catastrophic winter storms happened in 1879, 1935, 1967, 1983, 1990 and 1999. Corresponding amounts of damage are displayed as proportions of the total forest area and growing stock (Figure 3.4.2).

	1858-1907	1908-1957	1958-2007
Total damage [$10^3 m^3$]	1,100	1,433	24,744
Total number of events	6	6	13
Class 1: 70-177.5 x 10^3 m^3	5	3	4
Class 2: 177.5-285 x 10^3 m^3	0	2	2
Class 3: 285-392.5 x 10^3 m^3	0	0	1
Class 4: 392.5-500 x 10^3 m^3	0	0	2
Class 5: >500 x 10^3 m^3	1	1	4

Table 3.4.1: Severe winter storm damage >70,000 m^3 during the past 150 years.

The adjustment resulted in considerably higher values for severe winter storm damage in the first two periods (Table 3.4.2). Adjusted total damage in the last period was still estimated to be five to eight times higher than in the previous periods. In less than 2% of the 10,000 random samples of 50-year periods, the adjusted total damage was higher than during the period 1958–2007 (min: 0.0162, max: 0.0197). This means that it was 10 times more likely that the observed adjusted damage occurred by chance than without adjustment. However, even following adjustment the likelihood still remained low (<0.05).

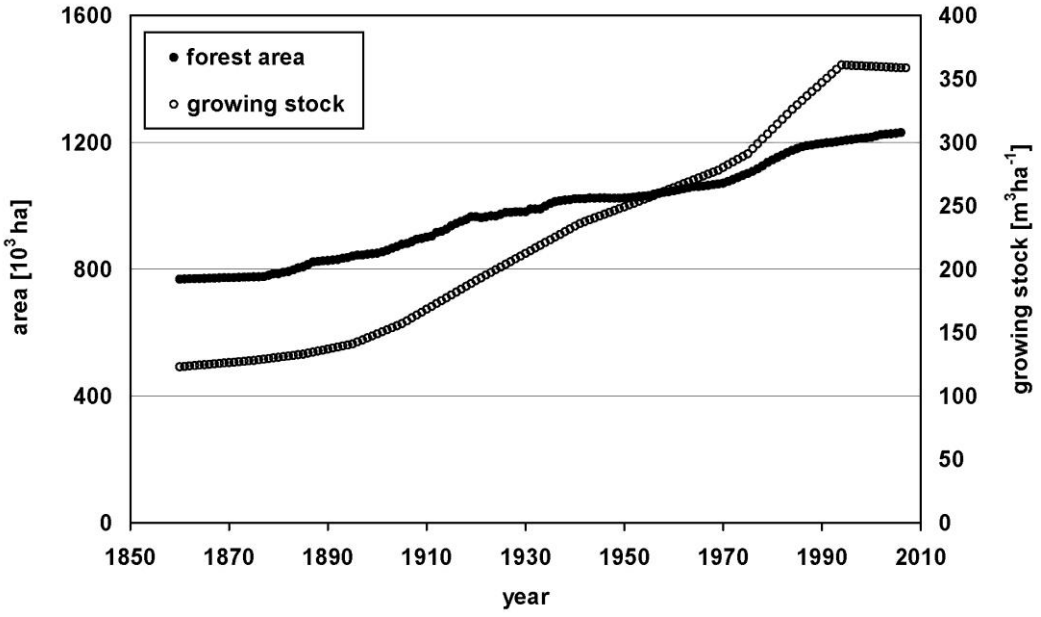


Figure 3.4.1: Total forest area 1859 - 2006 and average growing stock per hectare 1860–2006 in Switzerland according to various data sources and interpolations (see text).

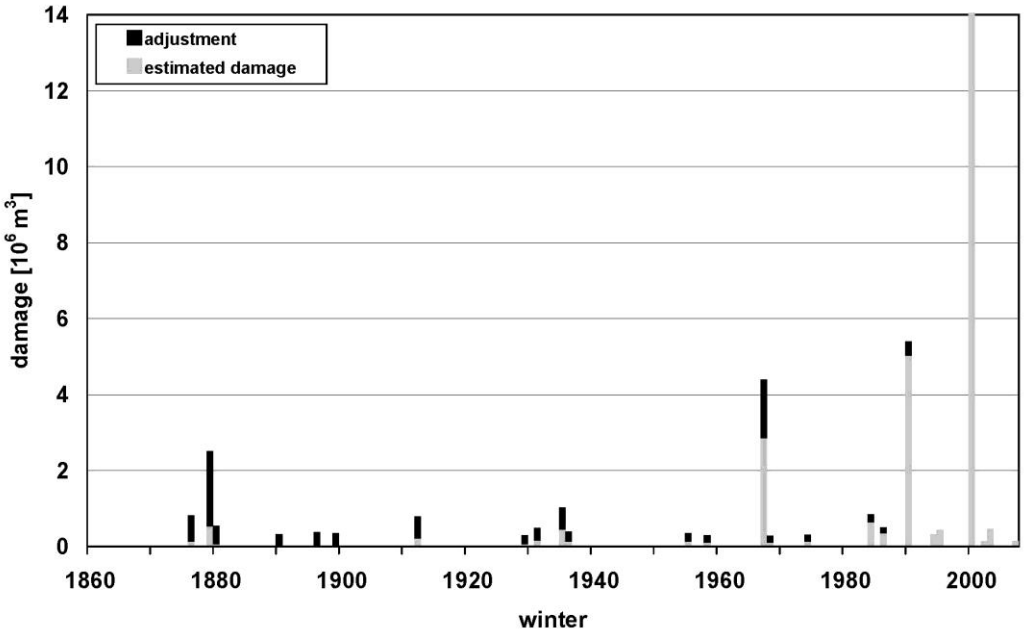


Figure 3.4.2: Amount of severe winter storm damage in Swiss forests: estimated values in grey, adjustments indicated in black (difference).

	1858-1907	1908-1957	1958-2007
Total, estimated damage [10^3 m^3]	1,100	1,433	24,744
Total, adjusted damage [10^3 m^3]	4,577	2,993	26,833
Total number of events (estimated damage)	6	6	13
Mean winter temperature [°C]	-1.9[a]	-1.2	-0.3
Mean winter precipitation [mm]	172.8[a]	204.2	215.3

[a]1864-1907

Table 3.4.2: Severe winter storm damage and climate in the damaged region during the past 150 years.

Period damage	Minimum damage reported	Events no %		Soil condition							
				Temperature-dependent				Moisture-dependent			
				Unfrozen		Frozen		Wet		Not- wet	
		No	%	No	%	No	%	No	%	No	%
1858–1907	x10^1 m^3	72	100	67	93	5	7	60	83	12	17
1908–1957	x10^2 m^3	45	100	44	98	1	2	40	98	5	11
1958–2007	x10^3 m^3	98	100	96	98	2	2	94	96	4	4
1858–2007, <70 x 10^3 m^3		189	100	182	96	7	4	169	89	20	11
1858–2007, >70 x 10^3 m^3		26	100	25	96	1	4	25	96	1	4

Line 1-3: 50-year sub-periods; line 4 and 5: non-severe and severe damage.

Table 3.4.3: Comparison of qualitative soil conditions in the Swiss lowlands during 215 winter storm events (according to weather reports) and the 26 recorded severe winter storms.

3.4.2. Winter climate and prestorm weather

In the regions affected by severe winter storms, winters have become warmer, with a 2°C rise during the last 140 years (Figure 3.4.3). They have become wetter, with an increase in precipitation of nearly 50% (Figure 3.4.4). Mean winter temperature above 0°C were rare in the 19th century, but have become frequent since the mid-1970s.

'Frozen soil' prior to winter storm damage occurred in one out of 25 events. In 96% of all events considered, soils were unfrozen. Severe winter storm damage occurred in all but one event (96%) during 'wet soil' conditions (Table 3.4.3).

The ratios of both 'wet/not-wet' and 'unfrozen/frozen' soil conditions preceding a winter storm event have slightly increased with respect to the comparison of 50-year periods while the minimum damage recorded also increased (Table 3.4.3, row 1–3).

Before severe winter storm damage soil conditions were mostly wet and unfrozen in contrast to non-severe events where the respective ratios were smaller (Table 3.4.3, rows 4 and 5).

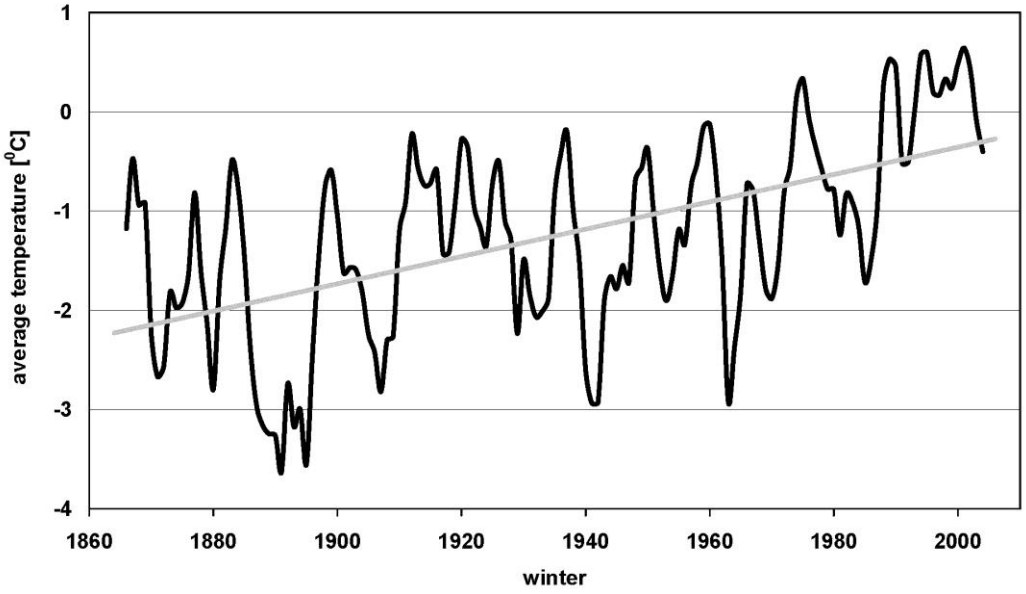


Figure 3.4.3: Trend in average daily winter temperatures as weighted for the 5-year running means of the eight MeteoSwiss stations Basel, Bern, Chateau-d'Oex, Davos, Engelberg, Genève, Sion, and Zurich. Homogenised data for the periods Dec-Jan-Feb derived from MeteoSwiss.

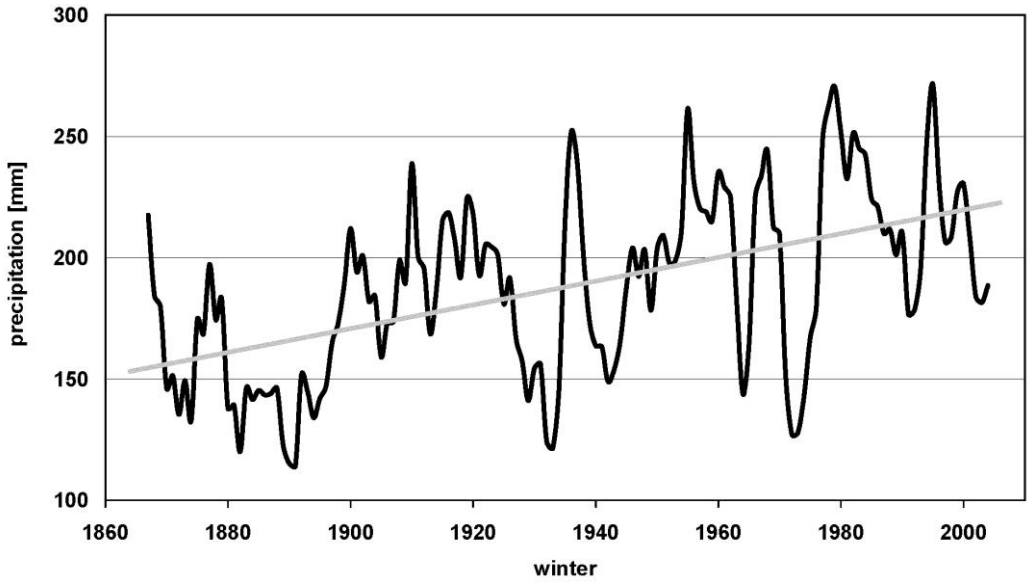


Figure 3.4.4: Trend in winter precipitation as weighted for the 5-year running means of the eight stations Basel, Bern, Chateau-d'Oex, Davos, Engelberg, Genève, Sion, and Zurich. Homogenised data for the periods December to January to Febuary derived from MeteoSwiss.

3.4.3. Daily maximum gust wind speed and forest damage in Zurich

We found an average of 0.21 days per year with a U_{DMG} of at least 30 m s^{-1} for the first period January 1891–1929, 0.85 days per year for the second period 1930–1968, and 2.51 days per year for the third period 1969–2007. The extremes of U_{DMG} increased by roughly 12 m s^{-1} between the first and last period (Table 3.4.4).

In total, we analysed 22 data pairs to compare forest damage caused by winter storms in Canton Zurich and U_{DMG} at the Zurich MeteoSwiss station (Table 3.4.5). Pearson's and Spearman's rank correlation coefficients between U_{DMG} and damage were r_p = 0.61 and r_s = 0.68, respectively. While for the first period almost no correlation was found, for the second and third periods, both Pearson's and Spearman's rank correlation coefficients increased. They reached statistical significance in the third period (Table 3.4.5).

Storm damage was found to be significantly associated with maximum gust wind speed (p = 0.0015; Figure 3.4.5). In addition, we found an increase in the maximum damaged part of the growing stock and

a temporal increase in extremes of U_{DMG} in winter (Figure 3.4.6 and Table 3.4.5). Highest U_{DMG} are usually also indicated by reports on forest damage or damage to other goods. All U_{DMG} events of at least 35 m s^{-1} were caused by winter storms (Figure 3.4.6).

	Total period	Period 1	Period 2	Period 3
	1891-2007	1891-1929	1930-1968	1969-2007
Number of winter half years (October to March)	116.5	38.5	39	39
Number of days with strong gust wind speed events	139	8	33	98
Average number of strong gust wind speed events per winter half year	1.20	0.21	0.85	2.51
Maximum gust event speed measured [m s^{-1}]	44.1	32.2	38.2	44.1

Table 3.4.4: Strong daily maximum gust wind speed events (≥30 m s^{-1}) recorded at the Zurich climate station from 1 January 1891 to 31 March 2007.

	Total period	Period 1	Period 2	Period 3
	1891-2007	1891-1929	1930-1968	1969-2007
Minimum damage reported		$x10^1$ m^3	$x10^2$ m^3	$x10^3$ m^3
Data pairs	22	7	6	7
$r_{Pearson}$	0.61	0.25	0.41	0.93
p-value	0.0027	0.584	0.318	0.0026
$r_{Spearman}$	0.68	0.05	0.70	0.81
p-value	0.0004	0.915	0.053	0.0267

Table 3.4.5: Correspondence between maximum gust wind speed [m s^{-1}] at the Zurich climate station and forest damage [m^3 ha^{-1}] in Canton Zurich since 1 January 1891 expressed in product-moment and rank correlation coefficients.

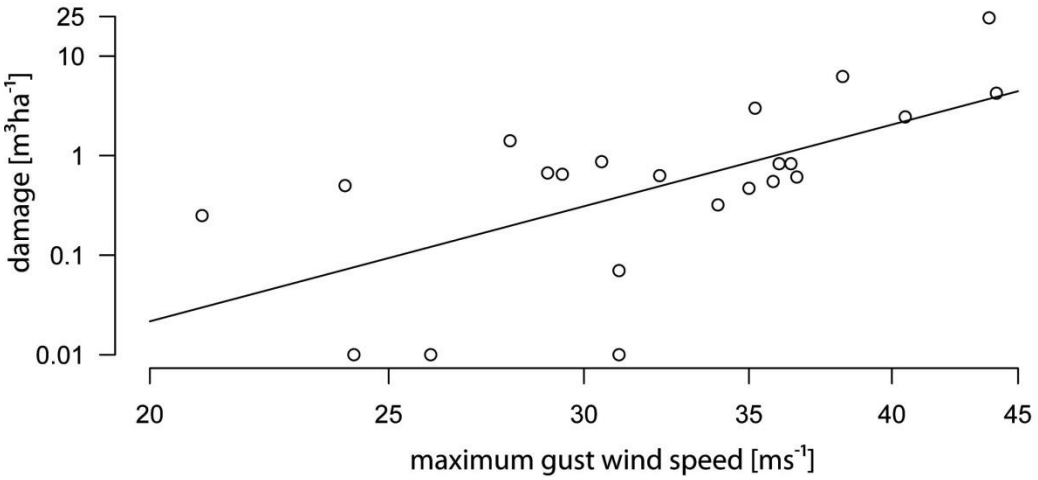


Figure 3.4.5: Maximum gust wind speed during WS events in Canton Zurich (Zurich MeteoSwiss station) and damage per hectare in Canton Zurich, from 1891 to winter 2007. Regression line: (log10(y) = -10.206 + log10(x) x 6.565; R^2 = 0.405, p = 0.0015).

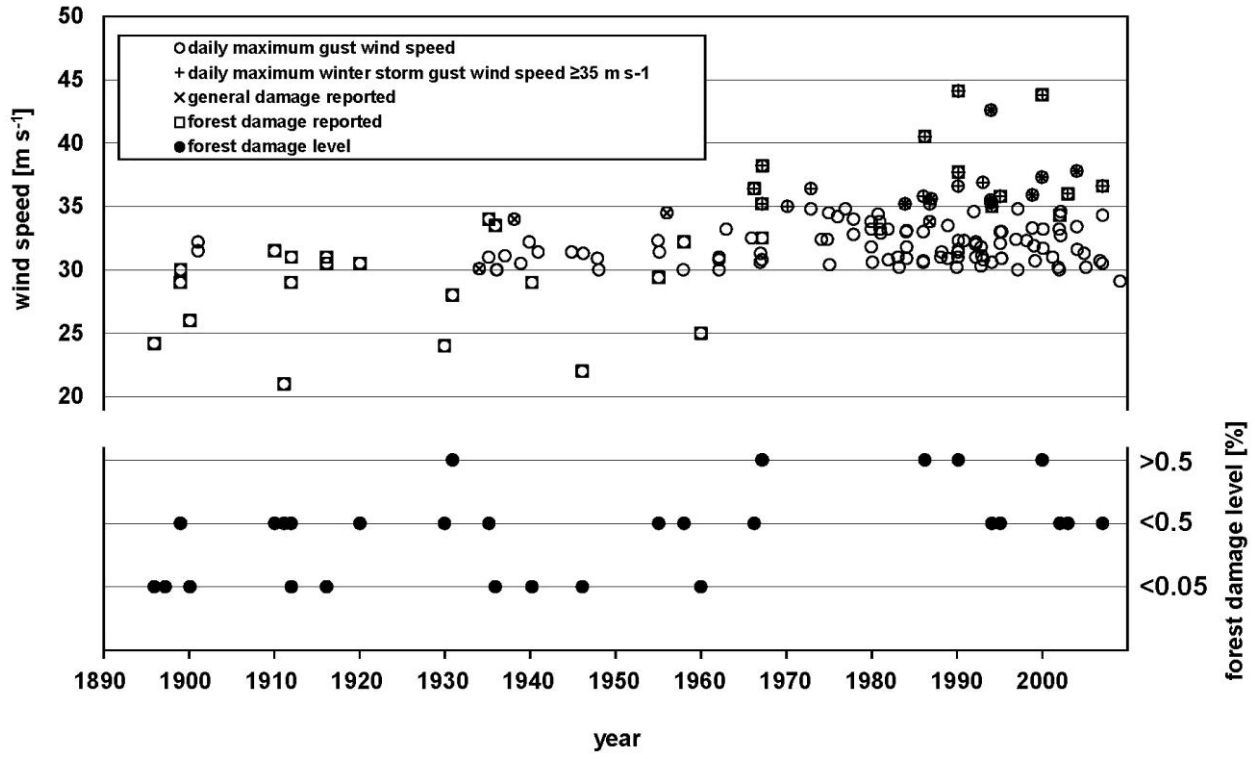


Figure 3.4.6: Maximum gust wind speed during WS events in Canton Zurich (Zurich MeteoSwiss station), daily maximum gust wind speed of >30 ms^{-1}, and damage levels in respect to growing stock in Canton Zurich, for the period from January 1891 to winter 2006-2007.

3.5. Discussion

Our study showed an increase in severe winter storm damage in both amount and frequency (confirming Bütikofer, 1987; Münchner Rück, 2001; WSL and BUWAL, 2001; Schelhaas et al., 2003). The damage potential, i.e., forest area, growing stock as well as growing stock per hectare has also increased (confirming, e.g., Brändli, 2000; Mather and Fairbairn, 2000). However, our damage adjustment by forest area and growing stock (Münchner Rück, 2001) cannot fully explain the damage increase during the time period 1858–2007. Various authors have suggested that other major influencing variables have also considerably changed (e.g., Mayer and Schindler, 2002; Schmoeckel and Kottmeier, 2008). Our results show that winter temperature and precipitation have increased during the observed period (in agreement with, e.g., Begert et al., 2005; Schmidli and Frei, 2005; Scherrer et al., 2006; Rebetez and Reinhard, 2007). Winter storm damage usually occurred when the soil was 'unfrozen' and 'wet'. We found that this weather type is characteristic for winter storms that are always caused by cyclonic weather situations (e.g., Kraus and Ebel, 2003; Allaby et al., 2006). With one exception, severe winter storm damage in Switzerland occurred when soils were wet. This suggests that the increasing winter precipitation – as regionally predicted in climate change models (Frei et al., 2006; Schmidli et al., 2007) – predisposes forests to higher winter storm damage.

Maximum gust wind speed has also increased during the time period for which data are available. It exceeded 30 m s^{-1} for the first time at the beginning of the 20th century, reached nearly 35 m s^{-1} in the mid-1930s, nearly 40 m s^{-1} at the end of the 1960s and nearly 45 m s^{-1} in 1990.

The observed increase of maximum gust wind speed is decisive due to the fact that wind force, i.e., the destructive energy, increases quadratically when wind speed increases linearly (e.g., Otto, 2000; Hubrig, 2004). The results from the case study region clearly indicate that winter storm damage to forests corresponds to the velocity of the maximum gust wind speed. As a rule of thumb, severe winter storm damage exceeding 2 m^3ha^{-1} occurred mainly when maximum gust wind speed exceeded 35 m s^{-1}. Although the long wind measurement series consists of data measured at two locations and by different gauges, this series has been repeatedly considered reliable and representative (e.g., Uttinger and Schüepp, 1951; Uttinger, 1968; Schüepp, 1973; Schiesser et al., 1997a,b). Our results of increasing storminess since the 1960s correspond well with the four Central European pressure records Kremsmünster, Vienna, Karlov, and Prague (Matulla et al., 2008). The observed changes in maximum

gust wind speed over the investigated period evoke the questions of comparative observations in Central Europe and of possible meteorological causes. Extreme mid-latitude cyclones during the extended winter season (October to March) are the main origin of severe windstorm events affecting Central and Northern Europe (Leckebusch and Ulbrich, 2004). Their occurrence may be linked to the North Atlantic Oscillation (NAO) (Seierstad et al., 2007; Trigo et al., 2008; Pinto et al., 2009) that is the dominant pattern of atmospheric circulation variability in this region during winter (Matti et al., 2009). Strong positive NAO phases are well known to cause more extreme cyclones (e.g., Pinto et al., 2009; Trouet et al., 2009). Our findings of maximum wind speed observations correspond to the increasing severity of storms during the period 1960–2000 (Leckebusch et al., 2008a). Also the temporal pattern of storminess for Austria and the Czech Republic (Matulla et al., 2008) covering the period from the end of the 19th century to the 1990s resembles well the pattern of maximum gust wind speed in Zurich. In Austria, several extreme winter storms in the years 2007 and 2008 produced the most severe forest damage in more than 60 years (Steyrer et al., 2008).

The parameter maximum daily wind speed is claimed to be best for determining changes in wind speed and number of storm events (Rockel and Woth, 2007). For the future climate in Central Europe, extreme wind speed is predicted to increase (e.g., Rockel and Woth, 2007; Leckebusch et al., 2008a,b; Pinto et al., 2009), both in maximum wind speed of extreme events (Leckebusch et al., 2006) and in spatial extent (Leckebusch et al., 2008a).

However, regardless of the significance of the correlation between U_{DMG} and winter storm damage to forests, the dynamic wind field in forests may be the main cause of the majority of storm damage in forests. Results from experiments and modelling effects of dynamic wind fields to trees indicate the relevance of such interactions (Frank and Ruck, 2008; Moore and Maguire, 2008; Rudnicki et al., 2008; Schindler, 2008; Sellier et al., 2008). However, experimental designs and models have focused on single, relatively small trees, or on a limited number of trees that are not preferentially affected by severe winter storms. Due to experimental limitations, only moderate dynamic wind fields that do not cause damage have been estimated. Recording data from dynamic wind fields during severe storms may become available in the nearer future (Moore et al., 2005; James and Kane, 2008). As long as time series of such difficult-to-obtain data are not available, U_{DMG} or other variables of maximum wind speed need to serve as indicators to study the relation between wind and forest damage (e.g., Quine, 1991; Gardiner et al., 2000; Hubrig, 2004; Cook and Goyens, 2008; Gardiner et al., 2008; Kupfer et al., 2008; Islam and Peterson, 2009; Zandenberg, 2009).

Due to inconsistent or missing data the following forest and site factors often used to describe the susceptibility of forests to storm damage were not considered: proportion of conifers, stand structure, management system, and stand height. Various reports suggest that proportion of conifers and stand structure in Swiss forests have not changed substantially since 1860 (e.g., Weber, 1867; Flury, 1925; Brassel and Brändli, 1999). An increase in mean stand height was assumed to be positively correlated with growing stock (Vanselow, 1948; Kramer and Akca, 1987). Stand height was found to be one of the most important factors explaining forest damage following the storm Lothar in 1999 (Dobbertin, 2005). In contrast, Schütz (2005) concluded that stand height was less important than species composition and stand structure. Concerning site conditions, the question whether changes in soil chemistry reduce forests stability cannot be answered due to a lack of relevant data. However, a few studies have examined the effects of changes in soil chemistry on stand stability. After the Lothar storm, Braun et al. (2003) found more uprooted trees on soils with higher base saturation, but could not show a direct effect of root damage and uprooting. Mayer et al. (2005) found that Lothar caused more damage to stands on soils with lower pH values. However, they found no relationship between storm damage and modelled atmospheric deposition, which may have induced changes in soil chemistry. In summary, beyond several factors not treated in this study, our results show that storm caused forest damage in Switzerland from the middle of the 19th century until today is a function of wind force, growing stock and weather (temperature and precipitation) conditions preceding winter storm events.

3.6. Conclusion

Our results show that since the 19th century and particularly over the last four decades, wind velocity and strengths of wind fields have increased in Switzerland while forest area and growing stock were also increasing. In the meantime, winter temperature and precipitation have also increased, potentially driving forest stands to be more sensitive to wind storms through wetter and more often unfrozen soils. The combination of all these factors may explain why forests stands nowadays are generally more vulnerable to winter storms than they were in earlier times. Changing growing stock alone cannot explain the observed increase in forest damages.

To combine forestry and damage prevention, more detailed information on wind effects during winter storms is needed. This knowledge would help to better quantify storm vulnerability of forests with

respect to topography. It would require the analysis of more long-term wind data series and their relation to nearby winter storm damage records. More localised information on maximum gust wind speed would be a basis for highly resolved wind gust risk maps that could help forest managers to take appropriate preventive measures.

3.7. Acknowledgements

We thank Charlotte Steinmeier for her help in finding GIS-solutions, Urs Gimmi for hints on regional history, Urs Beat Brändli and Ulrich Ulmer for critical suggestions about forest inventory history, Nino Kuhn for advice on storm damage history, Stephan Bader for his assistance with the long-term climate series of MeteoSwiss and for access to the original historical wind data from the Zurich MeteoSwiss station, and Richard Volz for critical review of the manuscript.

Michèle Kaennel Dobbertin, Tracy and Dave Durrant, Hildegard and Helmut Nickel and Silvia Dingwall improved the English. This research was partly supported by PhD-fellowship no. 113425 from the Hans Böckler Stiftung (HBS), Germany, from the LOTHAR Grundlagen programme of the Federal Office of the Environment (FOEN), Switzerland, and the WSL programme Forest Dynamics.

3.8. References

Allaby, M., Bramwell, M., Stokes, J. (eds.), 2006. Weather and Climate. An illustrated Guide to Science. Chelsea House, New York, 208 pp.

Bazzigher, G., Schmid, P., 1969. Sturmschaden und Fäule. Schweiz. Z. Forstwes. 120, 521-535.

Begert, M., Schlegel, T., Kirchhofer, W., 2005. Homogeneous temperature and precipitation series of Switzerland from 1864 to 2000. Int. J. Climat. 25, 65-80.

Beniston, M., Stephenson, D.B., Stephenson, O.B., Ferro, C.A.T., Frei, C., Goyette, S., Halsnaes, K., Holt, T., Jylhä, K., Koffi, B., Palutikof, J., Schöll. R., Semmler, T., Woth, K., 2007. Future extreme events in

European climate: an exploration of regional climate model projections. Climatic Change 81, 71-95.

BFS, 1978-1994. Jahrbuch der Schweizerischen Wald- und Holzwirtschaft. Jahrbuch der Schweizerischen Wald- und Holzwirtschaft. Bundesamt für Wald und Landschaft (BUWAL), Bern.

Bosshard, W., 1967. Erhebungen über die Schäden der Winterstürme 1967. Schweiz. Z. Forstwes. 118, 806-821.

Brändli, U.-B., 2000. Waldzunahme in der Schweiz – gestern und morgen. Inf.bl. Forsch.bereich Landschaft 45, 1-4.

Brassel, P., Brändli, U.-B., 1999. Schweizerisches Landesforstinventar. Ergebnisse der Zweitaufnahme 1993-1995. Verlag Paul Haupt, Bern-Stuttgart-Wien, 442 pp.

Braun, S., Schindler, C., Volz, R., Flückiger, W., 2003. Forest damages by the storm "Lothar" in permanent observation plots in Switzerland: the significance of soil acidification and nitrogen deposition. Water Air Soil Poll. 142, 327-340.

Bütikofer, N., 1987. Historische Waldschäden der Schweiz (1800 - 1960), Universität Bern, Bern, 94 pp.

BUWAL, 1995-2007. Wald- und Holz. Jahrbuch. Bundesamt für Wald und Landschaft (BUWAL), Bern.

Cook, G.D., Goyens, C.M.A.C., 2008. The impact of wind on trees in Australian tropical savannas: lessons from Cyclone Monica. Austral. Ecol. 33, 462-470.

Coaz, J.W.F., 1880. Die Stürme vom 20. Februar, 25. Juni und 5. Dezember 1879 und der durch dieselben in den Waldungen der Schweiz verursachte Schaden. Jenet & Reinert, Bern, 57 pp.

Combe, J., 1998. Managing Swiss forests: when climate intervenes. In: Beniston, M., Innes, J.L. (Eds.), The Impacts of Climate Variability on Forests. Springer-Verlag, Berlin - Heidelberg, 191-219.

Dobbertin, M., 2002. Influence of stand structure and site factors on wind damage - Comparing the storms "Vivian" and "Lothar". Forest Snow Landsc. Res. 77, 187-205.

Dobbertin, M., 2005. Erfassung der Bestandesdaten und Schäden auf dem repräsentativen 4x4-km Sanasilva-Netz. In: Indermühle, M., Raetz, P., Volz, R. (Ed.) LOTHAR Ursächlichen Zusammenhänge und Risikobewertung. Synthese des Teilprogramms 6. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bern, 39-52.

EAFV, 1988. Schweizerisches Landesforstinventar: Ergebnisse der Erstaufnahme 1982-1986. Ber. Eidg. Anst. Forstl. Versuchswes. (EAFV) 305, 1-375.

EOFI, 1878-1994. Etat der schweizerischen Forstbeamten mit wissenschaftlicher Bildung. Eidgenössisches Oberforstinspektorat (EOFI), Bern.

ESA, E.S.A., 1907-1974. Schweizerische Forststatistik, Eidgenössisches Oberforstinspektorat.

ESA, E.S.A., 1975-1977. Jahrbuch der Schweizerischen Wald- und Holzwirtschaft, Eidg. Oberforstinspektorat.

Flury, P., 1925. Die forstlichen Verhältnisse der Schweiz. Kommissionsverlag von Beer & Cie., Zürich, Zürich, 246 pp.

Frank, C., Ruck, B., 2008. Numerical study of the airflow over forest clearings. Forestry 81, 259-277.

Frei, C., Scholl, R., Fukutome, S., Schmidli, J., Vidale, P.L., 2006. Future change of precipitation extremes in Europe: intercomparison of scenarios from regional climate models. J. Geophys. Res. Atmos. 111, 22 pp.

Gardiner, B., Byrne, K., Hale, S., Kamimura, K., Mitchell, S.J., Peltola, H., Ruel, J.-C., 2008. A review of mechanistic modelling of wind damage risk to forests. Forestry 81, 447-563.

Gardiner, B., Peltola, H., Kellomäki, S., 2000. Comparison of two models for predicting the critical wind speed required to damage coniferous trees. Ecol. Model. 129, 1-23.

Holenstein, B., 1994. Sturmschäden 1990 im Schweizer Wald. In: BUWAL (Ed.) Schriftenreihe Umwelt. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bern, 41 pp.

Hubrig, M., 2004. Analyse von Tornado- und Downburst-Windschäden an Bäumen. Analysis of Tornado and Downburst Wind Damage to Trees. Forst Holz 59, 78-84.

Indermühle, M., Raetz, P., Volz, R. (Eds.), 2005. LOTHAR Ursächliche Zusammenhänge und Risikoentwicklung. Synthese des Teilprogramms 6. Umwelt-Materialien, Nr. 184. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bern, 145 pp.

Islam, T., Peterson, R.E., 2009. Climatology of landfalling tropical cyclones in Bangladesh. Nat. Hazards 48, 115-135.

James, K.R., Kane, B., 2008. Precision digital instruments to measure dynamic wind loads on trees during storms. Agric. For. Meteorol. 148, 1055-1061.

Kramer, H., Akca, A., 1987. Leitfaden für Dendrometrie und Bestandesinventur, 2. edn. J.D. Sauerländer's Verlag, Frankfurt am Main, 287 pp.

Kraus, H., Ebel, U., 2003. Risiko Wetter. Die Entstehung von Stürmen und anderen Gefahren. Springer Verlag, Berlin-Heidelberg-New York, 250 pp.

Kuhn, N., 1995. Die standörtliche Abhängigkeit der Vivian-Windwürfe. Inf.bl. Forsch.bereich Landsch.ökol. Nr. 28, 1-3.

Kupfer, J.A., Myers, A.T., McLane, S.E., Melton, G.N., 2008. Patterns of Forest Damage in a Southern Mississippi Landscape Caused by Hurricane Katrina. Ecosystems 11, 45-60.

Kurz, D., Alveteg, M., Sverdrup, H., 1998. Acidification of Swiss Forest Soils. Development of a Regional Dynamic Assessment. Environmental Documentation. Swiss Agency for the environment, Forests and Landscape (SAEFL), Bern, 115 pp.

Lamb, H., 1991. Historic storms of the North Sea, British Isles and Northwest Europe. Cambridge University Press, Cambridge - New York - Port Chester - Melbourne - Sydney, 204 pp.

Landolt, E., 1861. Witterungserscheinungen im Jahr 1860 und deren Einfluss auf die Vegetation und die Waldarbeiten. Schweiz. Z. Forstwes. 11, 29-33.

Landolt, E., 1862. Bericht an den hohen Schweizerischen Bundesrath über die Untersuchungen der Schweiz. Hochgebirgswaldungen, vorgenommen in den Jahren 1858, 1859 und 1860. J.A. Weingart, Bern, 367 pp.

Leckebusch, G.C., Ulbrich, U., 2004. On the relationship between cyclones and extreme windstorm events over Europe under climate change. Clobal Planet. Change 44, 181-193.

Leckebusch, G.C., Koffi, B., Ulbrich, U., Pinto, J.G., Spanghel, , T., Zacharis, S., 2006. Analysis of frequency and intensity of European winter storm events from a multi-model perspective, at synoptic and regional scales. Climate Res. 31, 59-74.

Leckebusch, G.C., Renggli, D., Ulbrich, U., 2008a. Development and application of an objective storm severety measure for the Northeast Atlantic region. Meteorol. Z. 17, 575-587.

Leckebusch, G.C., Weimar, A., Pinto, J.G., Reyers, M., Speth, P., 2008b. Extreme wind storms over Europe in present and future climate: a cluster analysis approach. Meteorol. Z. 17, 67-82.

Lee, X., 2000. Air motion within and above forest vegetation in non-ideal conditions. For. Ecol. Manage. 135, 3-18.

LFI/WSL, 2007. Erste Ergebnisse des dritten Landesforstinventars LFI3. Wissenschaftliche Fakten zur Medienkonferenz WSL/BAFU vom 9. November 2007 in Bern. Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf. http://www.lfi.ch/news/news/wiss_Fakten_LFI3-de.pdf

Lundström, T., Joans, T., Volkwein, A., 2008. Analysing the mechanical performance and growth adaptation of Norway spruce using a non-linear finite-element model and experimental data. J Exp Bot 59, 2513-2528.

Manly, B.F.J., 1997. Randomization, Bootstrap and Monte Carlo Methods in Biology. 2nd Ed., Chapman & Hall, London, Weinheim, New York, Tokyo, Melbourne, Madras, 399 pp.

Mantel, K., 1990. Wald und Forst in der Geschichte. Verlag M. & M. Schaper, Alfeld - Hannover, 518 pp.

Mather, A.S., Fairbairn, J., 2000. From Floods to Reforestation: The Forest Transition in Switzerland. Environ. Hist. 6, 399-421.

Matti, C., Pauling, A., Küttel, M., Wanner, H., 2009. Winter precipitation trends fort wo selected European regions over the last 500 years and their possible dynamical background. Theor. Appl. Climatol. 95, 9-26.

Matulla, C., Schöner, M., Alexandersson, H., von Storch, H., Wang, X.L., 2008. European storminess: late nineteenth century to present. Climate Dynam. 31, 125-130.

Maurer, J., Billwiller Jr., R., Hess, C., 1909. Das Klima der Schweiz. Auf Grundlage der 37jährigen Beoachtungsperiode 1864-1900,vol. 1. Huber & Co. Frauenfeld, 302 pp.

Mayer, H., Schindler, D., 2002. Forstmeteorologische Grundlagen zur Auslösung von Sturmschäden im Wald in Zusammenhang mit dem Orkan "Lothar". Allg. Forst. Jagdztg 173, 200-208.

Mayer, P., Brang, P., Dobbertin, M., Hallenbarter, D., Rennaud, J.-P., Walthert, L., Zimmermann, S., 2005. Forest storm damage is more frequent on acidic soils. Ann. For. Sci. 62, 303-311.

MeteoSchweiz (Ed.), 1865-2006. Annalen. Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie, Zürich.

Moore, J.R., Gardiner, B.A., Blackburn, G.R.A., Brickman, A., Maguire, D.A., 2005. An inexpensive instrument to measure the dynamic response of standing trees to wind loading. Agric. Forest Meteorol. 132, 78-83.

Moore, J.R., Maguire, D.A., 2005. Natural sway frequencies and damping ratios of trees: influence of crown structure. Trees 19, 363-373.

Moore, J.R., Maguire, D.A., 2008. Simulating the dynamic behavior of Douglas-fir trees under applied loads by the finite element method. Tree Physiol. 28, 75-83.

Mousson, A., 1864. Bericht über die Organisation meteorologischer Beobachtungen in der Schweiz. Zürich, 69 pp.

Münchner Rückversicherungs-Gesellschaft, 2001. Winterstürme in Europa (II). Schadenanalyse 1999 - Schadenpotentiale. Münchner Rückversicherungs-Gesellschaft, München, 72 pp.

Nabuurs, G.J., Schellhaas, M.J., Mohren, G.M.J., Field, C.B., 2003. Temporal evolution of the European forest sector carbon sink from 1950 to 1999. Glob. Change Biol. 9, 152-160.

NZZ, 1891-1933. Neue Zürcher Zeitung. NZZ Verlag, Zürich 120-154.

Otto, H.-J., 2000. Waldbauliche Erfahrungen nach Sturmkatastrophen - eine Rückschau in Niedersachsen (Silvicultural Experience after Wind-Throw Catastrophs - a Retrospect View in Lower Saxony). Forst Holz 55, 371-376.

Panferov, O., Sogachev, A., 2008. Influence of gap size on wind damage variables in a forest. Agric. Forest Meteorol. 148, 1869-1881.

Pfister, C., 1984. Klimageschichte der Schweiz 1525-1860. Academia Helvetica. Verlag Paul Haupt, Bern and Stuttgart, 184 pp.

Pfister, C., 1999. Wetternachhersage - 500 Jahre Klimavariationen und Naturkatastrophen (1496-1995). Verlag Paul Haupt, Bern - Stuttgart - Wien, 304 pp.

Pinto, J.G., Zacharis, S., Fink, H., Leckebusch, G.C., Ulbrich, U., 2009. Factors contributing to the development of extreme North Atlantic cyclones and their relationship with the NAO. Climate Dynam. 32, 711-737.

Quine, C.P., 1991. Recent storm damage to trees and woodlands in southern Britain. In: Hodge, S. J. (Ed.) Research for Practical Arboriculture. Forestry Commission Bulletin 97, HMSO, London, 83-89.

Rebetez, M., Reinhard, M., 2007. Monthly air temperature trends in Switzerland 1901-2000 and 1975-2004. Theor. Appl. Climatol. 91, 27-34.

Rockel, B., Woth, K., 2007. Extremes of near-surface wind speed over Europe and their future changes as estimated from an ensemble of RCM simulations. Climatic Change 81, 267-280.

Rottmann, M., 1986. Wind- und Sturmschäden im Wald, J. D. Sauerländers Verlag, Frankfurt am Main, 128 pp.

Rudnicki, M., Meyer, T.H., Lieffers, V.J., Silins, U., Webb, V.A., 2008. The periodic motion of lodgepole pine trees as affected by collisions with neighbors. Trees 22, 475-482.

Rudnicki, M., Silinis, U., Lieffers, V.J., Josi, G., 2001. Measure of simultaneous tree sways and estimation of crown interactions among a group of trees. Trees 15, 83-90.

Schelhaas, M.J., Nabuurs, G.J., Schuck, A., 2003. Natural disturbances in the European forestsin the 19th and 20th centuries. Glob. Change Biol. 9, 1620-1633.

Schelhaas, M.J., Nabuurs, G.J., Sonntag, M., Pussinen, A., 2002. Adding disturbances to a large-scale forest scenario model and a case study for Switzerland. Forest Ecol. Manag. 167, 13-26.

Scherrer, S.C., Appenzeller, C., Liniger, M.A., 2006. Temperature trends in Switzerland and Europe: Implications for climate normals. Int. J. Climat. 26, 565-580.

Schiesser, H.-H., Pfister, C., Bader, J., 1997a. Winter storms in Switzerland north of the Alps 1864/1865-1993/1994. Theor. Appl. Climatol. 58, 1-19.

Schiesser, H.-H., Waldvogel, A., Schmid, W., Willemse, S., 1997b. Klimatologie der Stürme und Sturmsysteme anhand von Radar- und Schadendaten. Schlussbericht NFP 31. vdf, Hochschulverlag an der ETH Zürich, Zürich, 132 pp.

Schindler, D., 2008. Responses of Scots pine trees to dynamic wind loading. Agric. Forest Meteorol. 148, 1733-1742.

Schmidli, J., Frei, C., 2005. Trends of heavy precipitation and wet and dry spells in Switzerland during the 20th century. Int. J. Climat. 25, 753-771.

Schmidtke, H., Scherrer, H.-U., 1997. Sturmschäden im Wald: [Projektschlussbericht im Rahmen des nationalen Forschungsprogrammes "Klimaänderungen und Naturkatastrophen in der Schweiz", NFP 31]. vdf, Hochschulverlag AG an der ETH Zürich, Zürich, 38 pp.

Schmoeckel, J., Kottmeier, C., 2008. Storm damage in the Black Forest caused by the winter storm "Lothar" - Part 1: Airborne damage assessment. Nat. Hazard Earth Sys. 8, 795-803.

Schüepp, M., 1973. Klimatologie der Schweiz. Wind. Beiheft zu den Annalen der Schweiz. Meteor. Anstalt (Jahrgang 1971). Pp. 60.

Schütz, J.-P., 2005. Einfluss verschiedener Faktoren auf Art und Ausmass der Sturmschäden. In: Indermühle, M., Raetz, P., Volz, R. (Ed.) LOTHAR Ursächlichen Zusammenhänge und Risikobewertung. Synthese des Teilprogramms 6. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern, 29-38.

Schütz, J.-P., 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.

Schweizerischer Bundesrat, 1878. Bericht des Bundesrates an die hohe Bundesversammlung über seine Geschäftsführung im Jahr 1877. Schweizerisches Bundesblatt. 30, 21, 557-690.

Seierstad, L.A., Stephenson, D.B., Kvastro, N.G.., 2007. How useful are teleconnection patterns for explaining variability in extratropical storminess? Tellus 59A, 170-181.

Sellier, D., Brunet, Y., Fourcaud, T., 2008. A numerical model of tree aerodynamic response to a turbulent airflow. Forestry 81, 279-297.

Spatz, H.C., Brochert, F., Pfisterer, J., 2007. Multiple resonance damping or how do trees escape dangerously large oscillations? Am. J. Bot. 94, 1603-1611.

Steyrer, G., Czech, T.L., Fürst, A., Hoyer-Tomiczeck, U., Krehan, H., Perny, B., Tomiczeck, C., 2008. Noch keine Beruhigung in Sicht. Forstzeitung119, 15-17.

Trigo, R.M., Valente, M.A., Miranda, P.M.A., Ramos, A.M., Paredes, D., Garcia-Herrera, R., 2008. The impact of North Atlantic wind and cyclone trendson European precipitation and significant wave height in the Atlantic. Ann. N.Y. Acad. Sci. 1145, 212-234.

Trouet, V., Esper, J., Graham, N.E., Baker, A., Scourse, J.D., Frank, D.C., 2009. Persistent positive North Atlantic oscillation mode dominated the medieval climate anomaly. Science 324, 78-80.

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. Int. J. Climatol. DOI: 10.1002/joc.1895

Uttinger, H., 1968. Die Zahl der Tage mit Windspitzen von mindestens 20 Metern pro Sekunde in Zürich (1934-1967). Veröffentlichungen der Schweizeriwschen Meteorologischen Zentralanstalt. City Druck AG, Zürich, pp. 22.

Uttinger, H., Schüepp, M. 1951. Zur Reduktion klimatischer Mittelwerte von Zürich auf die neue Beobachtungsstation Krähbühlstrasse der Schweizerischen Meteorologischen Zentralanstalt. Annalen der Schweizerischen Meteorologischen Zentralanstalt 87, 1-5.

Vanselow, K., 1948. Einführung in die Forstliche Zuwachs- und Ertragslehre, III. edn. Verlag Hermann Kayser, Kaiserslautern, 156 pp.

Weber, 1867. Auszug aus der Forst-Statistik des Kantons Bern. Buchdruckerei von J. Allemann, Bern, 69 pp.

WSL, BUWAL (Eds.), 2001. Lothar. Der Orkan 1999. Ereignisanalyse. Eidg. Forschungsanstalt WSL, Bundesamt für Wald, Schnee und Landschaft BUWAL, Birmensdorf, Bern, 365 pp.

Zandenberg, P.A., 2009. Exposure of US counties to Atlantic tropical storms and hurricanes, 1851-2003. Nat. Hazards 48, 83-99.

4. Artikel 2: Wind speed measurement and forest damage in Canton Zurich (Central Europe) from 1891 to winter 2007

Wind speed measurements and forest damage in Canton Zurich (Central Europe) from 1891 to winter 2007

Tilo Usbeck[1], Thomas Wohlgemuth[1], Christian Pfister[2], Richard Volz[3], Martin Beniston[4], Matthias Dobbertin[1]

[1] WSL Swiss Federal Research Institute, Birmensdorf, Switzerland

[2] University of Berne, Bern, Switzerland

[3] Federal Office for the Environment (FOEN), Bern, Switzerland

[4] University of Geneva, Genève, Switzerland

International Journal of Climatology 30, 3: 347-358

4.1. Abstract

The most severe damage to forests in central Europe occurs during winter storms that are caused by Northern Hemispheric mid-latitude cyclones. These winter storms have caused several catastrophic windthrows during the past four decades. Amounts of forest storm damage are believed to be a function of both the size of the forest and the storm intensity. To test this hypothesis, the Zurich region (city and canton) was chosen because long-term climate observation data is available for the region. The relationships between forest attributes, wind speed and forest damage were explored by comparing data on forests and wind speed from 107 winters with forest damage. Storm damage was defined as the proportion of damaged forests with respect to the growing stock. The variables: daily wind run (91 years), daily maximum hourly average wind speed (107 years), and peak gust wind speed (74 years) were homogenized with respect to high wind speed and related to levels of forest damage.

High maximum wind speed at the end of the 19th and at the beginning of the 20th century was followed by low maximum wind speed in the 1940s, 1960s and 1970s. Since then, maximum values have

increased. Gusts (extremes of the maximum wind speed) increased from the beginning of the recordings in 1933 and peaked in the early 1990s.

Forest damage due to winter storms is best correlated with peak wind speed. Gusts exceeding 40 m/s and resulting in catastrophic windthrow have increased in recent winters.

4.2. Introduction

The most frequent and most severe damage to forests in Central Europe is caused by storms. West-wind storms, which occur especially frequently during winter months, affect forests directly by causing windthrow and windbreakage, or indirectly by providing conditions for post-storm damage, particularly bark beetle (*Ips typographus*) outbreaks (Meier *et al.*, 2006). For Switzerland, a long-term increase in winter storm damage to forests has been observed (Schmidtke and Scherrer, 1997, Schelhaas *et al.*, 2002, Erb, 2004). However, recent studies have failed to find a significant correlation between wind speed and inventoried windthrow damage in Switzerland, e.g. for the Lothar storm in 1999 (Mayer et al., 2005, Schütz et al., 2006). Various factors have been discussed as the causes of wind damage to Swiss forests, e.g. soil moisture content, soil depth, soil/bedrock acidity, soil skeleton, proportion of Norway spruce and silver fir in the stands, stand mixture with respect to species composition and age structure, stand height and decay proportion (e.g. Coaz, 1880, Bosshard, 1967, Bazzigher and Schmid, 1969, Rottmann, 1986, König, 1995, Kuhn, 1995, Dobbertin, 2005, Indermühle *et al.*, 2005). However, the main influencing factors identified in the different studies tend to vary widely, possibly because they focus on different variables (Dobbertin, 2002, Hollenstein, 2002). In none of these investigations, however, has the factor wind yet been quantitatively included or incorporated in storm hazard models relevant to the Swiss landscape, where forests tend to be unevenly aged and to vary in composition, with some close-to-nature and others highly modified.

Most of the disturbance-induced damage to forests in Central Europe is caused by winterstorms, i.e., due to high gust wind speed and duration (Otto, 2000, Mayer and Schindler, 2002, Hubrig, 2004, WSL and BUWAL, 2001). Detailed long-term information about wind extremes, such as the peak gust or maximum average wind speed, is generally lacking. In Europe, only a few studies have reported systematic changes in storminess on the basis of station observations (Smits *et al.*, 2005). Precise, long-term records of

forest storm damage, i.e., data that may correspond with wind extremes, are also rare (Schelhaas *et al.*, 2003).

4.2.1. Coincidental long-term wind and forest data in the region of Zurich

Wind speed has usually been measured as the current or average wind speed, starting with Hook's pendular-anemometer in 1667 (Hann, 1901). In contrast to measurements of precipitation or temperature, the observation of near surface wind is much more difficult (Hann, 1869, Schüepp, 1973). A major obstacle for consistent measurements is the great spatial variability of both wind direction and as wind speed (Woelfle, 1950). In addition, it is difficult to compare long-term wind datasets from different stations because of technical differences between the anemometers and their components, as well as changes during maintenance (Schüepp, 1950, Trenberth *et al.*, 2007). Finally, sound wind measurements (e.g. using the cups of the anemometer or Prandtl's pitot tube) require locations that are free from other aerodynamic influences (Maurer *et al.*, 1909). Utilizable gadgets for continuous wind measurement and recording have been available since the mid-19th century, e.g. Robinson anemometers. Such anemometers have been used for 135 years in the city of Zurich (Switzerland, Central Europe), in the center of Canton Zurich. During the whole period of instrumental wind measurement, the Zurich climate station was only moved twice: once 172 m and then 996 m away from the earlier position. In both cases the slope and exposition remained unchanged. We consider it exceptional to have such long-term and comparable wind measurements. Hence it is worth comparing them with analogue data series for both forest dimensions and damage to forests by winter storms. Schiesser *et al.* (1997) considered the Zurich wind observations representative of the wind pattern in the whole of Northern Switzerland.

Records of storm damage to forests in Canton Zurich were published in annual reports from the mid-19th century to 1979 in a nearly continuous series with high temporal and spatial resolution. Changes in forest area are well documented in both cantonal and federal reports, and changes in growing stock are listed in federal reports.

Because of the satisfactory data situation with respect to long-term records of both wind and forest parameters, we chose these series to test the assumption that direct forest damage caused by wind storms is a function of both wind speed and forest dimensions. The data analyses allow the effects of both wind force and forest dimensions to be estimated. These findings are particularly relevant today as it is assumed that the ongoing climate warming results in greater wind forces.

The following questions are addressed in this paper:

1. Have winter storm events in Zurich increased in number, in peak gust wind speed and in maximum average wind speed since the mid-19th century?

2. Do the observed wind data from Zurich's climate station correlate with cantonal and regional forest damage records?

4.3. Data and Analysis

4.3.1. Wind data

All wind measurements at the Zurich climate station are recorded in meters per second (m s^{-1}) or kilometers per hour (km h^{-1}). Automatic self-recording and permanent wind measurement using several instruments commenced on the roof of the Semper Observatory, Zurich (47°22'42"/+8°33'2", position of the cup-cross), in summer 1872 (Billwiller, 1873) (Figure 4.3.1).

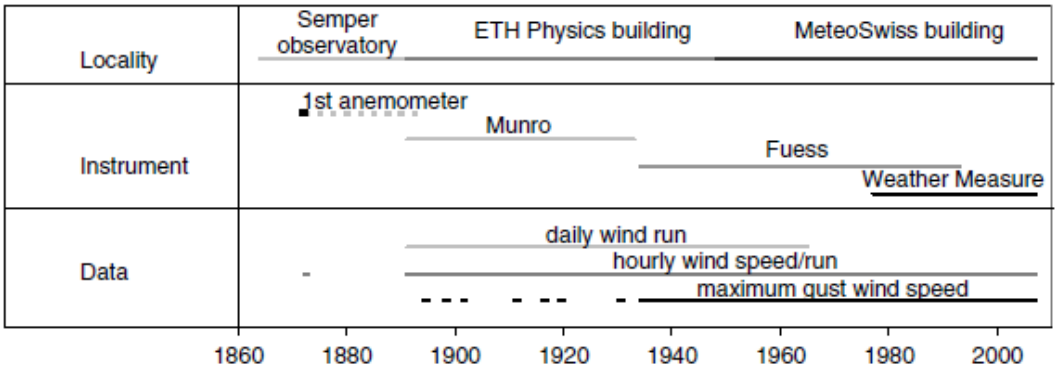


Figure 4.3.1: History of wind measurement at the Zurich climate station in terms of locality, instruments used and data collected.

This reference and a few photos showing a Robinson anemometer with large cups and other equipment are the only details we have about the first period of Zurich's automatic wind measurement 1872-1890. In 1891 the Zurich climate station was moved 172 m south-eastward (47+22'38"/+8°33'9"), and a Beckley-system from R. Munro, London (Billwiller, 1893), was installed at the top of a meteorological tower ("Anemometerturm") on the roof of the first physics building of the Swiss Federal Institute of Technology, Zurich, (ETH Zurich). At this location, wind attributes from 1 January 1891 to 16 November 1933 were automatically recorded using the same gauge. All recorded hourly averages of wind direction and wind speed (U_{HAW}) as well as daily wind run (U_{DRW}) were published (SMA, 1893-1934). During forty-three-year period, only nine values for daily peak gust wind speed (U_{PGW}) were mentioned, always in the context of storm events, in the publications. No other records, such as original data sheets, were found.

In 1933, the old Munro-anemometer was replaced by another cup-anemometer, a Fuess 82a "Universal" from Fuess, Berlin-Spandau. The gust wind speed was observed with a pitot tube. Records were published as hourly averages of wind direction and wind speed for the period between 29 November 1933 and 1 January 1937 (SMA (1934-1938). Hand-written compilations from 1936 (same values as in SMA, 1934-1938) until 1981 are stored in the archives of MeteoSchweiz in Zurich. In 1949, the whole Zurich climate station was moved 966 m eastward to its current position. The Fuess anemometer was positioned again on top of a tower on the main building of MeteoSchweiz. The elevation of the anemometer cups (581.5 m a.s.l.) was raised by 71.2 m (Uttinger and Schüepp, 1951). The anemometer was moved 996 m (47°22'42"/+8°33'56").

At the end of 1980, the Fuess 82a was rejected as the official wind gauge of the Zurich climate station, but was kept in use until September 1993 and eventually removed from the tower in 2002. During the last recording years, less complete data on hourly average wind speed, wind direction and gust wind speed were recorded. The complete, but demounted wind gauge was inspected by one of the authors in 2006. On photos dating back to the 1970s and 1980s, up to six different anemometers are visible on the tower, but data and further information are available from only one of these anemometers.

In 1976, two new measure devices were installed for the new automatic climate station net (ANETZ): Weather Measure W 103 (average wind speed and gust wind speed) and Weather Measure W104 (wind direction). These instruments became the official wind observation instruments in 1981. Since then, average wind speed values and peak gust wind speed values have been recorded at 10 min-intervals. Earlier, unofficial and non-revised data were made available at MeteoSchweiz on special request.

Other hourly average wind speed data in Switzerland's lowlands were recorded at the Bern climate station from 1864 to 1890 (SMA, 1865-1892) and from 1891 to 1978 (unpublished; stored in the archive of the Astronomical Institute of the University Bern). For a short period (1891-1893), the measurements in Bern were compared with those in Zurich (unpublished synopsis; Schweizerisches Bundesarchiv, Bern). Because we considered the series from the Zurich climate station to be the most representative (Noetzlin, 1941, Uttinger, 1968, Schiesser *et al.*, 1997), no other wind data were used. Additional metadata were derived from an unpublished station history of the Zurich climate station, from original data sheets, and from different editions of the "Lehrbuch der Meteorologie" (Hann, 1901, Hann, 1906, Hann and Süring, 1926, Hann and Süring, 1951).

4.3.2. Forest damage data

4.3.2.1. Damage amounts and metadata

Information about the severity of damage, which is usually scaled in cubic meters (m^3) were derived from the official sources available, i.e. from cantonal and federal records or similar. Official annual reports for Canton Zurich started in 1831 and included comments about forests. The first information about forest hazards was recorded in 1835 for cantonal, communal and corporational forests. Since 1899, the reports have also covered private forests. However, until 1930, forest damage was largely reported as qualitative information only. After the exceptional level of forest damage in 1930, small levels of damage were not recorded until the 1970s. Since 1980, information about storm damage has not been given in the cantonal annual reports apart from about the catastrophic events Vivian (1990) and Lothar (1999). For years without numbers, storm damage data for Canton Zurich was derived either from non-cantonal publications or, most recently, directly from the cantonal Forest Services. In addition, we used meta-data concerning regional localizations of storm damage from annual cantonal reports, especially in cases where the amount of damage was small.

4.3.2.2. Forest area data

Total forest area was extracted from the published annual cantonal reports. For missing periods, the forest area data given in the federal statistics were adopted. Descriptions of Swiss forests with cantonal references date back to the years 1858 to 1860 (Landolt, 1862). This inventory was followed by the "Etat

Forstbeamte" (EOFI, 1878-1994) and the Statistical Yearbook of Switzerland (SFSO, 1891-2007). These started with an inventory in 1877, with annual reports from 1891 to 1949 without larger gaps and again from 1986 to the present. The Swiss Forest Statistics (BAFU, 1908-2006) started in 1908 with the 1877 data, continuing with the data from 1950, and from 1955 annually to the present (from 1986 on it was combined with the Statistical Yearbook of Switzerland).

4.3.2.3. Growing stock data

The data on growing stock are rather inadequate, but as most parts of Canton Zurich are located in the Swiss Plateau, the Swiss Plateau data given in Weber (1867), EIFJF (1954) and Ott (1972) were adopted. Growing stock data were combined with information about Canton Zurich and Swiss Plateau values in EAFV (1988), and in Brassel and Brändli (1999).

4.3.3. Analyses

4.3.3.1. Selection of the observation area

West-wind winter storms over the European continent are caused by cyclonal processes (e.g. Schiesser *et al.*, 1997, Chang *et al.*, 2002, Bengtsson *et al.*, 2006). Such events usually affect large areas along the storm track and last for longer periods than thunderstorms (usually several hours, and more rarely one full day). Therefore we assumed: (1) there was a high probability that each point in a region affected by a westerly winter storm would be hit by at least one of the strong gusts and would also be exposed to a high average wind speed during the event, so long as the wind unhindered at the location of measurement, i.e. there were no shelter effects. Because the terrain relief around the west-exposed climate station of Zurich in the Swiss Plateau is moderately structured, weather flow can pass unhindered; (2) the observation area for storm damage encompasses a compact local perimeter, especially compared to the main west storm direction. The climate station is roughly in the center of Canton Zurich, which extends 50 km from NNW to SSE and 40 km from WSW to NEN (surface 1729 km^2, 28% forested). To meet the main objective of comparing reliable data sets, it was necessary to create both homogenized wind series and homogenized forest damage data.

4.3.3.2. Homogenization of wind data

Usually homogenizations of meteorological long-term data series require data from simultaneous observations (e.g. Auer *et al.*, 2001, Begert *et al.*, 2005, Thomas *et al.*, 2005, Della-Marta and Wanner, 2006, Gimmi *et al.*, 2007). For both the average and maximum wind data, only the wind series of the Zurich climate station were satisfactory. Other series, such as the Dübendorf airport series, which started in 1949 about 6 km away from the Zurich series, were not considered because they covered shorter periods and measured different wind characteristics (Uttinger, 1968).

We excluded low to medium wind speed from the homogenization because we were focusing on the connection between wind speed and storm damage. In a stepwise procedure, the reliability of the data was improved by: (1) proving raw data using metadata, (2) detecting inhomogeneities such as shifts, (3) removing them with adjustments concerning high values. For the latter step, the inhomogeneities were either recalculated or combined with simultaneous measurement periods.

The following data from the Munro and Fuess anemometers were digitized: (1) U_{DRW} (km/d), (2) U_{HAW} (km/h) for the winter half year, 1 October to 31 March, additionally 1930 to 1936 for all seasons, and (3) U_{PGW} (m/s) of at least 30 m/s for the winter half years (Figure 3.2.1). U_{PGW} exceeding 20 m/s during the uncorrected period until 4 March 1934 were assessed, as well as U_{PGW} during the winter seasons from 1980 to 1986 that exceeded 30 m/s. In addition, 3-hourly average wind speed data (converted to hourly values) from January to March and from October to December 1879 and the hourly average wind speed data from January to March and October to December 1890 from the Bern climate station were digitized.

Scatterplots of all series from the Zurich climate station were checked by eye for major breaks in the series. Any relevant metadata information available was analyzed to find potential explanations of the inhomogeneities.

The periods between break points were adjusted either by the ratio method (a) or by the comparison-and-substitution method (b). The ratio method (a) was used with a single dataset when adjustment information from metadata was available. Data from each period were modeled simply according to the proportion of the appropriate original parameters found in the literature. The original equation of Hann and Süring (1926):

$v = c + f_K \times n$ (1)

where v = wind speed, c=minimum wind speed for the anemometer-cup move, f_K = factor according to the Kew-model = 2.2, and n = distance from the anemometer-cup center was therefore modified for our purpose to

$v_h = c + v \times f_K/f_R$ (2)

where v_h = homogenized wind speed, and f_R = factor according to Robinson = 3.00

The constant c in (2) was set to 0 because some specific anemometer instrumental data specific to the anemometer were missing for the Zurich Munro anemometer. The resulting uncertainty about c in (1) is assumed to be negligible if the focus is on high wind speed only. We used these equations because no appropriate corrections were found for the wind series 1864-1893 of the Bern climate station. However, the data series 1891-1893 from Bern and Zurich are in the same range. The factor f_R of the Bern climate station anemometer was set to the original Robinson standard of 3.00 (Wild, 1866).

We applied the comparison-and-substitution method (b) if parallel measurements from two different instruments were available. The parallel measurement periods were then divided into sub-periods according to metadata breakpoints derived from the station's history. The two U_{PGW} measurements in each sub-period were tested by Wilcoxon signed rank tests. For both measurements for each sub-period, linear regression was applied. Any inhomogeneities detected were left unchanged if no clear breakpoints were detectable or if there was no information to explain them.

4.3.3.3. Amount of damage

How much of a forest is damaged after strong wind depends on various forest attributes such as its area and growing stock. In order to quantify damage probabilities, forest attributes need to be adjusted. Given the simple fact that forest damage occurs only where forests are present, both the proportion of forest in a study area as well as the amount of standing wood influences the damage potential of storms. The extent of damage in forests after windthrow is usually measured or estimated in absolute numbers, normally in m^3 of timber. Both published and unpublished values were derived from official, reliable statistics.

Data on the land and forest area in Canton Zurich were taken from various sources. The cantonal annual reports on forests provided information about forest areas. Obvious breakpoints were checked for causes (administrative, e.g. classificatory or real, e.g. extreme events). Only those changes in the forest area were considered that were the result of real events. Time series were fitted by a linear regression.

Values for the growing stock were fitted by the quadratic term of a polynomial regression. The relevant data for Canton Zurich were based on Weber (1867), EIFJF (1954), Ott (1972), EAFV (1988), and Brassel and Brändli (1999). We chose the percentage of damage to the growing stock as an appropriate measure for long-term damage values calculated as: amount of damage/growing stock.

4.3.3.4. Comparison of wind and damage

The damage series were compared to the different series of daily wind speed measurements. Distributions of wind speed during damage days were compared separately for the three periods 1891-1931, 1932-1979 and 1980-2007. Comparisons distinguished days with damage occurrences close to the wind observation site from damage days with respect to the distant vicinity. A period of low U_{PGW} measurements, 1947-1957, was excluded from the comparisons because the measurements of gust wind speed were inexplicably low (Uttinger, 1968).

Wind data for the damage days were ranked with respect to damage threshold periods. Ranks were used for semi-percentile distributions and trends were defined for different temporal wind speed resolutions. The levels of the damage thresholds were based on finer data resolution. We correlated the wind force of the three wind variables U_{DRW}, U_{HAW}, and U_{PGW}, with the extent of damage to the forests using damage data for forest areas either close to (surrounding forest region) the anemometer or further away (all other forest regions). To simplify computation of wind force, we used the mean drag coefficient of $C_d = 1.11$ of a static round-shaped plate, and $C_d = 1.10$ of a static square-shaped plate.

4.4. Results

4.4.1. Homogenization of the wind data

Two inhomogeneous periods were homogenized at the Zurich climate station in comparison to recent measurements. For the period from 1891 to 5 March 1934, the average wind speed was homogenized using the extreme values of U_{HAW} (Figure 4.4.1) and the following U_{DRW}. Daily averages of about 50 km/h completely disappeared (data given in supplements 2a and 2b) and the extremes of recorded storm days moved into the range of today's storm days (Figure 4.4.2; data given in supplements 3a to 3d). In the 1981-1984 period, missing extreme U_{PGW} values were replaced by homogeneous values from parallel measurements from the same site (Figure 4.4.3). No U_{PGW} above 30 m/s was recorded from the time when Fuess was replaced by Weather Measure 1981 as the official anemometer up until when the Weather Measure W 103 equipment was replaced by a technically different Weather Measure W 103 in 1984. A significant difference in U_{PGW} between the records of the Fuess and Weather Measure gauges was found in 1981 (359 values; Wilcoxon signed rank test, $p < 0.0001$). When the same test was applied to 180 smaller values as well as to values equal or smaller than 7 m/s (Fuess), no significant difference resulted ($p = 0.41$ and $p = 0.27$). Comparisons of the 180 higher values and values greater than 25 m/s (Fuess) revealed significant differences ($p < 0.0001$). High U_{PGW} measured by the Fuess gauge resulted in generally higher values than those measured by Weather Measure. Hence the Weather Measure was replaced, both gauges have recorded high U_{PGW} in the same range.

From 1895 to 2004, windiness in the Swiss Plateau, i.e. especially strong average wind speed, changed in both frequency and strength (Figure 4.4.2). Between 1915 and 1970, both the strength and frequency of U_{HAW} was low and varied considerably in different 5-year periods. Since the early 1970s, high wind speed has increased continuously. Observed extrems of U_{PGW} have increased since the mid-1930s, the time when data first became available for the reference station (Figure 4.4.3). U_{PGW} is more variable than average wind speed. In the period from 1947 and 1957 peak gust wind speed measurements were, inexplicably low, and few high gusts were measured. During this period, however, only one medium forest damage event occurred.

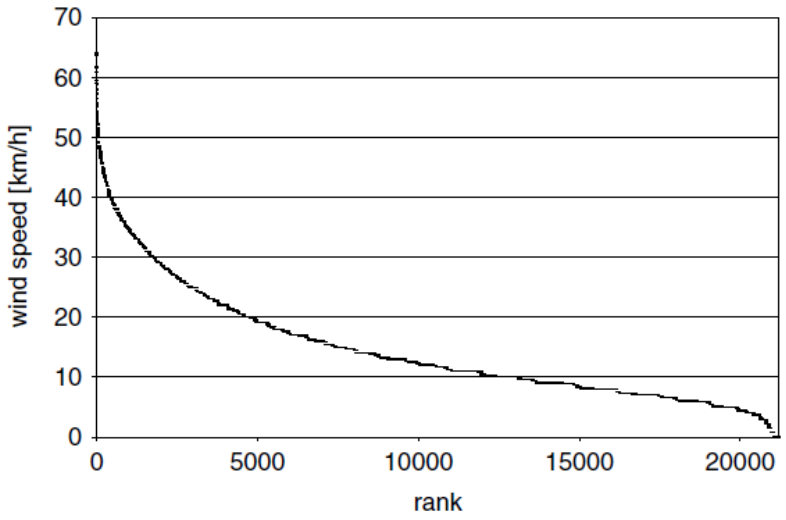


Figure 4.4.1: Ranked values of the high-tail homogenized daily maximum hourly average wind speed in winter from 1 January 1891 to 31 March 2007 at the Zurich climate station.

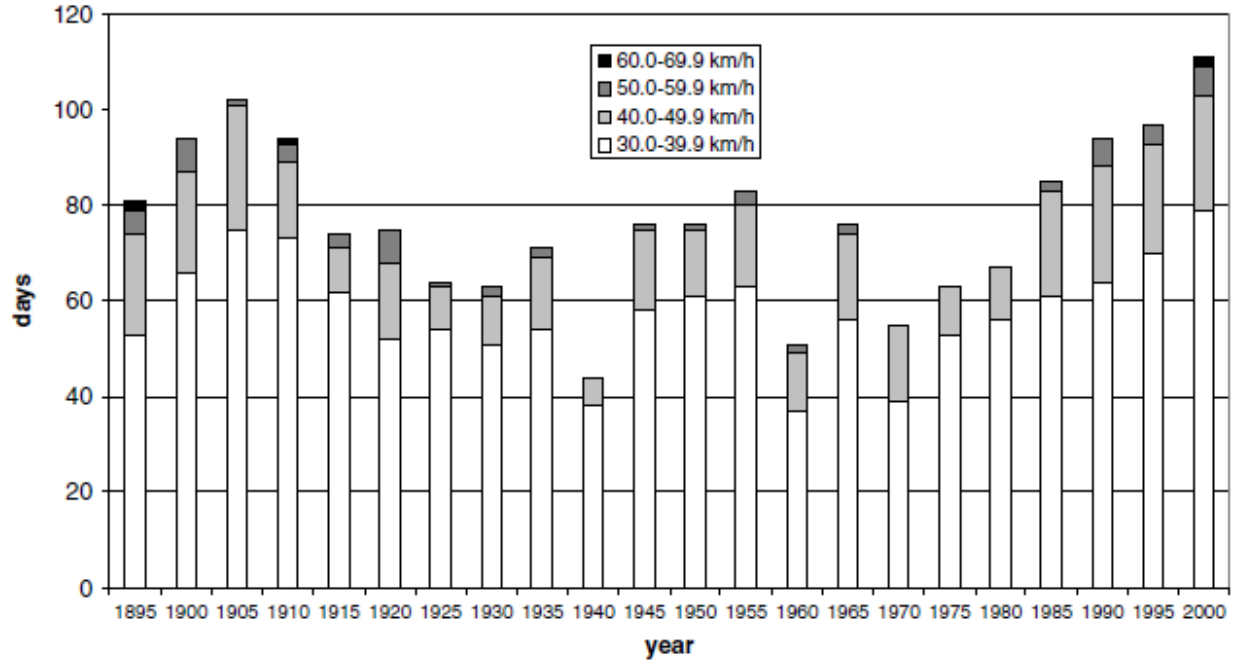


Figure 4.4.2: Number of days with high maximum hourly average wind speed in winter (October-March) from 1895 to 2004 at the Zurich climate station at 5-year intervals.

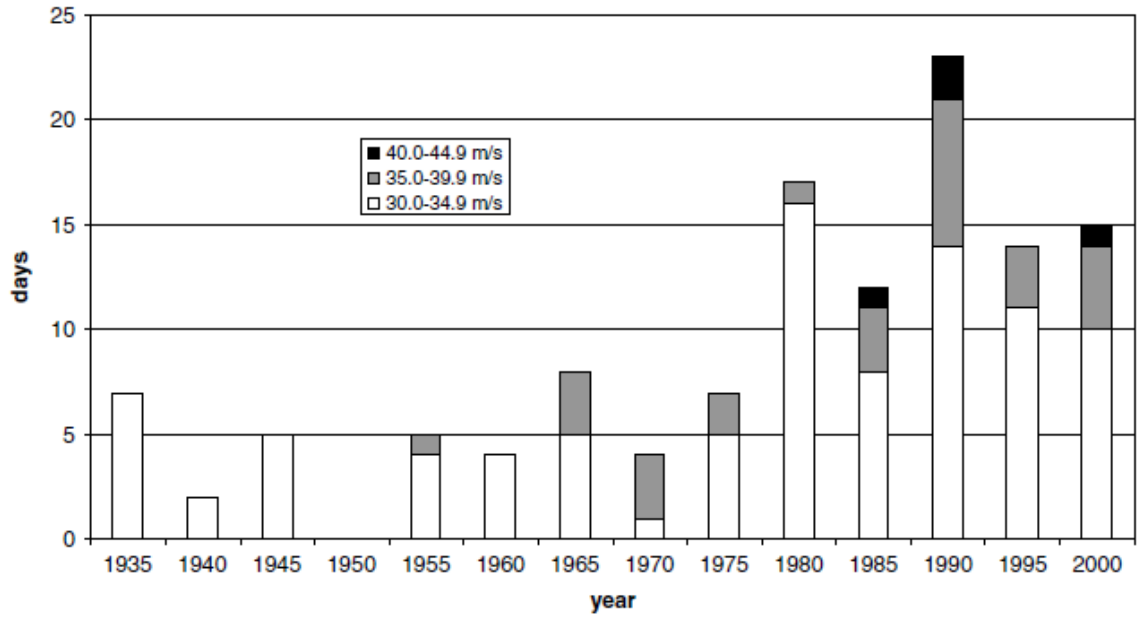


Figure 4.4.3: Number of days with high maximum gust wind speed in winter (October-March) from 1935 to 2004 at the Zurich climate station at 5-year intervals.

4.4.2. Damage normalization

The forest area of Canton Zurich has remained quite constant at about 48,000 ha during the past 115 years. During World War II there was a light decrease of several hundred hectares. All other larger deviations over the past century have been the result of changes in the definition of forest. For our purposes, we assumed a constant total forest area.

The growing stock increased from 9 000 000 m^3 to 23 500 000 m^3 over the whole period from 1891 to 2006. By regressing the data of 1862, 1952, 1969, 1984 and 1994 with a quadratic term (R^2 = 0.9995), the growing stock increased from about 200 m^3/ha in 1890 to an extrapolated 490 m^3/ha in 2006. With respect to maximum events, the normalized forest damage rose from 0.11 % of the growing stock on December 6, 1895 to 5.42 % on December 26, 1999 (Figure 4.4.4). This represents an exponential increase.

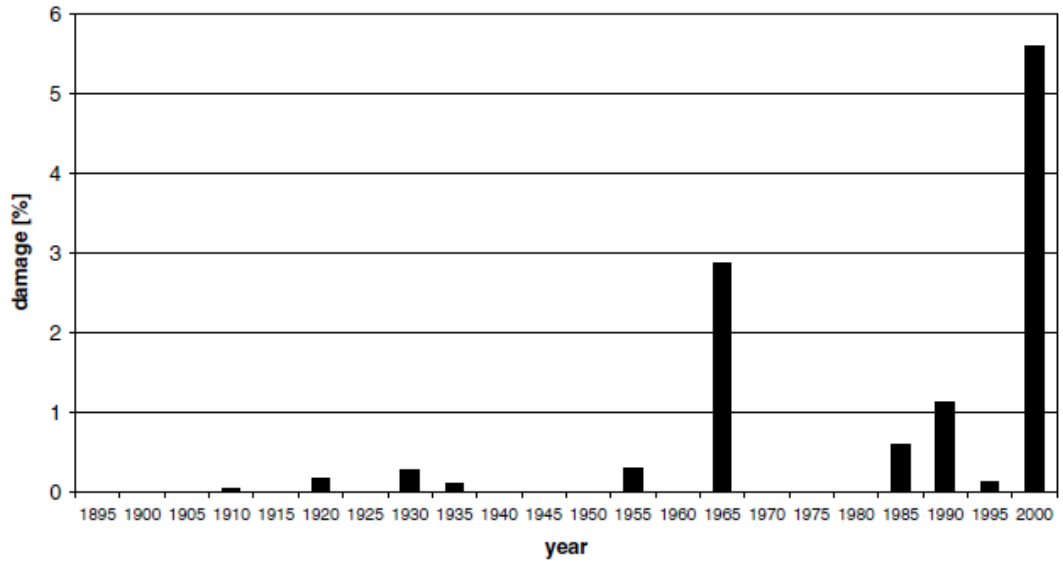


Figure 4.4.4: Winter storm damaged part of the growing stock from 1895 to 2004 in Zurich at 5-year intervals.

4.4.3. Comparison of wind and damage

Correlations of winter storm damage with wind forces in Canton Zurich which depend on the wind and damage variables used. These differ in time and space. Rank correlation coefficients of damage and daily wind run were generally weak. In contrast, correlating records of damage with U_{PGW} clearly pointed to strong gusts influencing damage occurrence. The highest rank correlation coefficients between wind force and damage for stronger events were found in recent years, 1980-2007 (Table 4.4.1).

Correlation matrix Region	1891-2007 canton	1891-2007 station	1891-1931 canton	1891-1931 station	1932-1979 canton	1932-1979 station	1980-2007 canton	1980-2007 station
Average wind force [-d]	-.22 (18)	-.20 (16)	-.17 (8)	.00 (7)	.50 (3)	- (2)	-.04 (7)	-.04 (7)
Average wind force [h/d]	.03 (21)	.11 (18)	-.07 (8)	.09 (7)	-.06 (6)	.40 (4)	.43 (7)	.50 (7)
Max. wind force [-d]	.62 (13)	.67 (11)	- (0)	- (0)	.71 (6)	.80 (4)	.93 (7)	.93 (7)

Table 4.4.1: Rank correlation coefficients between wind force and windstorm damage in Canton Zurich with respect to daily wind distributions in winter (October-March) from 1 January 1891 to 31 March 2007: number of measurements (*n*) in brackets, significant values underlined ($p < 0.05$).

The relationship between wind intensity and damage event days was analysed by means of 0.5-percentiles (Table 4.4.2). It shows that damage event days generally corresponded to the highest quantiles of the wind speed variables, and that they corresponded better to peak gust wind speed measured daily or hourly than to average wind speed. The most severe damage corresponded to the highest quantiles of wind speed variables. Correlations were generally better for damage occurring close to the climate station (station) than for damage that occurred further away (canton). The closer the damage occurrence was to the climate station site, the higher were the interquantile segments of the wind values of the corresponding damage event (Table 4.4.2).

	U_{DRW}						U_{HAW}						U_{PGW}					
Period	1891-1931		1932-1965		1985-2007		1891-1931		1932-1980		1985-2007		1891-1931		1932-1979		1980-2007	
Values	7378		6176		4190		7378		8821		4190		9		158		4990	
Region	incl stn[1]	not stn[2]	incl stn	not stn	incl stn	not stn	incl stn	not stn	incl stn	not stn	incl stn	not stn	incl stn	not stn	incl stn	not stn	incl stn	not stn
200th iq-segment	6	0	2	1	3	0	9	0	6	4	5	0			7	1	8	0
199th iq-segment	1	1	0	0	2	0	1	1	2	0	3	0			1	0	0	0
198th iq-segment	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0					0	0
197th iq-segment	2	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	no exact				0	0
196th iq-segment	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	classification		0	2	0	0
191st-195th iq-segment	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	possible		no exact		0	0
176th-190th iq-segment	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0			classification		0	0
151st-175th iq-segment	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0			possible		0	0
101st150th iq-segment	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0					0	0
1st-100th iq-segment	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0					0	0
1st-200th iq-segment	10	4	4	3	8	0[3]	10	4	8	4	8	0[3]	10	4	8	3	8	0[3]

[1] incl stn: area surrounding of the Zurich climate station affected by windstorm damage

[2] not stn: area surrounding of the Zurich climate station not affected by windstorm damage

[3] no spatially resolved data available

Table 4.4.2: Semi-percentile statistic of the qualitatively and quantitatively recorded windstorm damage events of Zurich with respect to daily wind speed distributions in winter (October-March) from 1 January 1891 to 31 March 2007.

4.5. Discussion

4.5.1. Wind as an explanatory variable

Inland surface wind measurements have rarely been studied, probably because the instrumentation used to record the data, the methodology or the exposure of the instruments are often inconsistent over time (Trenberth *et al.*, 2007). Most of the literature on wind data homogenization is ocean-limited (Isemer and Hasse, 1991, Gebhardt and Hense, 2001, Smits *et al.*, 2005, Thomas *et al.*, 2005, Weisse *et al.*, 2005). Homogenisations of weather variables other than wind are much more frequent, e.g. temperature (e.g. Vincent, 1998, Allen and DeGaetano, 2000, Jones, 2001), precipitation (e.g. , Hanssen-Bauer and Forland, 1994, Klein Tank and Könnnen, 2003, Raible *et al.*, 2006), and air pressure (e.g. Pozo-Vázquez et al., 2000, Slonosky *et al.*, 2000, Auer *et al.*, 2001, Gebhardt and Hense, 2001, Jones, 2001, Luterbacher *et al.*, 2001, Raible *et al.*, 2005). The main reason for this fact is that wind, or more precisely, strong wind is not only difficult to measure but also challenging to handle statistically (Hann, 1869, Köppen, 1874, Schüepp, 1950, Schüepp, 1973). This applies especially to mountainous regions, such as the Alps and areas north of the Alps, where there are macro- and meso-scale effects on wind due to the topography, (Mousson, 1864, DWD, 1996).

The cup anemometers used today (Robinson cup anemometers) have remained nearly unmodified for more than 150 years. In contrast, the design of the recording units, i.e. anemographs, has been greatly developed and varies considerably (Wild, 1866, Krebs, 1879, Hann, 1901, Noetzlin, 1941, Schüepp, 1950, Guyard, 2000). To achieve a higher comparability of measurements, the recording unit should be closely connected to the sensor unit (but see Wild, 1866). In addition, both the transmission units and the service management can influence the precision of the gauge (Schüepp, 1950; Heinrich Bührer 2006, personal commmunication). At the Zurich station, similar cup anemometers have always been used. The gauges have been changed only four times in 135 years, and the anemometer position have been shifted slightly only twice. This long-term measurement consistency makes it possible to homogenize the Zurich wind series regarding strong wind events in accordance with reliable standards and principles (Auer *et al.*, 2001).

In an early publication, Maurer *et al.* (1909) explicitly excluded the data of the wind observations for Zurich until 1891 because of the very inappropriate earlier installation directly behind the observatory tower. Data series for the years 1872 to 1890 were therefore ignored in analyses at the time (Hann,

1901). An adequate installation of a sensor unit, however, outweighs the homogeneity of an inadequately measured data series (Auer *et al.*, 2001).

In several studies of storm damage in Central Europe, wind-related approaches have been applied to study the relationship between wind intensity and the extent of (forest) damage (e.g. König, 1995, Schiesser *et al.*, 1997; Schmidtke and Scherrer, 1997; Quine *et al.*, 1999; Otto, 2000, Hollenstein *et al.*, 2002, Mayer and Schindler, 2002, Hubrig, 2004, Wolf *et al.*, 2004, Mayer *et al.*, 2005). However, it has, until now, been more common to investigate other potential explanatory variables for the extent of damage such as tree age, tree height, slenderness (breast-height - diameter ratio), tree species/species classes, forest structure, number of stand layers, forestry management effects, soil depth, soil type, soil acidity, soil moisture content, slope, and exposition. If wind is included in regression models, it is usually included as simulated data, in contrast to, e.g. forest inventory data (e.g. König, 1995, Mayer *et al.*, 2005).

Mayer *et al.* (2005) analysed 19,000 km^2 of windthrown forests (after the storm Lothar) encompassing forests in France, southern Germany and Switzerland by logistic regression with simulated peak gust wind speed. They found, peak gust wind speed was significant only for forest damage in France ($p < 0.001$). König (1995) reported a good correspondence between simulated and observed wind data from the nearby meteorological stations in a study area covering 160.2 km^2 of damaged forest in southern Germany. In his cumulative logistic regression model, peak gust wind speed was significant ($p < 0.001$).

Other examples of forest storm damage models incorporating wind variables are ForestGALES (Gardiner *et al.*, 2000, Gardiner and Quine, 2000) and HWIND (Peltola *et al.*, 1999a, Peltola *et al.*, 1999b). Windthrow hazard ratings are described in e.g., Ruel *et al.* (1997) and Blennow and Sallnäs (2004). However, wind variables are often not considered in studies where windthrow can have various causes. This holds especially for regions with highly variable topography (Bosshard, 1967, Bazzigher and Schmid, 1969, Hollenstein, 2002, Hollenstein *et al.*, 2002, Braun *et al.*, 2003), and for studies where wind speed cannot be related to storm damage (Mayer and Schindler, 2002). In such cases, soil and topography parameters are usually cited as explanatory variables (König, 1995, Kuhn, 1995, Dobbertin, 2002, Hollenstein, 2002, Braun *et al.*, 2003, Mayer *et al.*, 2005).

4.5.2. Extent of damage as a dependent variable

Our results from wind observations at the Zurich station support findings about the main wind factors that cause forest damage. The occurrence of only moderate damage is related to lower wind speed. If wind speed is lower, other damage-influencing factors become more important (Schmidtke and Scherrer, 1997, Otto, 2000, Hollenstein, 2002, Nieuwenhuis and Fitzpatrick, 2002, Cucchi and Bert, 2003, Erb, 2004). Data related to only slight damage resulted in small correlation coefficients in less marked periods of inter-quantile distributions. These findings suggest that other factors besides wind force play an important role in influencing the damage impact of smaller storms. Such storms also tend to be spatially unevenly distributed. In models for greater extents of damage, variables for site conditions are clearly less significant (Schmidtke and Scherrer, 1997).

With wind variables, strong gusts seem to be (still) considerably more dangerous for forests than high mean wind speed (Woelfle, 1950, Vanomsen, 2006). Our results show that the correlation coefficients for wind and damage are most significant for storms where severe damage occurs. The same holds for the inter-quantile distributions. A close relationship between fine-scaled wind data including gusts and wind damage was also found. However, there is a marked lack of damage data in Switzerland for the second half of the 20th century (Pfister, 1998). This holds also for parts of the country such as Canton Zurich, especially with respect to the years after 1980.

The highest rank correlation coefficients between wind force and damage for stronger events were found in the last period of time observed, 1980-2007. These findings suggest that the impact of small storm events is very local, which means that anemometers, as they are positioned far apart, only rarely document strong gusts due to local storms.

Windthrow damage has not always been recorded precisely, and often only the total windthrow damage from several consecutive events was assessed (e.g. caused by cyclones in a series). Calendar days as time units are therefore inappropriate for comparing days with and without damage. Windstorms with strong gusts (30 m/s and more) often occur during the night, e.g. as in the storm Jürgen from January 17 to 18, 2007, and the consecutive storm Kyrill from January 18 to 19, 2007. It is also impossible to estimate the damage from a cyclone chain separated by single days. In summary, there is still much uncertainty about the correlation between wind and damage. For a better correlation, highly resolved damage data would be needed.

4.5.3. Implication for (future) forest management

New climate model runs project that more storm events in Switzerland in the future (Beniston *et al.*, 2007). The wind speed measurements in Zurich point in the same direction according to the extrapolations from past trends in maximum wind speed during winter storm events. Since our findings show there has been a correlation between strong wind and forest damage in Canton Zurich, we can expect that future storm events will reach catastrophic dimensions when gusts of 45 m/s or more are reached (Schütz, 2005). In the past 74 years, two such events have taken place, Vivian in 1990 and Lothar in 1999, i.e. both within the past eighteen years.

Uncertainty about the reoccurring period for severe storms remains and depends to some extent on the focus. For severe winter storms such as Vivian and Lothar, Pfister (1999) expects a 15-year cycle in the near future. However, the last storm with comparable severity dates back to 1739. Estimates of reoccurring periods vary between 12-year cycles (WSL and BUWAL, 2001) and 600-year cycles for widespread damage in the Swiss Plateau at the level of forest stands (Schütz, 2002). In more detail, a cycle of 120 years was proposed for Norway spruce and 300 years for beech in the Reusstal-Limmattal region of the Swiss Plateau (Schütz, 2005). The current ongoing climate change, however, may shorten these reoccurring periods. If the frequency of catastrophic gusts exceeds current rotation periods, forest management will need to adapt to strong wind by, e.g., shortening rotation periods.

Which solutions are adopted will depend on the local context and needs. In Switzerland, the spatial occurrence of storm damage is unevenly distributed (Usbeck et al., 2010). Little is known about the potential local and regional scale pattern of storm damage. Therefore, further investigations of risk potential should focus on higher spatial resolutions and on the interplay between exact measurements of wind gusts at storm levels, and of various forest dimensions and the extent of damage.

4.6. Conclusions

Only a few long-term inland wind measurement series have been produced so far, basically because they are difficult to create. Many of the wind series lack consistency because the observation site moved during the observation period. Parallel wind series in the same area usually have different characteristics, especially in topographically varied terrain. Homogenizations also often fail because

meta-data on gauge descriptions or detailed station histories are not available. In the Zurich case, the reliable wind measurements and the existence of extensive metadata have allowed a consistent homogenization.

We have learned from the homogenized U_{HAW} that average wind forces sometimes reached the same level during storms 100 years ago as they have during today's most severe storms. Because people's personal experiences date back to a period of little storminess in Central Europe, severe storms today are often described as exceptional extreme events. However, during this same time-span, storm damage to forests has increased relatively more than the growing stock volume. Today's storm events may be gustier and hence affect forest more severely. Extreme wind speed gusts have increased in Zurich since reliable data first became available in the 1930s, with peaks in the 1990s. On the other hand, growing stock has more than doubled during the last 100 years. Forests are more vulnerable to storms simply because they are more voluminous than earlier. Severe storms cannot be prevented, but if forest management, adapts to take into account results of spatially fine risk estimates, it will increase the chances of optimizing yields and generally reducing damage.

4.7. Acknowledgements

This paper would not have been possible without the help of the following people from MeteoSwiss (Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz): Thomas Konzelmann, Stephan Bader, Gregor Stork, Deborah van Geijtenbeek, Gérard Decrouy and Frank Lumpert. The latter discovered the hourly wind-reading compilations from 1936 to 1981 that were previously believed lost (Schiesser *et al.*, 1997). We thank Christian Mätzler, Graziella Troxler and Andreas Verdun from the University of Bern for helping us to finding the original Bern wind series 1864-1978. Johannes Behrendt, Albert Kölbl and Wolfgang Fricke of the Deutscher Wetterdienst (DWD) drew on their experience in Germany in the discussion of the long-term wind time series and measurement equipment. We greatly appreciate the help of the librarians and archivists of the following libraries and archives: WSL, ETH (Bildarchiv, Alte Schriften, Depotbibliothek, Institut für Geschichte und Theorie der Architektur (gta), Grüne Bibliothek), Bauarchiv of the city of Zurich, Handschriftensammlung of the Zentralbibliothek Zürich, Staatsarchiv Zürich, Schweizerische Nationalbibliothek, Schweizerisches Bundesarchiv, Naturforschende Gesellschaft in Zürich (NFGZ) and the Swiss Academy of Sciences (sc|nat).

We thank Silvia Dingwall for English correction and an anonymous reviewer for the constructive comments.

This research was supported by PhD-fellowship no. 113425 from the Hans Böckler Stiftung (HBS; Germany), by the LOTHAR Programme of the Swiss Federal Office of the Environment (FOEN), and by the research programme Forest Dynamics (WSL).

4.8. References

Allen, RJ, DeGaetano, AT. 2000. A Method to Adjust Long-Term Temperature Extreme Series for Nonclimatic Inhomogeneities. Journal of Climate 13: 3680-3695.

Auer, I, Böhm, R, Schöner, W. 2001. Austrian long-term climate 1767-2000. Multiple instrumental climate time series from Central Europs. Östereichische Beiträge zu Meteorologie und Geophysik 25: 1-147.

BAFU. 1908-2006. Schweizer Forststatistik / Wald und Holz. Schweizer Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BAFU): Bern.

Bazzigher, G, Schmid, P. 1969. Sturmschaden und Fäule. Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen 120: 521-535.

Begert, M, Schlegel, T, Kirchhofer, W. 2005. Homogeneous temperature and precipitation series of Switzerland from 1864 to 2000. International Journal of Climatology 25: 65-80.

Bengtsson, L, Hodges, KI, Roeckner, E. 2006. Storm Tracks and Climate Change. Journal of Climate 19: 3518-3543.

Beniston, M, Stephenson, DB, Christensen, OB, Ferro, CAT, Frei, C, Goyette, S, Halsnaes, K, Holt, T, Jylhä, K, Koffi, B, Palutikof, J, Schöll, R, Semmler, T, Woth, K. 2007. Future extreme events in European climate: an exploration of regional climate model projections. Climatic Change. 81: 71-95.

Billwiller, R. 1873. Der Gewittersturm vom 28. Juli 1872 in der nördlichen Schweiz und seine Ursachen. Schweizerische Meteorologische Beobachtungen 9: XIII-XXIV.

Billwiller, R. 1893. Einleitung. Annalen der Schweizerischen Meteorologischen Central-Anstalt 1891 28: V-VI.

Blennow, K, Sallnäs, O. 2004. WINDA - a system of models for assessing the probability of wind damage to forest stands within a landscape. Ecological Modelling 175: 87-99.

Bosshard, W. 1967. Erhebungen über die Schäden der Winterstürme 1967. Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen 118: 806-821.

Brassel, P, Brändli, U-B. 1999. Schweizerisches Landesforstinventar. Ergebnisse der Zweitaufnahme 1993-1995. Verlag Paul Haupt: Bern-Stuttgart-Wien. 442 pp.

Braun, S, Schindler, C, Volz, R, Flückiger, W. 2003. Forest damages by the storm "Lothar" in permanent observation plots in Switzerland: the significance of soil acidification and nitrogen deposition. Water, Air, and Soil Pollution 142: 327-340.

Chang, EKM, Lee, S, Swanson, KL. 2002. Storm Track Dynamics. Journal of Climate 15: 2163-2183.

Coaz, J. 1880. Die Stürme vom 20. Februar, 25. Juni und 5. Dezember 1879 und der durch dieselben in den Waldungen der Schweiz verursachte Schaden. Jenet & Reinert: Bern. 57 pp.

Cucchi, V, Bert, D. 2003. Wind-firmness in Pinus pinaster Ait. stands in Southwest France: influence of stand density, fertilisation and breeding in two experimental stands damaged during the 1999. Annales of Forest Science 60: 209-226.

Della-Marta, PM, Wanner, H. 2006. A Method of Homogenizing the Extremes and Mean of daily Temperature Measurements. Journal of Climate 19: 4179-4197.

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.

Dobbertin, M. 2005. Erfassung der Bestandesdaten und Schäden auf dem repräsentativen 4x4-km Sanasilva-Netz. In: Indermühle, M., Raetz, P., Volz, R. (Ed.) LOTHAR Ursächlichen Zusammenhänge und Risikobewertung. Synthese des Teilprogramms 6. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL): Bern. pp. 39-52.

DWD. 1996. Zur Bodenanalyse A-Format: Kaltfronten nördlich der Alpen. Merkblatt des Deutschen Wetterdienstes Nr. 1/1996: 1-5.

EAFV. 1988. Schweizerisches Landesforstinventar: Ergebnisse der Erstaufnahme 1982-1986. Berichte der Eidgenössischen Anstalt für das Forstliche Versuchswesen (EAFV) 305: 1-375.

EIFJF. 1954. Der stehende Holzvorrat in den öffentlichen Waldungen der Schweiz. Erhebungen 1951 / 52. Eidgenössische Inspektion für Forstwesen, Jagd und Fischerei (EIFJF): Bern. 34 pp.

EOFI. 1878-1994. Etat der schweizerischen Forstbeamten mit wissenschaftlicher Bildung. Eidgenössisches Oberforstinspektorat (EOFI): Bern.

Erb, W (Ed.), 2004. Orkan "Lothar" - Bewältigung der Sturmschäden in den Wäldern Baden-Württembergs. Schriftenreihe der Landesforstverwaltung Baden-Württemberg. Band 83. Selbstverlag der Landesforstverwaltung Baden-Württemberg: Stuttgart. 443 pp.

Gardiner, B, Peltola, H, Kellomaki, S. 2000. Comparison of two models for predicting the critical wind speeds required to damage coniferous trees. Ecological Modelling 129: 1-23. 0304-3800

Gardiner, BA, Quine, CP. 2000. Management of forests to reduce the risk of abiotic damage - a review with particular reference to the effects of strong winds. Forest Ecology and Management 135: 261-277.

Gebhardt, C, Hense, A. 2001. Statistical-dynamical analysis of wind observations using a variational approach. Theoretical and Applied Climatology 68: 137-154.

Gimmi, U, Luterbacher, J, Pfister, C, Wanner, H. 2007. A method to reconstruct long precipitation series using systematic descriptive observations in weather diaries: the example of the precipitation series for Bern, Switzerland (1760-2003). Theoretical and Applied Climatology 81: 185-199.

Guyard, E. 2000. Alte meteorologische Instrumente. MeteoSchweiz: Zürich. 190 pp.

Hann, J. 1869. Untersuchungen über die Winde der nördlichen Hemisphäre und ihre klimatologische Bedeutung. Sitzb. d. k. Akad. D. Wissensch. II. Abth. I.X. Bd.: unnumbered.

Hann, J. 1901. Lehrbuch der Meteorologie. 1 Aufl. Chr. Herm. Tauchnitz: Leipzig. 805 pp.

Hann, J. 1906. Lehrbuch der Meteorologie. 2 Aufl. Chr. Herm. Tauchnitz: Leipzig. 642 pp.

Hann, J, Süring, R. 1926. Lehrbuch der Meteorologie. 4 Aufl.. Chr. Herm. Tauchnitz: Leipzig. 867 pp.

Hann, J, Süring, R. 1951. Lehrbuch der Meteorologie. 5 Aufl. S. Hirzel: Leipzig. 1092 pp.

Hanssen-Bauer, I, Forland, EF. 1994. Homogenizing Long Norwegian Precipitation Series. Journal of Climate 7: 1001-1013.

Hollenstein, K. 2002. Herleitung eines Modells zur Abschätzung der mechanischen Stabilität von Waldbeständen. Ergebnisse des Komponentenprojekts C. Polyprojekt PRIMALP. ETH Zürich: Zürich. 34 pp.

Hollenstein, K, Bieri, O, Stückelberger, J. 2002. Modellierung der Vulnerability von Schadenobjekten gegenüber Naturgefahrenprozessen. 173. BUWAL/Eidgenössische Forstdirektion, Schutzwald und Naturgefahren: Zürich. 115 pp.

Hubrig, M. 2004. Analyse von Tornado- und Downburst-Windschäden an Bäumen. Analysis of Tornado and Downburst Wind Damage to Trees. Forst und Holz 59: 78-84.

Indermühle, M, Raetz, P, Volz, R (Eds.). 2005. LOTHAR Ursächliche Zusammenhänge und Risikoentwicklung. Synthese des Teilprogramms 6. Umwelt-Materialien. Nr. 184. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL): Bern. 145 pp.

Isemer, H-J, Hasse, L. 1991. The Scientific Beaufort Equivalent Scale: Effects on Wind Statistics and Climatological Air-Sea Flux Estimates in the North Atlantic Ocean. Journal of Climate 4: 819-836.

Jones, PD. 2001. Early European instrumental records. In: Jones, P.D., Ogilvie, E.J., Davies, T.D., Briffa, K.R. (Hrsg.). History and Climate. Memories of the Future? Kluwer Academic / Plenum Publishers: New York, Boston, Dortrecht, London, Moscow. pp. 55-77.

Klein Tank, AMG, Könnnen, GP. 2003. Trends in Indices of Daily Temperature and Precipitation Extremes in Europe, 1946-99. Journal of Climate 16: 3665-3680.

König, A. 1995. Sturmgefährdung von Beständen im Altersklassenwald: ein Erklärungs- und Prognosemodell. J. D. Sauerländer´s Verlag: Frankfurt am Main. 194 pp.

Köppen, W. 1874. Über die Abhängigkeit des klimatischen Charakters der Winde von ihrem Usrprunge. Repertorium für Meteorologie 4: 1-50.

Krebs, G. 1879. Wetterkarten & Wetterprognose. Verlag von Wilhelm Rommel: Frankfurt a. M. 16 pp.

Kuhn, N. 1995. Die standörtliche Abhängigkeit der Vivian-Windwürfe. Informationsblatt des Forschungsberiches Landschaftsökologie Nr. 28: 1-3.

Landolt, E. 1862. Bericht an den hohen Schweizerischen Bundesrath über die Untersuchungen der Schweiz. Hochgebirgswaldungen, vorgenommen in den Jahren 1858, 1859 und 1860. J. A. Weingart: Bern. 367 pp.

Luterbacher, J, Rickli, R, Xoplaki, E, Tinguely, C, Beck, C, Pfister, C, Wanner, H. 2001. The late Mauder Minimum (1675-1715) - a key period for studying decadal scale climatic change in Europe. Climatic Change 49: 441-462.

Maurer, J, Billwiller jr., R, Hess, C. 1909. Das Klima der Schweiz. Auf Grundlage der 37jährigen Beobachtungsperiode 1864-1900. Huber & Co.: Frauenfeld. 302 pp.

Mayer, H, Schindler, D. 2002. Forstmeteorologische Grundlagen zur Auslösung von Sturmschäden im Wald in Zusammenhang mit dem Orkan "Lothar". Allgemeine Forst- und Jagdzeitung 173: 200-208.

Mayer, P, Brang, P, Dobbertin, M, Hallenbarter, D, Rennaud, J-P, Walthert, L, Zimmermann, S. 2005. Forest storm damage is more frequent on acidic soils. Annales of Forest Science 62: 303-311.

Meier, F, Engesser, R, Forster, B, Odermatt, B. 2006. Forstschutz-Überblick 2005. Eidgenössische Forschungsanstalt WSL: Birmensdorf. 24 pp.

Mousson, A. 1864. Bericht über die Organisation meteorologischer Beobachtungen in der Schweiz. Zürich. 69 pp.

Nieuwenhuis, M, Fitzpatrick, PJ. 2002. An assessment of stem breakage and the reduction in timber volume and value recovery resulting from a catastrophic storm: an Irish case study. Forestry 75: 513-523.

Noetzlin, U. 1941. Beiträge zur Frage der Windmessung am Boden unter besonderer Berücksichtigung der Böenmessung. Wissenschaftliche Abhandlungen des Deutschen Reichsamtes für Wetterdienst (Luftwaffe) 8: 1-78.

Ott, E. 1972. Erhebungen über den gegenwärtigen Zustand des Schweizer Waldes als Grundlage waldbaulicher Zielsetzungen. Teil A. In: Bosshard, W. (Ed.) Mitteilungen. Schweizerische Anstalt für das forstliche Versuchswesen. pp. 1-193.

Otto, H-J. 2000. Waldbauliche Erfahrungen nach Sturmkatastrophen - eine Rückschau in Niedersachsen (Silvicultural Experience after Wind-Throw Catastrophs - a Retrospect View in Lower Saxony). Forst und Holz 55: 371-376.

Peltola, H, Kellomaki, S, Vaisanen, H. 1999a. Model computations of the impact of climatic change on the windthrow risk of. Climatic Change 41: 17-36.

Peltola, H, Kellomaki, S, Väisänen, H, Ikonen, V-P. 1999b. A mechanistic model for assessing the risk of wind and snow damage to single trees and stands of Scots pine, Norway spruce, and birch. Canadian Journal of Forest Research 29: 647 - 661.

Pfister, C. 1998. Raum-zeitliche Rekonstruktion von Witterungsanomalien und Naturkatastrophen 1496-1995. Zürich. 140 pp.

Pfister, C. 1999. Wetternachhersage - 500 Jahre Klimavariationen und Naturkatastrophen (1496-1995). Verlag Paul Haupt: Bern - Stuttgart - Wien. 304 pp.

Pozo-Vázquez, D, Esteban-Parra, MJ, Rodrigo, FS, Castro-Díez, Y. 2000. An analysis of the variability of the North Atlantic Oscillation in the time and and the frequency domains. International Journal of Climatology 20: 1675-1692.

Quine, CP, Humphery, JW, Ferris, R. 1999. Should the wind disturbance patterns observed in natural forests be mimicked in planted forests in the British uplands? Forestry 72: 337-358.

Raible, CC, Stocker, TF, Yoshimori, M, Renold, M, Beyerle, U, Casty, C, Luterbacher, J. 2005. Northern Hemispheric Trends of Pressure Indices and Atmospheric Circulation Patterns in Observations, Reconstructions, and Coupled GCM Simulations. Journal of Climate 18: 3968-3982.

Raible, CC, Casty, C, Luterbacher, J, Pauling, A, Esper, J, Frank, DC, Büntgen, U, Roesch, AC, Tschuck, P, Wild, M, Vidale, P-L, Schär, C, Wanner, H. 2006. Climate variability - observations, reconstructions, and model simulations for the Atlantic-European and Alpine region from 1500-2100 AD. Climatic Change 79: 9-29.

Rottmann, M. 1986. Wind- und Sturmschäden im Wald: Beiträge zur Beurteilung der Bruchgefährdung, zur Schadensvorbeugung und zur Behandlung sturmgeschädigter Nadelholzbestände. J. D. Sauerländer´s Verlag: Frankfurt am Main. 128 pp.

Ruel, JC, Pin, D, Spacek, L, Cooper, K, Benoit, R. 1997. The estimation of wind exposure for windthrow hazard rating: comparison between Strongblow, MC2, Topex and a wind tunnel. Forestry 70: 253-266.

Schelhaas, MJ, Nabuurs, GJ, Sonntag, M, Pussinen, A. 2002. Adding disturbances to a large-scale forest scenario model and a case study for Switzerland. Forest Ecology and Management 167: 13-26.

Schiesser, H-H, Pfister, C, Bader, J. 1997. Winter Storms in Switzerland North of the Alps 1864/1865-1993/1994. Theoretical and Applied Climatology 58: 1-9.

Schmidtke, H, Scherrer, H-U. 1997. Sturmschäden im Wald: [Projektschlussbericht im Rahmen des nationalen Forschungsprogrammes "Klimaänderungen und Naturkatastrophen in der Schweiz", NFP 31]. vdf, Hochschulverlag AG an der ETH Zürich: Zürich. 38 pp.

Schüepp, M. 1950. Wolken / Wind und Wetter. Forschung und Leben. Büchergilde Gutenberg: Zürich. 263 pp.

Schüepp, M. 1973. Klimatologie der Schweiz, Wind. Supplement to Annales of the Swiss Meteorological Institute 107. 60 pp.

Schütz, J-P. 2002. Polyvalenter Waldbau. Skript zu Vorlesung Waldbau IV. Professur Waldbau, ETH-Zentrum: Zürich. 143 pp.

Schütz, J-P. 2005. Einfluss verschiedener Faktoren auf Art und Ausmass der Sturmschäden. In: Indermühle, M., Raetz, P., Volz, R. (Ed.) LOTHAR Ursächlichen Zusammenhänge und Risikobewertung. Synthese des Teilprogramms 6. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft: Bern. pp. 29-38.

Schütz, J-P, Götz, M, Schmid, W, Mandallaz, D. 2006. Vulnerability of spruce (Picea abies) and beech (Fagus sylvatica) forest stands to storms and consequences for silviculture. European Journal of Forest Research 125: 291-302.

FSO. 1891-2007. Statistisches Jahrbuch der Schweiz. Swiss Federal Statistical Office (SFSO): Neuchâtel.

Slonosky, VC, Dones, PD, Davies, TD. 2000. Variability of the surface atmospheric circulation over Europe, 1774-1995. International Journal of Climatology 20: 1875-1897.

SMA (Ed.), 1865-1892. Annalen der Schweizerischen Meteorologischen Central-Anstalt (former title, 1865-1881: Schweizerische Meteorologische Beobachtungen). 1-27. S. Höhr: Zürich.

SMA (Ed.), 1893-1934. Annalen der Schweizerischen Meteorologischen Central-Anstalt. 28-70. Beer: Zürich.

SMA (Ed.), 1934-1938. Annalen der Schweizerischen Meteorologischen Zentral-Anstalt. 70-74. Beer: Zürich.

Smits, A, Klein Tank, AMG, Könnnen, P. 2005. Trends in storminess over the Netherlands, 1962-2002. International Journal of Climatology 25: 1331-1344.

Thomas, BR, Kent, EC, Swail, VR. 2005. Methods to homogenize wind speeds from ships and buoys. International Journal of Climatology 25: 979-995.

Trenberth, KE, Jones, PD, Ambenje, P, Bojariu, R, Easterling, D, Klein Tank, A, Parker, D, Rahimzadeh, F, Renwick, JA, Rusticucci, M, Soden, B, Zhai, P. 2007. Observations: Surface and Atmospheric Climate Change. In: Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, m., Miller, H.L. (Eds.). Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press: Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 1004 pp.

Usbeck, T, Wohlgemuth, T, Dobbertin, M, Pfister, C, Bürgi, A, Rebetez, M. 2010. Increasing storm damage to forests in Switzerland from 1858-2007. Agricultural and Forest Meteorology 150: 47-55.

Uttinger, H. 1968. Die Zahl der Tage mit Windspitzen von mindestens 20 Metern pro Sekunde in Zürich (1934-1967). Veröffentlichungen der Schweizerischen Meteorologischen Zentralanstalt. City-Druck AG: Zürich. 22 pp.

Uttinger, H, Schüepp, M. 1951. Zur Reduktion klimatischer Mittelwerte von Zürich auf die neue Beobachtungsstation Krähbühlstrasse der Schweizerischen Meteorologischen Zentralanstalt. Annalen der Schweizerischen Meteorologischen Zentralanstalt 1950 87: 1-5.

Vanomsen, P. 2006. Der Einfluss der Durchforstung auf die Verankerung der Fichte hinsichtlich ihrer Sturmresistenz. Diss. ETH. Eidgenössische Technische Hochschule Zürich: Zürich. 247 pp.

Vincent, LA. 1998. A Technique for the Identification of Inhomogenities in Canadian Temperature Series. Journal of Climate 11: 1094-1104.

Weber. 1867. Auszug aus der Forst-Statistik des Kantons Bern. Buchdruckerei von J. Allemann: Bern. 56 pp.

Weisse, R, von Storch, H, Feser, F. 2005. Northeast Atlantic and North Sea Storminess as Simulated by a Regional Climate Model during 1958-2001 and Comparison with Observations. Journal of Climate 18: 465-479.

Wild, H. 1866. Die selbstregistrirenden meteorologischen Instrumente der Sternwarte in Bern. Carl's Repertorium II: 1-41.

Woelfle, M. 1950. Waldbau und Forstmeteorologie. 2. edn. Bayerischer Landwirtschaftsverlag G. m. b. H.: München. 68 pp.

Wolf, A, Moller, PF, Bradshaw, RHW, Bigler, J. 2004. Storm damage and long-term mortality in a semi-natural, temperate deciduous forest. Forest Ecology and Management 188: 197-210.

WSL, BUWAL (Eds.). 2001. Lothar. Der Orkan 1999. Ereignisanalyse. Eidg. Forschungsanstalt WSL, Bundesamt für Wald, Schnee und Landschaft BUWAL: Birmensdorf, Bern. 365 pp.

5. Artikel 3: Relating remotely sensed forest damage data to wind data: storms Lothar (1999) and Vivian (1990) in Switzerland

Relating remotely sensed forest damage data to wind data: storms Lothar (1999) and Vivian (1990) in Switzerland

Tilo Usbeck[1], Peter Waldner[1], Matthias Dobbertin[1], Christian Ginzler[1], Christian Hoffmann[1], Flurin Sutter[1], Charlotte Steinmeier[1], Richard Volz[2], Gustav Schneiter[1], Martine Rebetez[3]

[1] WSL Swiss Federal Research Institute, Birmensdorf, Switzerland

[2] Federal Office for the Environment (FOEN), Bern, Switzerland

[3] WSL Swiss Federal Research Institute, Lausanne, Switzerland

Theoretical and Applied Climatology 108, 3-4: 451-462

5.1. Abstract

This study compares the surface wind speed and forest damage data of two exceptionally severe winter storms, Vivian 1990 and Lothar 1999. The study area comprises the region that suffered damage in Switzerland. The wind speed data were derived from simulations of MeteoSwiss (Federal Office of Meteorology and Climatology), measurements during the storm periods and expert analyses of the data. The remotely sensed forest damage data were provided by the Federal Office for the Environment and the forest cover data by Swiss Federal Statistical Office. We compared data on the peak gust and maximum average wind speed, with data on the spatially related forest area and forest damage area, and found some clear differences in the correlations between the different wind data and forest damage. Our results point generally to the damage-causing role of near-surface gusts at maximum wind speeds during the storm. These tended to be spatially distributed on a fine scale. In only a few cases were the results statistically significant. However, these results could probably be improved with better

wind data. For example, gust measurements spatially closer to forests or simulations of gusts at maximum wind speed could be produced with a spatially higher resolution.

5.2. Introduction

Storms are the disturbance factor that cause by far the most severe damage to forests in Switzerland (Schelhaas et al. 2002) and in Europe (Schelhaas et al. 2003). Severe winter storms are rare events, e.g. Lamb (1991) and tend to be triggered by different meteorological situations, but they have nevertheless caused most storm damage in Swiss forests. Rockel and Woth (2007) analysed the uncertainty of the effect of enhanced greenhouse gas conditions on the windiness projected by an ensemble of regional model simulations and estimated an increase of up to 20% in the number of peak gusts ≥8 Bft over Central Europe for 2071-2100. Leckebusch et al.(2008) predicted an increased frequency of Central European storm clusters, with an enhancement of the pressure gradient over Central Europe under "green-house" global warming conditions. Nilsson et al. (2007) related forest damage to the wind field in a high-resolution regional climate model simulation in the relatively gentle topography of Scania in southern Sweden, and found most damage occurred in areas affected by maximum wind speeds greater than 30 m s^{-1}. Blennow and Olofsson (2008) estimated the changing probability of exceeding the critical wind speed for significant wind damage in southern Sweden, and found an increasing probability of damaging wind in many places.

However, wind as a meteorological element is very difficult to monitor (Hann 1869; Maurer et al. 1909; Schüepp 1950; Schiesser et al. 1997; Trenberth et al. 2007). Only a few studies on forest storm damage have included wind speed data in their analyses of regional differences in damage. As observed wind data is largely lacking, most Swiss studies base wind regimes on general assumptions such as spatially homogeneous random distribution and try to relate spatial damage patterns to a broad variety of forest and site conditions. For example, Hollenstein (2002) was able to correlate multivariately forest inventory data and storm damage data but failed to improve the results of earlier investigations, possibly because, as he suggests, not all the relevant variables had been considered. Gardiner et al. (2008) reviewed mechanical models of wind damage risk and found the most widely adopted models were designed to calculate the risk at the stand level within uniform forests. Predicting the critical wind speed is said to become increasingly difficult the hillier or at least the more complex the terrain.

König (1995) proved that stand height influenced storm damage most and found a good correlation between simulated wind speed data from the numeric simulation model FITNAH (Gross 1991) and observed wind speed data as well as between severe storm damage and the simulated highest wind speeds. Schütz et al. (2006) used data from 332 randomly chosen pure and regular stands of spruce and beech in the Swiss Midlands and Doppler radar measured wind speed. He found that the susceptibility for spruce was three times higher than for beech during the winter storm Lothar, with aspect being a significant factor but wind speed not. Hanewinkel et al. (2008) investigated a 77-year time series (1925 to 2001) of natural disturbances in southwestern Germany using logistic regressions combined with autoregressive techniques and found storm damage more likely in previously damaged stands. Schindler et al. (2009) used wind data from a mesoscale airflow model for southwestern Germany for the 1999 winter storm Lothar and found the highest wind damage probability "for coniferous forest growing on acidic, fresh to moist soils on bunter sandstone formations - provided that 'Lothar' maximum gust wind speed exceeded 35 m s^{-1} in the areas in question". Schmidt et al. (2010) modelled single tree storm damage using inventories from the 1999 winter storm Lothar in southwestern Germany, solving the problem of missing observed wind data by applying a generalized additive model, and found tree height to be a prominent factor influencing the level of damage.

A number of forest site and stand conditions are often mentioned as important influences on wind damage (Kuhn 1995; Quine and Bell 1998; Ray and Nicoll 1998; Dobbertin 2002, 2005; Mayer et al. 2005; Schütz et al. 2006; Vanomsen 2006). These include root anchorage, which is thought both to have decreased during the past decades perhaps due to soil acidification, e.g. Braun et al. (2003), and to be a major cause of the increase in storm damage. However, such site factors might correlate with wind regimes to some extent due to regional similarities in geology and orography. Studies that do not include regional differences in the wind regimes when analysing storm damage patterns thus need careful interpretation. Braun et al. (2003) analysed soil data from permanent observation plots and forest damage data from the 1999 storm Lothar. They found more beech (*Fagus sylvatica*) than Norway spruce (*Picea abies*) had been damaged. The damage correlated negatively with the actual soil base saturation for beech and Norway spruce, negatively with coarse soil pore volume, and positively with nitrogen concentration in beech leaves. It did not correlate significantly with seasonal ozone, crown transparency, stem diameter, crown size, slenderness, social position, and position within the stand. Unlike Braun et al. (2003), Nicoll et al. (2006) found no decrease in root anchorage in their investigation of a database of almost 2,000 trees which had been mechanically overturned between 1960 and 2000 in the UK. Instead, they suggest root anchorage is significantly influenced by a variety of parameters including soil groups

and root depth classes. Therefore, we cannot assume that root anchorage markedly decreased between 1990 and 1999 in Switzerland. Another factor that is thought to make severe storm damage more likely is unfrozen and water-saturated soil, but this soil condition is rather typical during cyclonal weather, which tends to precede winter storms (Usbeck et al. 2010a). Other factors known to influence storm damage, such as the proportion of conifers, stand structure, or management system, did not change substantially in the time between the winter storms Vivian and Lothar, see EAFV (1988), and Brassel and Brändli (1999). Marked regional variations in peak gust wind speeds, e.g. differences between inner alpine valleys and the central plain, occurred during both storms. The critical wind speed of 30 m s^{-1} was greatly exceeded in some regions, but much less in others. Given these large regional differences in the wind regimes, the influence of site and forest conditions on tree failure found in overturn experiments (Nicoll et al. 2005, 2006, 2008) seems to be of minor importance.

The amount of forest damage caused by the heaviest storms has increased in Switzerland over the past 150 years (Usbeck et al. 2010a). While the largest amount of damage that occurred between 1858 and 1907 (on 02 Feb. 1879) was 571,000 m^3, the heaviest storm between 1958 and 2007 (on 26 Dec. 1999) damaged 14.0 million m^3 of timber. The frequency of severe damage due to winter storms has also risen in the last five decades (Usbeck et al. 2010a). These larger amounts of damaged timber might partly be attributed to the fact that the volume of standing timber has increased. However, it may also be more related to extreme wind speeds. Measurement data from Zurich (on the Swiss Plateau), which have been recorded in one of the longest time series of wind observations in Switzerland, show that the number of peak gusts over 24 h and maximum hourly wind speed means have both risen in the past five decades (Usbeck et al. 2010b).

Long-term observations have revealed large regional variations in the amount and intensity of forest damage. The damage caused by the strongest winter storms is not homogeneously distributed either across the country or even in those specific regions where the damage was particularly severe (Usbeck et al. 2010a). One possible reason is that wind fields are strongly influenced by complex terrain (Ruel et al. 1998; Quine et al. 1999). Wind speed and direction tend to vary widely between regions in Switzerland (Steinhauser 1951). In the case of significant upstream orographic barriers such as the Jura mountains, regions located in the downstream area may be affected more by winds since the air flow tends to be more turbulent than in areas without a barrier. With prevailing west wind storms, these mountains may have such a barrier effect and amplify the peak gusts in the downstream regions on the Swiss Plateau. The main wind factor determining forest damage in Canton Zurich appears to be gusts and not average

wind speed (Usbeck et al. 2010b). Thus, higher turbulence is expected to lead to systematically increased damage in downstream regions.

Until now, however, the influence of wind speed on windthrow in Switzerland has never been studied on large scales (areas >10^4 km^2) using high-resolution damage inventories. This study investigated the spatial correlation between the available wind data for Switzerland and the inventories of the forest damage that occurred in different regions during the storms Vivian in 1990 and Lothar in 1999.

In Switzerland the winter storm Vivian resulted in 5.1 million m^3 damaged growing stock and Lothar in 14.0 million m^3. Both were caused by depressions developing and moving west to east over the Atlantic. The cold front associated with Vivian moved from north to south, crossing the Alps, but the cold front associated with Lothar moved from west to east north of the Alps and did not cross the Alps. These different paths resulted in rather different forest damage patterns, with Vivian causing damage mainly in the pre-Alps and inner Alps, and Lothar mainly in the Swiss Plateau and the pre-Alps. Generally higher maximum wind speeds per event were measured during Vivian in the inner Alps, with peak gusts and maxima of 10 min average wind speed, whereas during Lothar these maxima occurred on the Swiss Plateau (WSL and BUWAL 2001).

In this study, the focus was therefore mainly on different wind factors and their spatial correlation with the damaged areas of the Swiss forest. Since the forest and site conditions did not differ very much between the two storms, their influence was not included. Therefore, wind factors alone were taken as the independent variables and the amount of damage caused as the dependent variable. The following questions were addressed:

- How did different wind speed parameters such as peak gust wind speed, maxima of 10-min average wind speed or the maxima of the hourly average wind speed spatially correlate with the observed forest damage?
- How did wind speed and wind pressure correlate spatially with storm damage in forests situated in hilly and in mountainous regions?
- How did wind data such as simulated wind data (A), wind measurement data from climate stations (B), and expert analysed wind data (C) correlate spatially with observed forest damage?

5.3. Materials and methods

The study area was the whole of Switzerland. After Vivian and Lothar, damage inventories were conducted based on interpretations of aerial photos. Only damage areas included in these inventories were considered. The following graphical information system (GIS) layers were used to define the inventoried areas:

- Storm damage data: flight lines of the Vivian and Lothar inventories (flight service of the Federal Office of Topography swisstopo, CH-8600 Dübendorf);
- Forest area data (forested: yes/no): forest mixture map WMG25 (Copyright © Bundesamt für Statistik, GEOSTAT, CH-2010 Neuchâtel);
- Additional data: Swiss border outlines (Federal Statistical Office (FSO), CH-3003 Bern), Swiss cantonal borders, and Digital Elevation Model DHM25 (© 1994 swisstopo, of the Federal Office of Topography swisstopo, CH-3084 Wabern).

All storm damage data were derived from GIS shape files provided by the Federal Office for the Environment FOEN. In the Lothar inventory, damage areas were classified as scattered damage areas (remaining canopy cover > 0.2-≥ 0.6) or total damage areas (remaining canopy cover ≤0.2) for forests at least 1 ha in size, whereas in the Vivian inventory only total damage areas (remaining canopy cover ≤0.2) for forests at least 0.2 ha in size were recorded.

Both modelled as well as observed wind data were included. Maximum values per event were selected. The variables used are explained in Table 5.3.1.

Variable	Symbol	Unit
Peak gust-wind speed	u_g	$m\ s^{-1}$
Maximum of the 10 min average wind speed	u_{10}	$m\ s^{-1}$
Maximum of the hourly average wind speed	u_{60}	$m\ s^{-1}$

Table 5.3.1: Wind speed variables used in this study

The following data were used:

- Simulation data from a 14 km x 14 km grid generated by a numerical, high resolution, hydrostatical weather forecast model run of the official Swiss meteorological service MeteoSwiss.
- Measurement data from the meteorological networks of the MeteoSwiss
- Estimation data:
  MeteoSwiss estimation: four gust wind speed isotach maps showing the time steps of the storm front. These are hand-drawn maps showing the maximum values of wind speed recordings of the Swiss climate station networks ANETZ and ENET, published in the book "Lothar. Der Orkan 1999. Ereignisanalyse" (WSL and BUWAL 2001).
  WSL estimation: storm maxima of gust wind speeds in a two-cluster isotach map based on hand-drawn maps (WSL and BUWAL 2001), ANETZ and ENET gust wind speed data, a digital elevation model, a digital inclination model and a digital exposition model.

The general approach is shown schematically in Table 5.3.2, which includes the list of abbreviations:

1	2	3	4	5	6
V	M	a	p_g, p_{60}	c, w, o	B-E
L	M	a	p_g, p_{10}, p_{60}	c, w, o	B-E
L	M	e	p_g, p_{10}, p_{60}	c, w, o	B-E
L	S	r	p_g	c, w, o	(A-)B-E
L	X_1	r	p_g	c	E
L	X_2	r	p_g	c	E

Legend

1 Storm

V Vivian

L Lothar

2 Wind data: Method

M Measurement

S Simulation

X_1 Expertise, MeteoSwiss estimation

X_2 Expertise, WSL estimation

3 Sites / spatial resolution / measurement network

a ANETZ

e ANETZ and ENET

r Grid

4 Wind pressure variables

p_g Peak gust-wind pressure [N m^{-2}]

p_{10} Maximum of the 10 min average wind pressure [N m^{-2}]

p_{60} Maximum of the hourly average wind pressure [N m^{-2}]

5 Forest damage data: buffer

c Circular

w Rectangular, longitudinal

o Rectangular, perpendicular

6	**Forest damage data: buffer areas**
A	Buffer area (equivalent to a) circle 0.5 km in radius
B	Buffer area (equivalent to a) circle 1.0 km in radius
C	Buffer area (equivalent to a) circle 2.0 km in radius
D	Buffer area (equivalent to a) circle 3.0 km in radius
E	Buffer area (equivalent to a) circle 5.0 km in radius

Table 5.3.2: Investigation plan illustrating the scheduled approaches

First, the forest GIS layer was intersected by the damage inventory perimeter and dissolved by the damage inventory layers (Figure 5.3.1a). Second, the following buffers were constructed: circular buffers (c; Figures 5.3.1b and 5.3.1c) 1, 2, 3 and 5 km in radius and rectangular buffers (w and o) centrically around the points of interest (Figures 5.3.1d and e). The rectangular buffers comprise a longitudinal/latitudinal proportion of 5:1 and cover areas similar to circles of 0.5, 1, 2, 3 and 5 km in radius. Two different orientations of the rectangular buffers were tested: longitudinal (w; Figure 5.3.1d) and perpendicular (o; Figure 5.3.1e), arranged according to the average wind direction at the time of the maximum value of the wind speed variable considered. Third, the forest GIS layer and the damage inventory GIS layer were intersected by the buffer GIS layer. The fractions of the damaged forest area were then computed for all buffer areas. Wind pressure was calculated as:

$$p_{wind} = c_w \, 0.5 \, \rho v^2 \qquad (1)$$

where p_{wind} = wind pressure, c_w = air drag coefficient, ρ = air density, and v = wind speed. Regressions between the wind pressure and the damage fractions of the forest area were then used to compute the coefficients of determination R^2 for each buffer type (I and II), depending on the buffer area size. The software R2 (Steiger and Fouladi, 1992) was applied to the angular-transformed coefficients of determination to check the significance level.

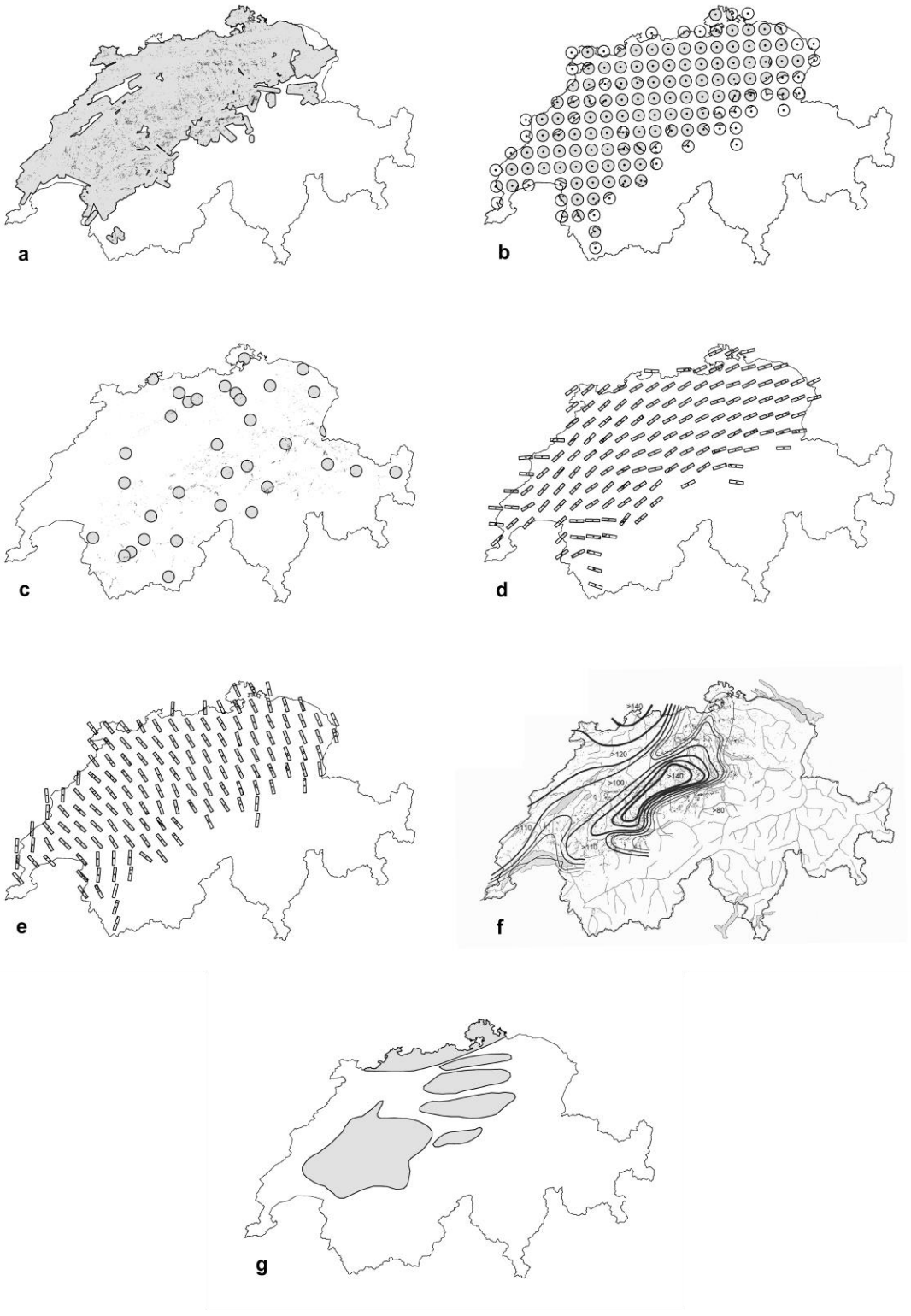


Figure 5.3.1: Spatial distributions of the samples and estimations: **a** inventoried forest damage from the Lothar storm in Switzerland (*black areas*) in the inventory area (*grey*); **b** simulation of

the Lothar storm in Switzerland, *grid points* buffers 5 km in radius around the grid points (*grey* regions of interest); **c** inventoried forest damage from the Vivian storm in Switzerland (*black areas*) from the buffers 5 km in radius (*grey* buffer area) around the ANETZ meteorological stations; **d** simulation of the Lothar storm in Switzerland: *grid points* circle 3 km in radius, equivalent in area to the rectangular buffers around the grid points, longitudinal to the wind direction (*grey* regions of interest); **e** simulation of the Lothar storm in Switzerland: *grid points* circle 3 km in radius, equivalent in area to the rectangular buffers around the grid points, perpendicular to the wind direction (*grey* regions of interest); **f** expert estimates related to the Lothar storm in Switzerland (MeteoSwiss estimation): Swiss stream network (*thin black lines and grey areas*), inventoried forest damage (*black areas*), isotaches (*black lines*, thickness according to estimated maximum gust wind speed [km h^{-1}]; numbers, estimated interisotach average of the maximum gust-wind speed for a certain time step; isotachs: WSL and BUWAL, 2001), **g** expert estimates related to the Lothar storm in Switzerland (WSLestimation): areas with estimated maximum gust-wind speeds greater than 125 km h^{-1} (*grey areas*)

5.4. Specific methods

5.4.1. Measurements (M)

Vivian: The primary Swiss meteorological network ANETZ in forest zone altitudes (36 stations considered) and the full sets of buffers were used and the general method applied.

Lothar: The primary Swiss meteorological network ANETZ in forest zone altitudes (34 stations considered) and the full sets of buffers were used and the general method applied.

Lothar: The primary Swiss meteorological network ANETZ (34 stations considered) and the secondary Swiss meteorological network ENET (34 stations considered) in forest zone altitudes and the full set of buffers were used in combination and the general method applied.

5.4.2. Simulation (S)

The simulation grid and the full sets of buffers were used and the general method applied. Additionally, to separately compare the impact on the Swiss lowlands and on areas up to medium altitudes, the general method was applied to data subsets limited to the simulation points first up to 800 m above sea level (asl) and then 1,400 m asl.

5.4.3. Expert estimates (X)

MeteoSwiss estimation First, a peak gust map was drawn dissolving the four gust wind speed isotach maps adopted from WSL and BUWAL (2001). See example shown in Figure 5.3.1f. The simulation grid and the buffers c, size E, were then used and the general method applied.

To compare the observed wind data and the estimated data spatially, the peak gust map (Figure 5.3.1g) and the map of the meteorological stations were dissolved and the means of the maxima of the observations per interisotach were computed. The significance of differences between the mean values was tested by applying the Kruskal-Wallis rank sum test (*H* test) and the Wilcoxon, Mann and Whitney test (*U* test) between all clusters separately.

WSL estimation: First, a map was drawn summarizing the peak gust wind speed based on meteorological measurements and descriptions. The simulation grid and the buffers c, size E, were then used and the general method applied.

To compare the observed wind data and the estimation data spatially, the peak gust wind speed map and the map of the meteorological stations were dissolved and the means of the maxima of the observations per interisotach area computed. The significance of the differences between the mean values was tested by applying the Wilcoxon, Mann and Whitney test (*U* test) between the clusters.

5.5. Results

The variable that correlated best with the damage area fraction was peak gust wind pressure (p_g). The coefficient of determination for gust wind speeds and the damage area fraction of the forest area generally increased from the larger to the smaller buffers and was best for the circular buffers of the storm Vivian (Table 5.5.1). Generally, the number of observations of damaged forest areas within the buffer zone decreased from the larger to the smaller buffers.

5.5.1. Measurements

Vivian: p_g fitted best spatially with the damage area fraction of the circular buffers of the storm Vivian (Table 5.5.1) and all buffer sizes tested were significantly correlated. The R^2 between the wind pressure and the damage area fraction increased from the largest to the smallest buffer. The transformed R^2 of the damage area fraction and p_g was 0.3 with the largest circular buffer and 0.8 with the smallest (Table 5.5.1), but the damage area fraction decreased from 1.7% to 0.9%. Additionally, p_g was significantly correlated with the damage area fraction of the two largest rectangular buffers along the wind direction of the storm Vivian, while R^2 remained relatively low at a level of 0.3. None of the other wind variables tested with the circular and rectangular buffers were significantly correlated. No clear increases or decreases in the damage area fraction were found.

Lothar, ANETZ: None of the wind variables of the storm Lothar tested with the circular and rectangular buffers around the meteorological stations of the ANETZ were significantly correlated, and no clear increases or decreases in the damage area fraction were found.

Lothar, ANETZ and ENET: p_g and 10 min average wind pressure of the combined ANETZ and ENET of the storm Lothar were significantly correlated with the damage fraction of the forest area of the smallest tested circular buffer size, while R^2 remained relatively low at a level of 0.2 (Table 5.5.1). All other wind variables tested with the circular and rectangular buffers were not significantly correlated and no clear increases or clear decreases were computed for the damage area fraction.

1			V						L						L						L		L		L	
2			M						M						M						S		X_1		X_2	
3			a	a	a	A	a	a	a	a	a	a	a	a	e	e	e	E	e	e	r	r	r	r	r	r
4			p_g	p_{10}	p_{60}	p_g	p_{10}	p_{60}	p_g	p_{10}	p_{60}	p_g	p_{10}	p_{60}	p_g	p_{10}	p_{60}	p_g	p_{10}	p_{60}	p_g	p_g	p_g	p_g	p_g	p_g
5			R^2	R^2	R^2	*p* value	*p* value	*p* value	R^2	R^2	R^2	*p* value	*p* value	*p* value	R^2	R^2	R^2	*p* value	*p* value	*p* value	R^2	*p* value	R^2	*p* value	R^2	*p* value
6	c	A	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		B	0.79	-	0.09	**0.0450**	-	**0.6232**	0.02	0.23	0.06	**0.6336**	**0.1179**	**0.4484**	0.24	0.19	-	**0.0257**	**0.0481**	-	0.01	**0.5102**	-	-	-	-
		C	0.67	-	0.02	**0.0003**	-	**0.6219**	0.01	0.04	<0.01	**0.6825**	**0.3671**	**0.3126**	0.10	0.01	-	**0.0531**	**0.6640**	-	0.04	**0.0540**	-	-	-	-
		D	0.42	-	0.02	**0.0035**	-	**0.5419**	0.01	0.07	0.05	**0.5725**	**0.2069**	**0.2764**	0.08	0.03	-	**0.0614**	**0.2919**	-	<0.01	**0.5147**	-	-	-	-
		E	0.29	-	0.15	**0.0049**	-	**0.0536**	0.04	0.11	0.05	**0.3077**	**0.0952**	**0.2524**	0.03	0.01	-	**0.2126**	**0.5207**	-	<0.01	**0.5115**	<0.01	**0.6010**	0.40	**<0.0001**
	w	A	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.04	**0.3384**	-	-	-	-
		B	0.74	-	0.66	**0.1415**	-	**0.0966**	0.02	0.01	0.03	**0.7737**	**0.7950**	**0.7258**	0.01	0.06	-	**0.7445**	**0.4868**	-	<0.01	**0.8437**	-	-	-	-
		C	0.03	-	0.04	**0.5268**	-	**0.4866**	0.02	0.01	0.02	**0.5737**	**0.1648**	**0.5726**	<0.01	<0.01	-	**0.7649**	**0.8227**	-	<0.01	**0.6115**	-	-	-	-
		D	0.28	-	0.09	**0.0173**	-	**0.1941**	<0.01	0.03	0.02	**0.8356**	**0.3991**	**0.5309**	<0.01	<0.01	-	**0.8342**	**0.7295**	-	<0.01	**0.6963**	-	-	-	-
		E	0.30	-	0.08	**0.0037**	-	**0.1407**	0.02	0.12	0.07	**0.5532**	**0.0877**	**0.1779**	<0.01	0.02	-	**0.6920**	**0.3297**	-	-	-	-	-	-	-
	o	A	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.04	**0.2555**	-	-	-	-
		B	0.51	-	<0.01	**0.0723**	-	**0.9545**	<0.01	0.18	0.02	**0.9064**	**0.1288**	**0.6863**	<0.01	0.04	-	**0.9721**	**0.4003**	-	<0.01	**0.9734**	-	-	-	-
		C	0.01	-	<0.01	**0.7564**	-	**0.8752**	<0.01	0.10	0.05	**0.8106**	**0.1511**	**0.3017**	0.01	0.01	-	**0.5865**	**0.6230**	-	0.01	**0.5028**	-	-	-	-
		D	<0.01	-	0.11	**0.9657**	-	**0.1578**	0.03	0.15	0.11	**0.4632**	**0.0631**	**0.1122**	0.01	<0.01	-	**0.4459**	**0.7196**	-	<0.01	**0.4921**	-	-	-	-
		E	<0.01	-	0.11	**0.8819**	-	**0.0859**	0.04	0.06	0.11	**0.3331**	**0.2377**	**0.0947**	0.05	0.01	-	**0.1385**	**0.4753**	-	-	-	-	-	-	-

Table 5.5.1: Coefficients of determination (R^2) and probabilities of the test statistics (*p* values) according to the investigation plan (described in Section 3; legend, see Table 5.3.2; ***bold p*** values; ***underlined*** significant values)

5.5.2. Simulation

The intermediate circular buffers of the simulation yielded significant correlations between p_g and the transformed data of the damage area fraction for the storm Lothar at low and medium altitudes, but with low levels of R^2. The damage area fraction increased from the largest to the smallest buffers. In contrast, no significant correlations were found for the rectangular buffers, neither for the significance tests of the transformed data of the damage area fraction and wind speed nor for any subset of the damage area fraction.

5.5.3. Expert estimates

MeteoSwiss estimation No clear correlations between the damage area fraction and gust wind speed clusters were found, but when the damage inventory GIS layer was partially dissolved by the single gust wind speed isotach maps, visually close connections between the high gust wind speed areas and the areas with high damage densities (Figure 5.3.1f) were observed.

Using the 14 x 14 km grid of the simulation with the circular buffer 5 km in radius, the observed p_g assigned to the spatial clusters of the dissolved map of the storm Lothar were not significantly correlated with the damage area fraction of the circular buffers 5 km in radius (Table 5.5.1). No clear correlations between the damage area fractions were found for the areas with the gust wind speed estimation clusters (Figure 5.5.2). With increasing levels of the gust wind speed clusters, the pressure of the gust wind speeds recorded by ANETZ and ENET increased (Figure 5.5.1). The Kruskal-Wallis rank sum test was significant. The *U* test was applied to each two of the clusters only for the wind pressure pairs 105/125, 105/135, and 115/135 km h^{-1}. It was also applied to the wind pressure pairs 95/135, 105/135, and 115/135 km h^{-1} for the damage fraction and significant differences between wind pressures were found. The box-plot also indicates significant differences in these cases (Figures 5.5.1 and 5.5.2).

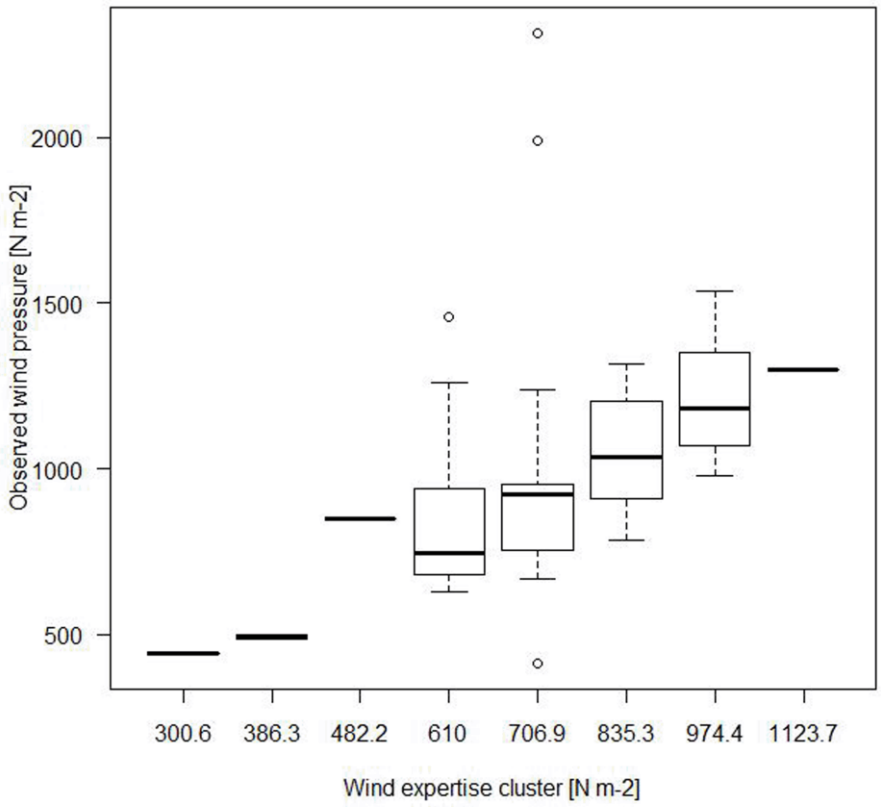


Figure 5.5.1: Box plots illustrating the variability of the observed wind pressure in the eight interisotach clusters of the maximum gust map (Expertise MeteoSwiss): clusters named according to the mean of the estimated wind pressure vs. observed wind pressure

WSL estimation The proportion of forest damage increased for the areas with high peak gust wind speed. The observed gust wind speeds assigned to the spatial clusters of the magnitude map of the storm Lothar were significantly correlated with the damage area fraction of the circular buffers 5 km in radius (Table 5.5.1). The mean of the observed gust wind speed in the area of the classified high gust wind speed was clearly higher (148 km h^{-1}) than the mean of the gust wind speed in the area of the estimated lower gust wind speed (126 km h^{-1}). The *U* tests indicated significantly different observed gust wind speeds and damage fractions for the two gust wind speed estimation areas (see also the box plots in Figures 5.5.3 and 5.5.4).

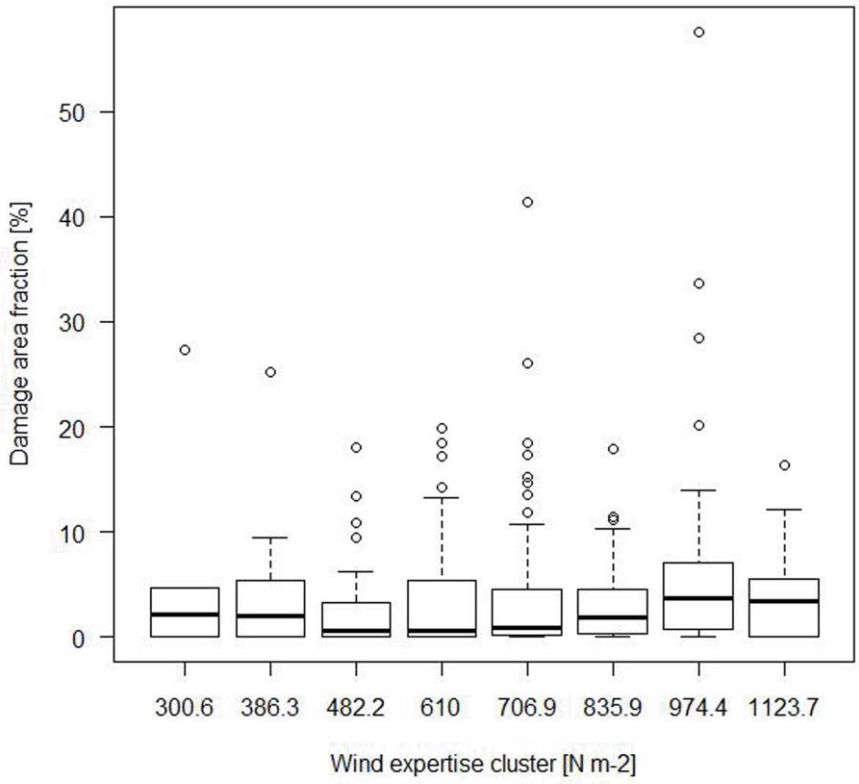


Figure 5.5.2: Box plots illustrating the variability of the observed damage area fraction in the eight interisotach clusters of the maximum gust map (Expertise MeteoSwiss): clusters named according to the mean of the estimated wind pressure vs. observed damage area fraction

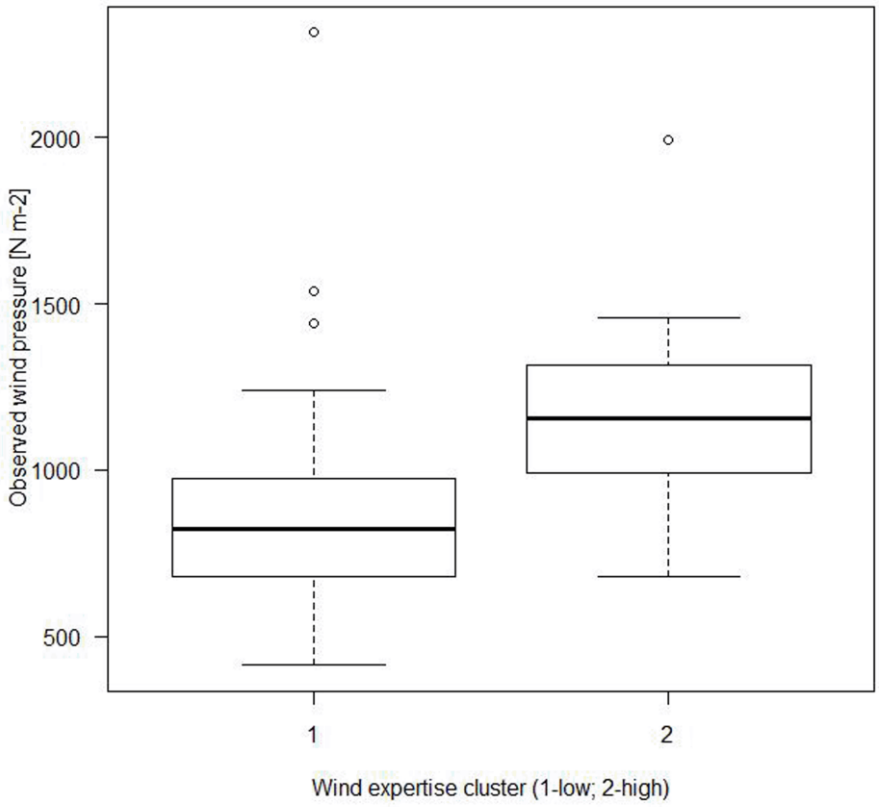


Figure 5.5.3: Box plots illustrating the variability of the observed wind pressure in the two interisotach clusters of the maximum gust map (Expertise WSL): clusters named according to the estimated wind pressure level vs. observed wind pressure

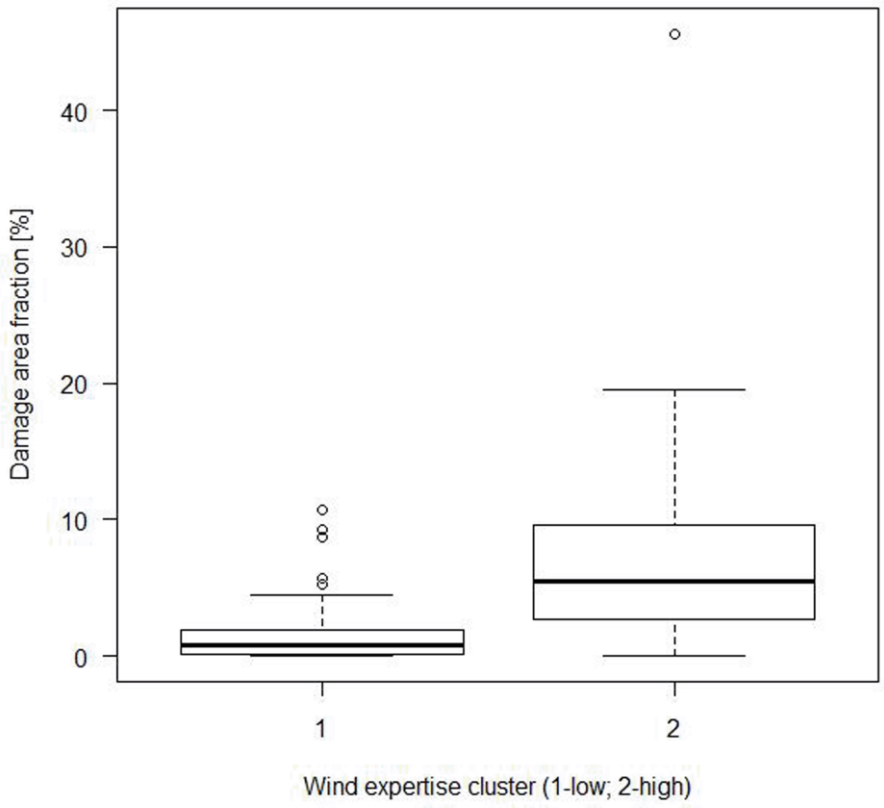


Figure 5.5.4: Box plots illustrating the variability of the observed damage area fraction in the two interisotach clusters of the maximum gust map (Expertise WSL): clusters named according to the estimated wind pressure level vs. The observed damage area fraction

5.6. Discussion

The parameter performing best in most of our models was found to be the gust wind speed connected to the circular buffers with small buffer sizes. A close connection between storm damage to forests and wind speed is not a unique finding for Switzerland. It is in line with the results of various studies, e.g. Quine (1991) for (southern) Britain from 1945 to 1990, Schüepp (1994) for Switzerland examining the 1990 winter storm Vivian, Gardiner et al. (2000) for the prediction of critical wind speeds using two models, Otto (2000) analysing long-term observations in Lower Saxony in Germany, (Mayer and

Schindler (2002) modelling wind loads on trees for the winter storm Lothar in Germany, Nicoll et al. (2005) for estimations based on winching experiments in Scotland, Changnon (2007) for the USA from 1949-2003, Meyer et al. (2008) for the total damage threshold during the winter storm Lothar in Switzerland, Schindler et al. (2009) for the storm field of the winter storm Lothar and Gardiner et al. (2010) reviewing destructive storms for Europe 1950-2010. In other studies wind parameters were found to be of non-significance (Mayer et al. 2005; Schütz et al. 2006) or secondary importance (Kupfer et al. 2008).

Several scales in worldwide use for the estimation of the effective wind speed range at a given location have also been successfully related to wind damage to trees, e.g. the Beaufort scale, the Saffir/Simpson scale, the Fujita Tornado scale and the TORRO scale (Cullen 2002; Hubrig 2004). The frequent use of such scales (Boose et al. 1994; Boose et al. 2001; Boose et al. 2004; Busby et al. 2008) can be seen as a sign of their usefulness. The effect of wind speed on trees was also used for studies relating damage to wind speeds (Cook and Goyens 2008), even using recent and subfossile forest damage patterns (Lorrey and Martin 2005). Such universal use of an effect that is relatively easy to assess (the wind effect on trees) for a cause that is very difficult to assess (wind) assumes a predominant influence of wind speed on storm damage to forests. Nonetheless, wind is not the sole agent influencing the amount of storm damage to forests during such an event. A variety of causative factors for storm damage have been repeatedly found worldwide. In a number of studies tree height was found to be a very important factor influencing the level of damage, e.g. Canham et al. (2001), Kenderes et al. (2007), Busing et al. (2009), and Schmidt et al. (2010). Additional factors found to significantly influence damage include altitude, exposition to the prevailing winds (Schüepp et al. 1994), stand age, development stage, percentage of conifers, soil-water logging, soil depth, exposition, stand structure, and previous damage or fellings (Dobbertin 2002), soil base saturation and nitrogen concentration in leaves (Braun et al. 2003), country, soil pH, proportion of coniferous trees, slope, humus type, stand height, and altitude (Mayer et al. 2005), tree species mixture and aspect (Schütz et al. 2006), stand structure and stand age, mean elevation, the range of elevations across the stands (Evans et al. 2007), elevation, aspect, slope, and age and height of the two dominant tree species (Kenderes et al. 2007), stand age, forest type, stand condition, site aspect, and distance to the nearest perennial stream (Kupfer et al. 2008), slope and aspect, soil water saturation (Schmöckel and Kottmeier 2008) tree species, topographic exposure, the severity of the local storm regime, and the combined effect of basal area and mean slenderness of the dominant trees (Martin-Alcon et al. 2010), land type association, distance to the nearest lake, and elevation (Moser and Nelson 2009), tree species class, and tree age or growth stage (Phillips et al. 2008), tree species, breast height

diameter, and its correlation with species-specific mean crown-depth/height (Yoshida and Noguchi 2009), and finally, height to diameter at breast height ratio, tree species group, exposition, and soil water saturation (Schmidt et al. 2010). However, sometimes factors such as stem diameter, slenderness, social position, and position within the stand (Braun et al. 2003) or slenderness and time since last thinning or previous damage (Schütz et al. 2006) were not found to significantly relate to storm damage to forests but in other studies one or more of them were found as significantly influencing factors (Dobbertin 2002; Hanewinkel et al. 2008; Schmidt et al. 2010).

A spatial scale-dependent differentiation was found by Xi et al. (2008): “Tree size and species explain damage variation at the stand scale; topographic, site and stand factors explain damage variation at the landscape scale and wind speed and precipitation explain damage variation at the regional scale.” Usbeck et al. (2010b) computed a correlation coefficient of 0.93 for the correlation between the maximum wind force (derived from maximum gust wind speed) and the forest damage for both the landscape scale and the regional scale. The result of Usbeck et al. (2010b) is apparently more in line with Xi et al. (2008), but seems to disagree with the present study where a generally increasing correlation between wind speed and forest damage for smaller spatial scales was found. However, the stand scale was not examined in the study of Usbeck et al. (2010b), and Xi et al. (2008) used the wind data from the nearest weather station (at an airport) for one of two stand scale approaches and the landscape scale approach data were adopted from a Fujita scale estimation for the area concerned. Taking into account potential differences between the wind fields (hurricane, tornado, and extratropical winter storm), an assumption of similar spatial conditions may fail for the present case.

The damage inventory map for the storm Lothar shows several West-East aligned stripes with high densities of damaged forest areas (see Figure 5.3.1). One possible explanation is that turbulent effects at sub-grid resolution triggered these extreme gusts in the down-wind stripes. The spatial correlation of natural wind, including strong seasonal wind and extreme storms, was studied by Toriumi et al. (2000) for spatial resolutions between 10^2 m and 10^3 m. They found spatial correlations of almost zero, especially in the case of extreme wind when the distance between measurement points was larger than 127 m. Therefore, the authors of the present study assume a strong influence of the orography on the air flow, especially in highly structured terrain (Schmöckel 2005; Lux 2007). Hence, the closest connection was computed as expected between forest damage and wind speed for the winter storm Vivian. On the other hand, the weak connection between the forest damage and the wind speed for even the smallest circular buffers for the storm Lothar was surprising. It may be explained by the extremely chaotic wind field of this exceptional storm event (Schütz et al. 2006). In case of the storm Vivian, the wind field was

partly channelized, especially in the valleys (König 1995). In a numerical experiment, Schär and Durran (1997) showed that topographic features can trigger "vortex streets", i.e. stripes with elevated turbulence. A similar phenomenon possibly occurred during the storm Lothar: When backtracking, the directions of stripes seem to point to sharp mountain crests in the otherwise smooth ridge of the Jura Mountains, such as the Creux du Vent and the Clus at Rondchatel. The resulting high turbulence may have contributed to the lower R^2 of Lothar compared to Vivian. If these stripes were caused by small topographical features, such special conditions could be included in future models with higher spatial resolution.

Not surprisingly, the main damage areas in Switzerland were found along the Alpine valleys for the storm Vivian, but in the moderately hilly areas of the Swiss Plateau for the storm Lothar. The non-channelized wind field of Lothar obviously included a spatially chaotic structure which was impossible to take adequately into account either by aligning the buffers to the wind direction or by the use of the smallest possible buffer size.

The problematic variable in this case is the wind speed, i.e. the spatial resolution of the available observed wind data. In such cases, the use of modelled wind data is an appropriate solution. The simulation data used in this study were derived from a rather old simulation model (Schubiger, F., MeteoSwiss, oral communication in 2007). The finding that there were significant correlations between the simulated gust wind speed and the forest damage on a small scale are in line with that of Usbeck et al. (2010b). The reason why the significance level increased when only lower altitudes were considered may be that variations in altitude increase with buffer radius in mountainous regions. Better results should be attainable when using results from computer simulations specifically run for this special purpose. Such a model is available with FITNAH, a non-hydrostatic mesoscale simulation model (Gross 1991). This model is being developed explicitly including the estimation of storm damage risks to forests and has successfully been applied to forest damage of the winter storms Vivian (König 1995) and Lothar (Schmöckel 2005). FITNAH uses various variables describing forest site and stand conditions, especially factors closely related to the wind drag such as tree age (referring to the tree height), altitude, and exposition.

Using such models and incorporating available forest site condition information and topography may potentially improve the correlation between wind information and forest damage in the complex Swiss terrain.

5.7. Conclusions

Gust wind speed was the wind variable that had the highest correlation with storm damage to forests, with a higher coefficient of determination for the small circular buffer areas. If it were possible to obtain more reliable and spatially accurate wind speed and pressure estimations, especially for gusts at the scale of forest stands, most of the storm damage risk to forests could probably be modelled on the basis of wind variables. For this purpose, the effects of small-scale topography on turbulence are not adequately included in current weather models. Until all the main influencing factors can be included, however, damage models will remain difficult to adapt and will produce rather random results.

If the re-occurrence period of damaging storms is shorter than the period needed for the forest to become productive and fulfil the goal of forest management, potentially affected forest stands will have to be managed in a different, loss-minimizing way. For such decisions, detailed knowledge about the spatial distribution of risks is essential. Therefore, additional deterministic and probabilistic research on the mesoscale, toposcale, and microscale risks to Swiss forests is needed for all areas likely to be affected by damaging storms.

5.8. Acknowledgements

This research was partly supported by PhD fellowship No. 113425 from the Hans Böckler Stiftung (HBS), Germany, by the LOTHAR Grundlagenprogramm of the Federal Office of the Environment (FOEN), Switzerland, and by the Forest Dynamics programme of the Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research (WSL).

We would like to thank Stephan Bader and Francis Schubiger, MeteoSwiss, for their valuable assistance in describing the meteorology of severe west storms in Switzerland, and Deborah van Geijtenbeek and Geneviève Baudraz for their help with the special wind datasets of MeteoSwiss. We are also indebted to Philipp Mayer, science-textflow, for information on interdisciplinary investigations of wind simulations and forest damage and to Peter Jakob, WSL, for his helpful suggestions. We thank Ann-Marie Jakob-

Murphy and Silvia Dingwall for their feedback on the use of the English language. We also thank two anonymous reviewers for their useful comments.

5.9. References

Blennow K, Olofsson E (2008) The probability of wind damage in forestry under a changed wind climate. Clim Change 87 (3-4):347-360

Boose ER, Chamberlin KE, Foster DR (2001) Landscape and regional impacts of hurricanes in New England. Ecological Monographs 71 (1):27-48

Boose ER, Foster DR, Fluet M (1994) Hurricene impacts to tropical and temperate forest landscapes. Ecological Monographs 64 (4):369-400

Boose ER, Serrano MI, Foster DR (2004) Landscape and regional impacts of hurricanes in Puerto Rico. Ecological Monographs 74 (2):335-352

Brassel P, Brändli U-B (1999) Schweizerisches Landesforstinventar. Ergebnisse der Zweitaufnahme 1993-1995. Verlag Paul Haupt, Bern-Stuttgart-Wien. 442 pp.

Braun S, Schindler C, Volz R, Flückiger W (2003) Forest damages by the storm "Lothar" in permanent observation plots in Switzerland: the significance of soil acidification and nitrogen deposition. Water Air Soil Poll 142:327-340

Busby PE, Motzkin G, Boose ER (2008) Landscape-level variation in forest response to hurricane disturbance across a storm track. Canadian Journal of Forest Research-Revue Canadienne De Recherche Forestiere 38 (12):2942-2950

Busing RT, White RD, Harmon ME, White PS (2009) Hurricane disturbance in a temperate deciduous forest: patch dynamics, tree mortality, and coarse woody detritus. Plant Ecology 201 (1):351-363

Canham CD, Papaik MJ, Latty EF (2001) Interspecific variation in susceptibility to windthrow as a function of tree size and storm severity for northern temperate tree species. Can J For Res 31 (1):1-10

Changnon SA (2007) Catastrophic winter storms: An escalating problem. Clim Change 84 (2):131-139.

Cook GD, Goyens C (2008) The impact of wind on trees in Australian tropical savannas: lessons from Cyclone Monica. Austral Ecology 33 (4):462-470

Cullen S (2002) Trees and wind: wind scales and speeds. Journal of Arboriculture 28 (5):237-242

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 (1/2):187-205

Dobbertin M (2005) Erfassung der Bestandesdaten und Schäden auf dem repräsentativen 4x4-km Sanasilva-Netz. In: Indermühle M, Raetz, P., Volz, R. (ed) LOTHAR Ursächlichen Zusammenhänge und Risikobewertung. Synthese des Teilprogramms 6, vol 184. Umwelt-Materialien. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bern, pp 39-52

EAFV (1988) Schweizerisches Landesforstinventar: Ergebnisse der Erstaufnahme 1982-1986. Berichte der Eidgenössischen Anstalt für das Forstliche Versuchswesen (EAFV) 305:1- 375

Evans AM, Camp AE, Tyrrell ML, Riely CC (2007) Biotic and abiotic influences on wind disturbance in forests of NW Pennsylvania, USA. For Ecol Manage 245 (1-3):44-53

Gardiner B, Blennow K, Carnus J-M, Fleischer P, Ingemarson F, Landmann G, Lindner M, Marzano M, Nicoll B, Orazio C, Peyron J-L, Reviron M-P, Schelhaas MJ, Schuck A, Spielmann M, Usbeck T (2010) Destructive Storms in European Forests: Past and Forthcoming Impacts. European Forest Institute EFI, Atlantic European Regionel Ofice - EFIATLANTIC, Joensuu. 138 pp.

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 (3):447-463

Gardiner B, Peltola H, Kellomaki S (2000) Comparison of two models for predicting the critical wind speeds required to damage coniferous trees. Ecol Model 129 (1):1-23

Gross G (1991) Anwendungsmöglichkeiten mesoskaliger Simulationsmodelle dargestellt am Beispiel Darmstadt. Meteorologische Rundschau 43:97-112

Hanewinkel M, Breidenbach J, Neeff T, Kublin E (2008) Seventy-seven years of natural disturbances in a mountain forest area - the influence of storm, snow, and insect damage analysed with a long-

term time series. Canadian Journal of Forest Research-Revue Canadienne De Recherche Forestiere 38 (8):2249-2261

Hann J (1869) Untersuchungen über die Winde der nördlichen Hemisphäre und ihre klimatologische Bedeutung. Sitzb d k Akad D Wissensch II Abth I.X. Bd. (Juli-Heft): unnumbered

Hollenstein K (2002) Herleitung eines Modells zur Abschätzung der mechanischen Stabilität von Waldbeständen. Ergebnisse des Komponentenprojekts C. Polyprojekt PRIMALP. ETH Zürich, Zürich. 34 pp.

Hubrig M (2004) Analyse von Tornado- und Downburst-Windschäden an Bäumen. Analysis of Tornado and Downburst Wind Damage to Trees. Forst und Holz 59:78-84

Kenderes K, Aszalos R, Ruff J, Barton Z, Standovar T (2007) Effects of topography and tree stand characteristics on susceptibility of forests to natural disturbances (ice and wind) in the Borzsony Mountains (Hungary). Community Ecology 8 (2):209-220

König A (1995) Sturmgefährdung von Beständen im Altersklassenwald: ein Erklärungs- und Prognosemodell. J. D. Sauerländer´s Verlag, Frankfurt am Main. 194 pp.

Kuhn N (1995) Die standörtliche Abhängigkeit der Vivian-Windwürfe. Informationsblatt des Forschungsberiches Landschaftsökologie Nr. 28:1-3

Kupfer JA, Myers AT, McLane SE, Melton GN (2008) Patterns of forest damage in a southern Mississippi landscape caused by Hurricane Katrina. Ecosystems 11 (1):45-60

Lamb H (1991) Historic storms of the North Sea, British Isles and Northwest Europe. Cambridge University Press, Cambridge - New York - Port Chester - Melbourne – Sydney. 204 pp.

Leckebusch GC, Weimer A, Pinto JG, Reyers M, Speth P (2008) Extreme wind storms over Europe in present and future climate: a cluster analysis approach. Meteorologische Zeitschrift 17 (1):67-82

Lorrey A, Martin T (2005) Use of modern tree-fall patterns as a guideline for interpreting prostrate trees at a pre-Last Glacial Maximum paleoforest site, upper North Island, New Zealand. Journal of Geophysical Research-Biogeosciences 110 (G2). 2156-2202

Lux R (2007) Modellsimulationen zur Strömungsverstärkung von orographischen Grundstrukturen bei Sturmsituationen. Wissenschaftliche Berichte des Instituts für Meteorologie und

Klimaforschung der Universität Karlsruhe (TH), vol 40. Universität Karlsruhe (TH), Karlsruhe. 173 pp.

Martin-Alcon S, Gonzalez-Olabarria JR, Coll L (2010) Wind and Snow Damage in the Pyrenees Pine Forests: Effect of Stand Attributes and Location. Silva Fennica 44 (3):399-410

Maurer J, Billwiller jr. R, Hess C (1909) Das Klima der Schweiz. Auf Grundlage der 37jährigen Beobachtungsperiode 1864-1900, vol 1. Huber & Co., Frauenfeld. 302 pp.

Mayer H, Schindler D (2002) Forest meteorological fundamentals of storm damages in forests in connection with the extreme storm "Lothar". ALLGEMEINE FORST UND JAGDZEITUNG 173 (11-12):200-208

Mayer P, Brang P, Dobbertin M, Hallenbarter D, Renaud JP, Walthert L, Zimmermann S (2005) Forest storm damage is more frequent on acidic soils. ANNALS OF FOREST SCIENCE 62 (4):303-311

Meyer FD, Paulsen J, Korner C (2008) Windthrow damage in Picea abies is associated with physical and chemical stem wood properties. Trees-Structure and Function 22 (4):463-473

Moser WK, Nelson MD (2009) Windstorm Damage in Boundary Waters Canoe Area Wilderness (Minnesota, USA): Evaluating Landscape-level Risk Factors. Baltic For 15 (2):248-254

Nicoll BC, Achim A, Mochan S, Gardiner BA (2005) Does steep terrain influence tree stability? A field investigation. Canadian Journal of Forest Research-Revue Canadienne De Recherche Forestiere 35 (10):2360-2367

Nicoll BC, Gardiner BA, Peace AJ (2008) Improvements in anchorage provided by the acclimation of forest trees to wind stress. Forestry 81 (3):389-398

Nicoll BC, Gardiner BA, Rayner B, Peace AJ (2006) Anchorage of coniferous trees in relation to species, soil type, and rooting depth. Can J For Res 36 (7):1871-1883

Nilsson C, Goyette S, Bärring L (2007) Relating forest damage data to the wind field from high-resolution RCM simulations: Case study of Anatol striking Sweden in December 1999. Global and Planetary Change 57:161-176

Otto H-J (2000) Waldbauliche Erfahrungen nach Sturmkatastrophen - eine Rückschau in Niedersachsen (Silvicultural Experience after Wind-Throw Catastrophs - a Retrospect View in Lower Saxony). Forst und Holz 55 (12):371-376

Phillips JD, Marion DA, Turkington AV (2008) Pedologic and geomorphic impacts of a tornado blowdown event in a mixed pine-hardwood forest. Catena 75 (3):278-287

Quine CP (1991) Recent storm damage to trees and woodlands in southern Britain. Research for practical Arboriculture. Forestry Commission Bulletin, vol 97. HMSO, London. 83-98

Quine CP, Bell PD (1998) Monitoring of windthrow occurrence and progression in spruce forests in Britain. Forestry 71 (2):87-97

Quine CP, Humphrey JW, Ferris R (1999) Should the wind disturbance patterns observed in natural forests be mimicked in planted forests in the British uplands? Forestry 72 (4):337-358

Ray D, Nicoll BC (1998) The effect of soil water-table depth on root-plate development and stability of Sitka spruce. Forestry 71 (2):169-182

Rockel B, Woth K (2007) Extremes of near-surface wind speed over Europe and their future changes as estimated from an ensemble of RCM simulations. Clim Change 81:267-280

Ruel JC, Pin D, Cooper K (1998) (Research note.) Effect of topography on wind behaviour in a complex terrain. Forestry 71 (3):261-265

Schär C, Durran DR (1997) Vortex formation and vortex shedding in continuously stratified flows past isolated topography. J Atmos Sci 54:534-554

Schelhaas MJ, Nabuurs GJ, Schuck A (2003) Natural disturbances in the European forests in the 19th and 20th centuries. Gl Ch Biol 9 (11):1620-1633

Schelhaas MJ, Nabuurs GJ, Sonntag M, Pussinen A (2002) Adding natural disturbances to a large-scale orest scenario model and a case study for Switzerland. For Ecol Manage 167 (1-3):13-26

Schiesser H-H, Pfister C, Bader J (1997) Winter Storms in Switzerland North of the Alps 1864/1865-1993/1994. Theor Appl Climatol 58:1-9

Schindler D, Grebhan K, Albrecht A, Schonborn J (2009) Modelling the wind damage probability in forests in Southwestern Germany for the 1999 winter storm 'Lothar'. International Journal of Biometeorology 53 (6):543-554

Schmidt M, Hanewinkel M, Kandler G, Kublin E, Kohnle U (2010) An inventory-based approach for modeling single-tree storm damage - experiences with the winter storm of 1999 in southwestern Germany. Canadian Journal of Forest Research-Revue Canadienne De Recherche Forestiere 40 (8):1636-1652

Schmöckel J (2005) Orographischer Einfluss auf die Strömung abgeleitet aus Sturmschäden im Schwarzwald während des Orkans "Lothar". Universität Karlsruhe (TH), Karlsruhe. 133 pp.

Schmöckel J, Kottmeier C (2008) Storm damage in the Black Forest caused by the winter storm "Lothar" - Part 1: Airborne damage assessment. Nat Hazards Earth Syst Sci 8:795-803

Schüepp M (1950) Wolken / Wind und Wetter. Forschung und Leben. Büchergilde Gutenberg, Zürich. 263 pp.

Schüepp M, Schiesser HH, Huntrieser H, Scherrer HU, Schmidtke H (1994) The winterstorm "Vivian" of 27 February 1990: about the meteorological development, wind forces and damage situation in the forests of Switzerland. Theor Appl Climatol 49:183-200

Schütz JP, Gotz 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 (3):291-302

Steinhauser F (1951) Über die Windverstärkung an Gebirgszügen. Ein Beitrag zur Frage der Beeinflussung der Luftströmungen durch Gebirge. Theor Appl Climatol 2:39-64

Toriumi R, Katsuchi H, Furuya N (2000) A study on spatial correlation of natural wind. J Wind Eng Ind Aero 87 (2-3):203-216

Trenberth KE, Jones PD, Ambenje P, Bojariu R, Easterling D, Klein Tank A, Parker D, Rahimzadeh F, Renwick JA, Rusticucci M, Soden B, Zhai P (2007) Observations: Surface and Atmospheric Climate Change. In: Solomon S, Qin D, Manning M et al. (eds) Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the

Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 1004 pp.

Usbeck T, Wohlgemuth T, Dobbertin M, Pfister C, Burgi A, Rebetez M (2010a) Increasing storm damage to forests in Switzerland from 1858 to 2007. Agricultural and Forest Meteorology 150 (1):47-55

Usbeck T, Wohlgemuth T, Pfister C, Volz R, Beniston M (2010b) Wind speed measurements and forest damage in Canton Zurich (Central Europe) from 1891 to winter 2007. Int J Climat 30 (3):347-358

Vanomsen P (2006) Der Einfluss der Durchforstung auf die Verankerung der Fichte hinsichtlich ihrer Sturmresistenz, vol 16532. Diss. ETH. Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Zürich. 247 pp.

WSL, BUWAL (eds) (2001) Lothar. Der Orkan 1999. Ereignisanalyse. Eidg. Forschungsanstalt WSL, Bundesamt für Wald, Schnee und Landschaft BUWAL, Birmensdorf, Bern. 365 PP.

Xi WM, Peet RK, Decoster JK, Urban DL (2008) Tree damage risk factors associated with large, infrequent wind disturbances of Carolina forests. Forestry 81 (3):317-334

Yoshida T, Noguchi M (2009) Vulnerability to strong winds for major tree species in a northern Japanese mixed forest: analyses of historical data. Ecological Research 24 (4):909-919

6. Artikel 4: Wintersturmschäden im Schweizer Wald von 1865 bis 2014

Wintersturmschäden im Schweizer Wald von 1865 bis 2014

Tilo Usbeck

Université de Neuchâtel und Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL

Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen 166, 3: 184-190

6.1. Zusammenfassung

Winterstürme verursachen die schwersten Schäden am Schweizer Wald. Für den vorliegenden Beitrag wurde untersucht, wie sich diese Sturmschäden in den Wäldern landesweit und in den einzelnen Kantonen seit 1865 bis 2014 in Abhängigkeit der Windstärke, des stehenden Holzvorrats und in Beziehung zur Waldfläche entwickelt haben. Im Studienzeitraum traten 26 Winterstürme mit je mindestens 70 000 m^3 Schadholz auf. Die Sturmschäden zeigen eine hohe Variabilität, sowohl absolut (Volumen in m^3) als auch relativ zur Waldfläche (m^3/ha) und zum stehenden Vorrat (%). In den vergangenen 150 Jahren waren im Durchschnitt die Kantone Nidwalden, Freiburg, Aargau, Zürich und Zug am stärksten betroffen, mit Schäden von 2.2 m^3/ha (Zürich) bis 3.1 m^3/ha (Nidwalden) pro Ereignis. Um die Jahrtausendwende waren nicht nur die grössten Schäden zu verzeichnen, sondern es wurden auch die höchsten stehenden Vorräte und die höchsten Spitzenböen registriert.

6.2. Einleitung

Stürme entstehen als Folge von grossen Luftdruckgradienten unter Beteiligung grosser Temperaturunterschiede zwischen Warm- und nachfolgender Kaltluft. Erreichen die Winde Geschwindigkeiten von mehr als 32.7 m/s (117.7 km/h; Stärke 12 auf der Beaufort-Skala), werden sie Orkane genannt. Seit 1954 werden Tief- und Hochdruckgebilde durch Namen bezeichnet, doch erst seit den Orkantiefs Vivian und Wiebke (1990) wurden die Medien auf die Namensgebung durch das Institut für Meteorologie der Fachuniversität Berlin aufmerksam. Extratropische Stürme treten in den Wintermonaten auf (Blizzards, europäische Winterstürme), da dann die Temperaturunterschiede in der Stratosphäre zwischen der Polarzone und dem Süden besonders gross sind und damit mehr kinetische Energie vorhanden ist. Winterstürme in Europa sind von West nach Ost verlaufende Zyklonbewegungen, die zum Wettergeschehen der Westwindzone gehören (Mitchell 2013). Trotz grosser Variabilität der Sturmaktivität wird für die Zukunft eine Zunahme von Winterstürmen in Europa erwartet (Donat et al 2011a, Donat et al 2011b). Demgegenüber steht allerdings die Feststellung, dass bei zunehmend höheren globalen Temperaturen die Temperaturunterschiede in der Stratosphäre abnehmen werden und damit auch die Häufigkeit der Stürme (Bengtsson et al 2009). Demnach müssten diese Stürme extremer sein bei kälterem Klima. Die Überlegungen zeigen, dass Zusammenhänge oder direkte Verknüpfungen zum Klimawandel als Ursachen für die Entwicklung von Winterstürmen als eher unsicher befunden werden (Booth et al 2013, Burningham & French 2013).

Wie auch immer, Winterstürme sind die grösste Naturgefahr für den Schweizer Wald. Sie können infolge ihrer grossen Ausdehnung in mehreren Regionen gleichzeitig Schaden anrichten (WSL & BUWAL 2001). Solche Ereignisse ziehen oft auch Sekundärschäden mit grossen Mengen Käferholz nach sich (Forster & Meier 2008).

Die Wirkung von Naturgefahren auf den Wald war schon vor dem Aufbau wissenschaftlicher Einrichtungen Gegenstand dauerhaften Monitorings. So wurden von vielen kantonalen Verwaltungen bereits kurz nach Mitte des 19. Jahrhunderts Informationen zu Waldschäden erhoben und in ihren Jahresberichten publiziert.

Für den vorliegenden Beitrag wurde untersucht, wie sich die von Winterstürmen verursachten Waldschäden in der Schweiz und in den einzelnen Kantonen seit 1865 in Abhängigkeit der Windstärke, des stehenden Holzvorrats und in Beziehung zur Waldfläche entwickelt haben.

6.3. Material und Methoden

6.3.1. Eingrenzung der Aufgabenstellung

Zunächst wurden quantitative und qualitative Informationen zu Sturmschäden von kommunalem bis nationalem Niveau gesammelt. Nach einer ersten Sichtung wurde die Aufgabenstellung präzisiert. Demnach wurden für die vorliegende Arbeit nur Daten berücksichtigt, die folgende Bedingungen erfüllten:

1) Zeithorizont: Winter 1865 bis Winter 2014 (Winter x: 1. Oktober des Jahres x–1 bis 31. März des Jahres x),

2) Räumliche Auflösung der Datensammlung: Kanton,

3) Schadenmerkmal: Volumen im Festmass,

4) Schaden-Untergrenze (kleinster «schwerer Schaden»): 70 000 m^3 schweizweit, wobei mindestens drei Kantone betroffen sein mussten.[1]

6.3.2. Zielgrösse: Schadholzvolumen

Als Datenquellen zur Ermittlung der Schadholzvolumen (Wurf- bzw. Bruchholz je Sturm respektive Sturmserie) dienten kantonale und eidgenössische Veröffentlichungen, insbesondere die kantonalen Rechenschaftsberichte von 1865 bis in die späten 1960er-Jahre. Ab den grossen Schäden der Winterstürme des Jahres 1967 wurde diese Datenquelle allerdings lückig bezüglich der Meldung kleinerer Schadenereignisse. Insbesondere lieferte sie seit den frühen 1970er-Jahren nur noch Informationen zu schweren Sturmschäden (Pfister 1998). Seit circa 2005 werden kantonale Sturmschadendaten ereignisabhängig beim Bundesamt für Umwelt (BAFU) gesammelt. Aufgrund dieser Unsicherheit der Schadendaten zu kleineren Sturmereignissen wurde die Schadenuntergrenze für die Untersuchung auf 70 000 m^3 je Ereignis festgesetzt. Da das metrische System erst ab 1877 verbindlich

[1] Bei einem Vorrat von 350 m^3/ha entsprechen 70 000 m^3 einem Totalschaden auf einer Fläche von 200 ha.

verwendet wurde, mussten die in den frühen Quellen verwendeten Volumenangaben (Kubikfuss, Normalklafter) umgerechnet werden.

Die totalen Schadholzvolumen wurden als gesamtschweizerische und kantonale Werte aus den jeweiligen Publikationen übernommen. Wo die Totale nur auf kantonalem Niveau verfügbar waren, wurde der nationale Wert aus diesen aufsummiert. War das Schadholzvolumen in einem Kanton nur für eine bestimmte Eigentumskategorie erhoben worden, wurde es auf den entsprechenden Anteil an der Waldfläche des jeweiligen Kantons bezogen.

6.3.3. Bezugsgrössen: Waldfläche, Vorrat und Windstärke

Die Schadholzvolumen wurden in Beziehung gesetzt zum Vorrat (=Vorrat der lebenden Bäume; Schadanteil) und zur Waldfläche (relativer Schaden). Die früheste Erhebung der Waldflächen aller Kantone stammt zwar aus den Jahren 1858 bis 1860 (Landolt 1862), und seit 1877 werden die Waldflächen aller Kantone für die Forststatistik ermittelt. Da aber die Erhebungsmethoden sowie die Walddefinitionen früherer Erhebungen weitgehend unbekannt sind (Brändli 2000), wurden hier ausschliesslich die Daten des LFI (EAFV 1988, Brassel & Brändli 1999, Brändli 2010, Abegg et al 2014) verwendet.

Der Vorrat ist einer der grundlegenden forstlichen Parameter. Für die Schweiz sind aber nur wenige grossflächige Vorratsermittlungen bekannt, und nur jene des LFI betreffen den gesamten Wald. Für die Untersuchung wurde daher auf die Arbeit von Kurz et al (1998) zurückgegriffen, die den landesweit durchschnittlichen Vorrat für den Zeitraum von 1800 bis 2050 abgeschätzt haben. Konkret wurden die Daten von Kurz et al (1998) bis zum Wirksamwerden des LFI (1983) verwendet, ab da die LFI-Daten für den stehenden Holzvorrat (Abb 6.3.1).

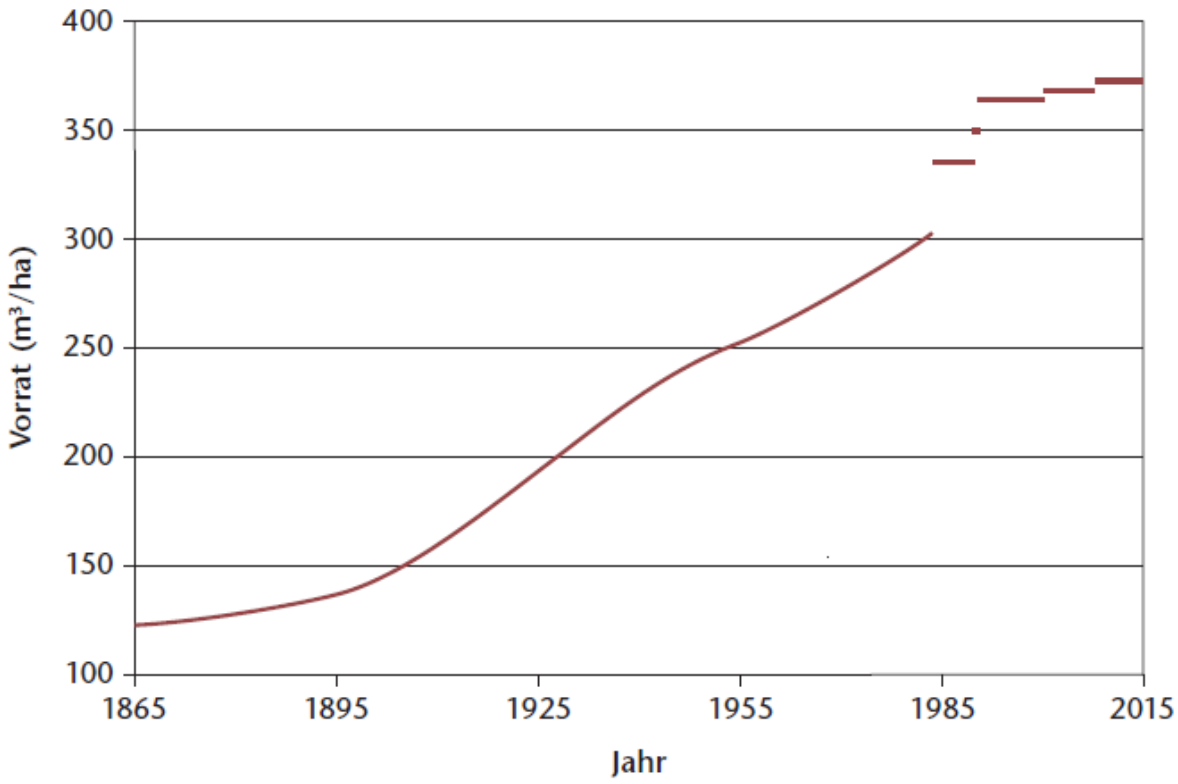


Abb 6.3.1: Entwicklung der Bezugsgrösse Vorrat pro Hektare. 1865 bis 1982: hypothetischer Vorrat gemäss Kurz et al (1998), ab 1983 Vorrat (der lebenden Bäume) pro Hektare gemäss Landesforstinventar (Auswertungseinheit: gemeinsamer zugänglicher Wald ohne Gebüschwald LFI1–LFI4b).

Als Winddaten wurden die Spitzenböen der Messungen der Station Zürich von MeteoSchweiz verwendet, da diese eine lange Reihe repräsentativer Daten zu Winterstürmen in Höhenlagen unterhalb der Waldgrenze bieten (Usbeck et al 2010a). Ab 1872 wurde die (maximalen) Windgeschwindigkeiten mittels Anemometer gemessen und aufgezeichnet, ab 1891 sind die Winddaten homologisiert. Aus den maximalen Spitzenböen je Sturmereignis wurden die Winddrücke ermittelt. Aus den Winddrücken und Schadholzvolumen respektive Schadanteilen wurde der Pearson-Korrelationskoeffizient (r) berechnet und mittels linearen Modells (lm) die Signifikanz auf dem 5%-Niveau getestet, sowohl für Schweizer als auch für die Zürcher Daten.

6.3.4. Datenqualität

Die Sturmschadenvolumen wurden und werden auf kantonaler Ebene und ohne schweizweit einheitliche Methodik erhoben. Es fehlen somit Gütemerkmale dieser Daten für den interkantonalen Vergleich. Die Daten des LFI zu Waldfläche und Vorrat sind methodisch abgesichert. Allerdings sind diese Daten erst ab dem Jahr 1983 verfügbar. Für die Jahre 1865 bis 1982 mussten Annäherungen gesucht werden. So wird für die Waldausdehnung früherer Jahre auch die Waldfläche gemäss LFI angenommen. Für den Vorrat wird der hypothetische Vorrat von Kurz et al (1998) verwendet, der mittels Metadaten hergeleitet wurde, ohne bestimmte Genauigkeitsmasse zu beanspruchen.

Die Winddaten werden seit 1980 innerhalb eines Messnetzes erhoben (ANETZ, jetzt SwissMetNet) und unterliegen den Qualitätsanforderungen der MeteoSchweiz. Zu allen früheren Daten fehlen entsprechende Qualitätsangaben.

6.4. Resultate

6.4.1. Anzahl Winterstürme und Schadholzmengen

Von 1865 bis 2014 wurden in der Schweiz 26 schwere Winterstürme mit mindestens 70 000 m^3 Schadholz registriert (Abb 6.4.1). Für diese wurden in 84.1% der gesamthaft 634 Schadenereignisse (Summe aller kantonalen Schadenereignisse aller Stürme) Daten auf kantonalem Niveau gefunden. Für die Kantone Genf und Tessin fehlen in der Regel Schadenangaben. Die am lückenhaftesten dokumentierten Sturmschäden betreffen jene der Winter 1968 und 2002, welche jeweils den katastrophalen Ereignissen 1967 und 1999 in kurzem Abstand folgten.

23 der 26 Winterstürme haben Schadholzmengen von weniger als 2 Mio. m^3 verursacht, und nur drei liegen über dieser Zahl. Diese drei Stürme hinterliessen Schäden von circa 2.9 Mio. m^3 (1967), 5.1 Mio. m^3 (Vivian vom Februar 1990; Summe aller kantonalen Schadenmeldungen) und 14 Mio. m^3 (Lothar vom Dezember1999). Dabei ist grösste beobachtete Schaden (Lothar) 20-mal so gross wie die untere Erfassungsgrenze für diese Studie.

Eine grosse Variabilität zeigt sich auch in Bezug auf die Schadanteile, die oft weniger als 0.1% des Vorrats betragen, aber auch einen Wert von 3.6% erreichen können. Treten über den Studienzeitraum ähnlich

grosse Schadholzmengen auf, so werden mit fortschreitender Zeit die Schadanteile geringer, was hauptsächlich durch den zunehmenden stehenden Vorrat verursacht wird.

Die Winterstürme der Jahre 1967, 1990 und 1999 verursachten nicht nur extrem grosse Schadholzmengen, sondern auch die höchsten Schadanteile. Sie zerstörten 0.9% (1967), 1.3% (1990; Vivian) und 3.6% des Holzvorrates (1999; Lothar). Die Schäden im Zuge dieser drei Stürme können nicht allein mit der Zunahme des Vorrats im Untersuchungszeitraum erklärt werden (Abb 6.4.1).

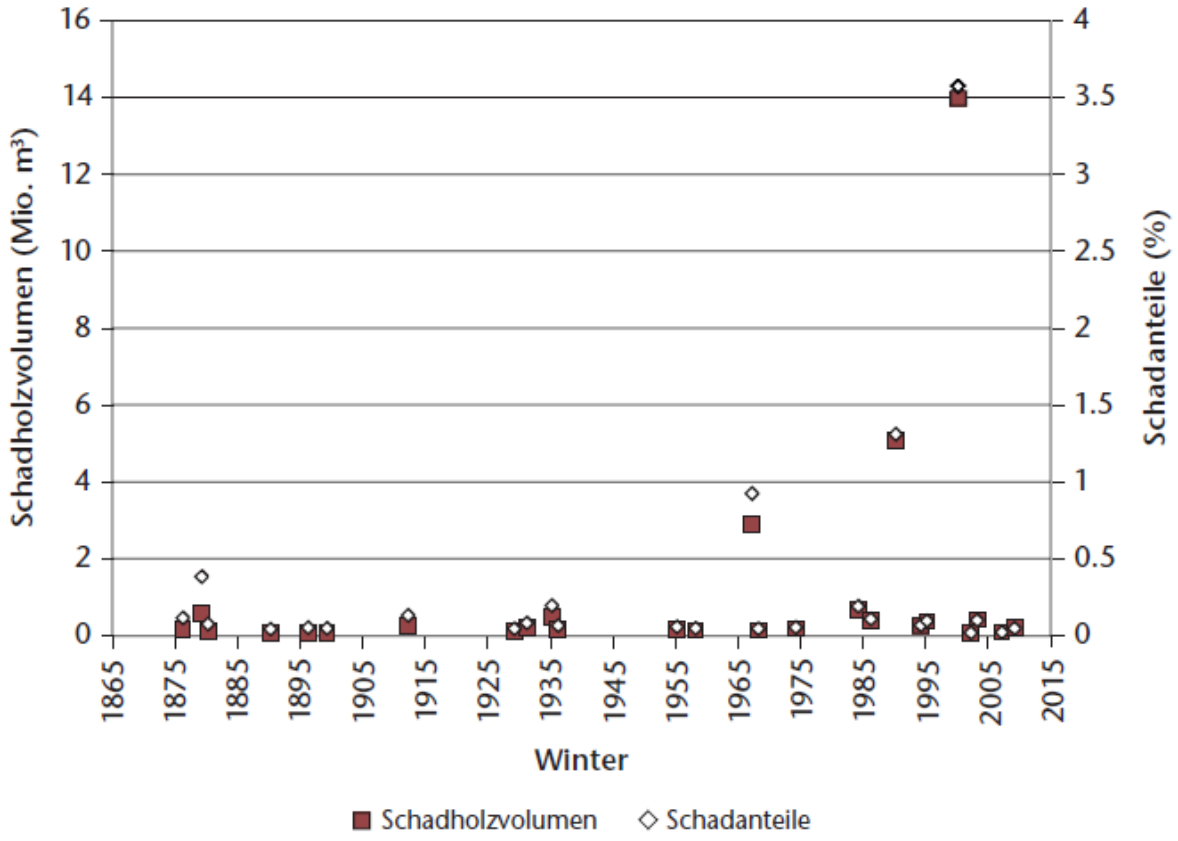


Abb 6.4.1: Schadholzvolumen und Schadanteile der 26 schweren Winterstürme (Schaden ≥70 000 m^3 je Ereignis) in der Schweiz von 1865 bis 2014.

6.4.2. Schäden je Kanton

Die Mittelwerte der Schadholzvolumen je Hektar Waldfläche zeigen mit Werten von 0.0 bis 3.1 m^3/ha grosse Unterschiede zwischen den Kantonen (Abb 6.4.2). Besonders hohe Werte sind in den Kantonen

Nidwalden, Freiburg, Aargau, Zug und Zürich zu finden. Dagegen wurden sehr geringe Werte für die Kantone Genf, Tessin und Graubünden ermittelt.

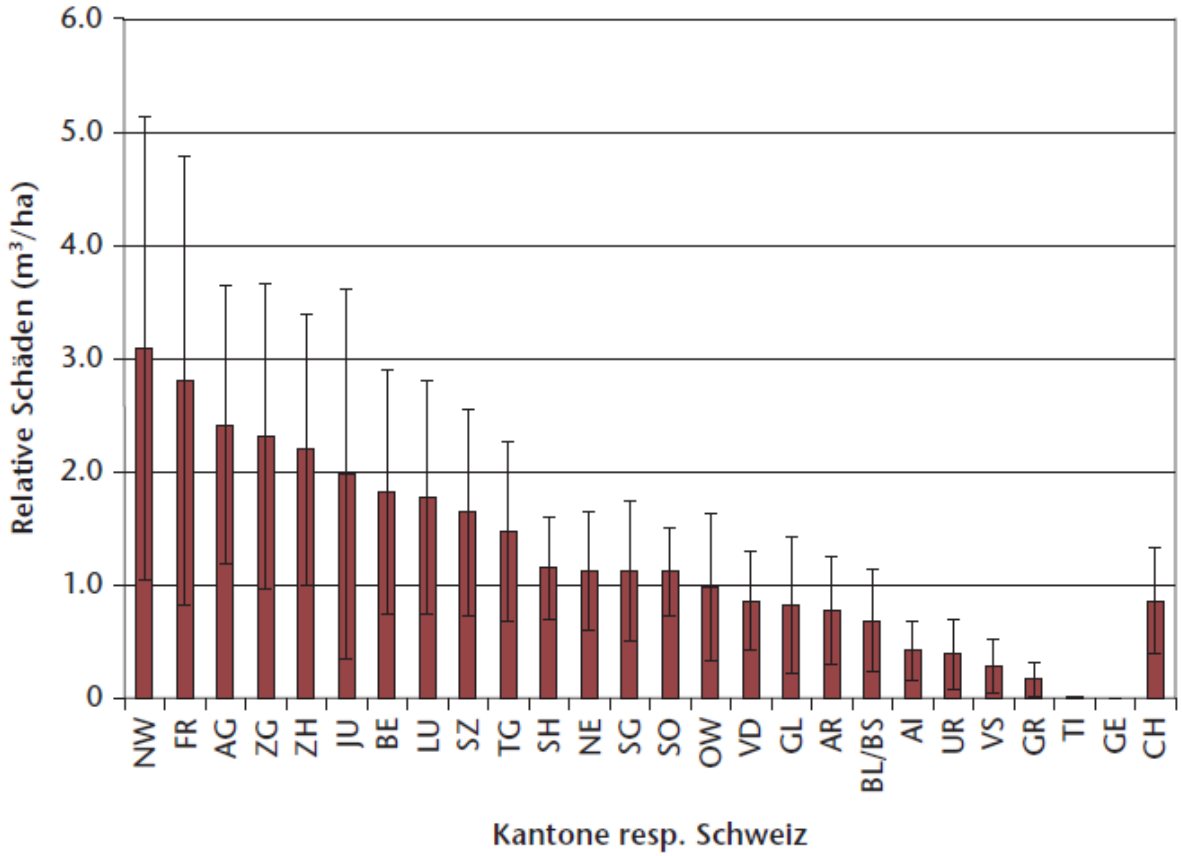


Abb 6.4.2: Relative Schäden (Schadholzvolumen pro Hektare Waldfläche) pro Kanton und für die Schweiz. Angegeben sind der Mittelwert und die Standardabweichung der 26 schweren Winterstürme (Schaden ≥ 70 000 m^3 je Ereignis) von 1865 bis 2014 in der Schweiz.

6.4.3. Windstärke und Schäden

Spitzenböen mit mehr als 30 m/s (108 km/h) wurden in Zürich am häufigsten zwischen 1980 und 2004 gemessen (Abb 6.4.3). Kleinere Frequenzen betreffen die Jahre 1935 bis 1979 sowie die letzten zehn Jahre (2005–2014). Nur selten wurden in den Jahren 1895 bis 1934 registriert. Der Zusammenhang zwischen Winddruck und Waldschaden im Kanton Zürich und in der gesamten Schweiz ist mit Korrelationskoeffizienten von r_{ZH}=0.60 und r_{CH}=0.63 jeweils signifikant (p_{ZH}=0.009, p_{CH}=0.002). Dabei sind

die Schadenmengen von Zürich mit jenen für die ganze Schweiz erstaunlich gut korreliert (r=0.97, p<0.001).

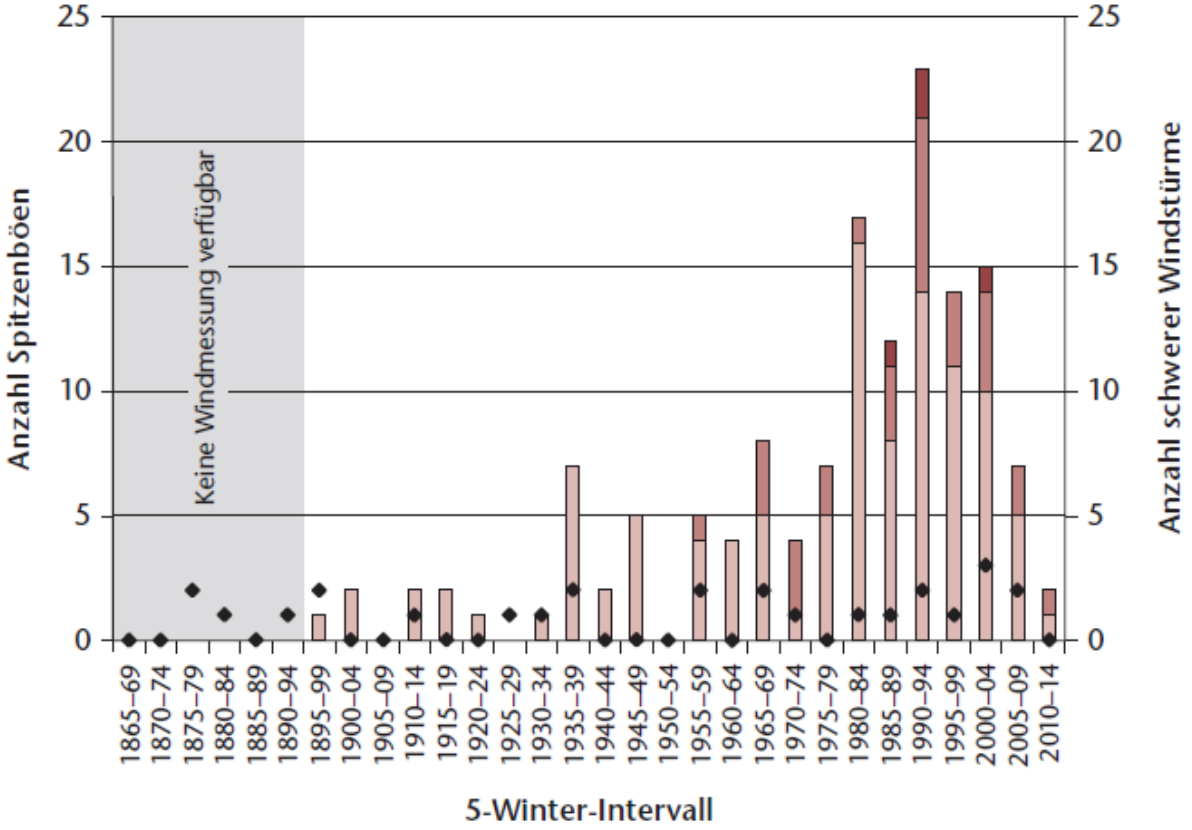


Abb 6.4.3: Anzahl täglicher Spitzenböen ≥30.0 m/s an der SwissMetNet-Station Zürich-Fluntern (ab Periode 1895–1899) und Anzahl schwerer Winterstürme (Schaden ≥ 70,000 m^3 je Ereignis; ab Periode 1865–1869) je 5-Jahres-Intervall.

6.4.4. Zeitliche Entwicklung der Sturmschäden

Im 5-Winter-Intervall 2000 (Winter 1999/2000) bis 2004 (Winter 2003/2004) zogen gleich drei schwere Winterstürme über den Schweizer Wald, was die grösste zeitliche Dichte an schweren Stürmen in den vergangenen 150 Jahren darstellt. In den übrigen 29 Intervallen wurden höchstens zwei derartige Ereignisse gezählt (Abb 6.4.3). Bezogen auf den Schadanteil am Vorrat (Abb 6.4.1), ergeben sich damit vier grosse Schadenereignisse in den letzten 150 Jahren: Winter 1879, 1967, 1990 (Vivian) und 2000 (Lothar).

6.5. Diskussion

6.5.1. Datenqualität

Ein zentraler Punkt in der vorliegenden Untersuchung ist die Qualität der Quellen, was sowohl die Ziel- als auch die Bezugsgrössen betrifft. Mit der gewählten Schwelle von mindestens 70 000 m^3 Schadholz pro Ereignis wurde ein Mass gewählt, welches über den ganzen Beobachtungszeitraum gesehen recht zuverlässige Angaben zum Schadholzvolumen geben dürfte. Insbesondere ist durch die Wahl einer hohen Untergrenze die Ungewissheit über die Dimension kleiner Schadenereignisse infolge fehlender Meldungen ausgeschaltet.

Dagegen sind die Angaben zu Schadanteilen und relativen Schäden mit grösseren Unsicherheiten behaftet, weil die Bezugsgrössen Vorrat und Waldfläche für die Zeit vor den Landesforstinventaren, d.h. von 1865 bis 1982, mit Metadaten modelliert (Vorrat) respektive mit den Werten des LFI1 (Waldfläche) angenähert wurden. Mit der getroffenen Annahme wird die Waldfläche vor 1983 deutlich überschätzt (Brändli 2000, Ginzler et al 2011) und damit der relative Schaden klar unterschätzt. Für die ältesten Sturmereignisse dürfte der relative Schaden entsprechend rund 30 bis 40% höher liegen.

Die Werte im Vorratsmodell von Kurz et al (1998) sind besonders für die frühen Jahre mit Vorsicht zu verwenden. So wurde als Startvorrat im Jahr 1800 ein Wert von 110 m^3/ha festgelegt, dies in Anlehnung an den Zustand skandinavischer Wälder vor 200 Jahren. Als nächster Referenzpunkt für das Kurz-Modell wurden die Werte 252 m^3/ha (1952) und 278 m^3/ha (1972) eingesetzt, den Publikationen von EIFJF (1954) und Ott (1972) folgend. Eine kritische Gegenüberstellung der Modellwerte nach Kurz et al (1998) mit gemessenen Vorräten vor 1952 ist nicht nur aufwendig, weil reale Werte mit grossem Aufwand recherchiert werden müssen, sie betrifft auch nur ausgesuchte Regionen oder Talschaften. Für 1925 geben Kurz et al (1998) zum Beispiel einen Wert von 202 m^3/ha an, der mit dem Wert von 188 m^3/ha bei Bürgi (1998) für das Zürcher Unterland und Weinland recht gut übereinstimmt. Dagegen eruierten Gimmi et al (2009) für das Alptal im selben Jahr 238 m^3/ha. Für die beiden Beispiele sind die Abweichungen der modellierten Vorratswerte erstaunlich gering.

Die Windmessreihe in Zürich kann als beste ihrer Art für die Schweiz betrachtet werden (Usbeck et al 2010a), und weltweit gibt es nur wenige ähnlich lange Reihen. Obwohl der Standort der Windmessanlage innerhalb von Zürich dreimal wechselte (vom ETH-Hauptgebäude zur MeteoSchweiz) und während der

langen Zeitspanne vier verschiedene Messgeräte zum Einsatz kamen, konnte aufgrund des gleichbleibenden Messprinzips (Schalenanemometer) und vieler verfügbarer Metadaten eine Homogenisierung der Datenreihe vorgenommen werden (Usbeck et al 2010a). Die homogenisierten Daten gleichen für die Periode von 1969 bis 1999 auch den Messreihen von deutschen Städten (Münchner Rück 2010). Die wenigen Spitzenböen ≥30 m/s in der ersten Hälfte der Untersuchungsperiode stehen auch im Einklang mit den festgestellten geringen Waldschäden durch Stürme.

6.5.2. Risiko von Wintersturmschäden

Winterstürme verursachten wiederholt Waldschäden, sowohl in der Schweiz als auch in Zentral- und Nordeuropa (Schelhaas et al 2003). Die vorliegende Untersuchung legt die Vermutung nahe, dass in den letzten Jahrzehnten die Waldschäden durch Winterstürme deutlich zugenommen haben. Die 150-jährige Aufzeichnung kann aber auch dahingehend interpretiert werden, dass zwischen 1880 und 1967 kaum grössere Schäden zu verzeichnen waren. Auf eine solche Katastrophenlücke, die im Übrigen auch für Überschwemmungen in der Schweiz zu beobachten ist, weist Pfister (1999, 2009) wiederholt hin. Bereits in früheren Zeiten gab es offensichtlich lange Perioden ohne Wintersturmschäden (Landolt 1861).

Vor dem Hintergrund langer Zeitreihen lassen sich die besonders prägenden Windwurfereignisse Vivian und Lothar besser einordnen. Eine Verwendung der Daten für Prognosen muss aber sehr sorgfältig erfolgen. Beispielsweise hätte eine lineare Extrapolation der Spitzenböen über den Studienzeitraum hinaus Werte um 60 m/s für die Wende vom 21. zum 22. Jahrhundert zur Folge, aber solche von lediglich 15 m/s für die Wende vom 18. zum 19. Jahrhundert. Dem höheren Wert entsprechen die maximalen Böenspitzen, die während Lothar gemessen wurden. Dagegen erreichen Nordwinde (Bise) während der Winterzeit oft Stärken von 15 m/s.

Die grossräumliche Verteilung des Schadenrisikos dürfte hingegen auch ausserhalb des Studienzeitraums Gültigkeit besitzen. Angesichts der grossen Regelmässigkeit der Zyklonbewegungen von West nach Ost, welche unsere Winterstürme letztlich produzieren (Seidl et al 2014b), dürften auch in Zukunft vor allem das schweizerische Mittelland und die nördlichen Voralpen von grösseren Sturmschäden betroffen sein, mit abnehmender Schadintensität gegen Osten (WSL & BUWAL 2001).

6.5.3. Schadholzmengen

Das Risiko für den Wald, von einem Wintersturm geschädigt zu werden, ist indes nicht nur vom Sturm, sondern auch von vielen anderen Faktoren abhängig (Hanewinkel et al 2015, dieses Heft), insbesondere von der Baumhöhe (Abb 6.5.1), mit der der stehende Vorrat stark korreliert ist. Am Anfang des Studienzeitraumes war dieses Risiko bei mittleren Vorräten von weniger als 150 m^3/ha (Kurz et al 1998) wesentlich geringer als heute, wo die Wälder im Durchschnitt einen Vorrat von 374 m^3/ha erreichen (Abegg et al 2014). Sowohl die absoluten als auch die relativen Schadholzmengen haben in den vergangenen 150 Jahren stark zugenommen (Usbeck et al 2010b), ein Trend, der nicht nur in der Schweiz, sondern auch in ganz Europa feststellbar ist (Schelhaas et al 2003). Das Ausbleiben rekordhoher Sturmschäden in den vergangenen 15 Jahren hat demzufolge damit zu tun, dass die Schweiz nur marginal von weiteren grossen Winterstürmen getroffen wurde (z.B. 2007 Kyrill und 2009 Quinten). Geringere Holzvorräte würden das Schadenpotenzial bei ähnlich hohen Windstärken wie während Lothar wohl deutlich reduzieren.

Unter Berücksichtigung extremer Windgeschwindigkeiten der vergangenen 150 Jahre (Brönnimann et al 2012) und der Ergebnisse aktueller Modellrechnungen (Della-Marta & Pinto 2009, Seidl et al 2014a) kann man davon ausgehen, dass Winterstürme im Schweizer Wald auch künftig schwere Schäden verursachen werden. Mechanische Belastungen, die aus Windgeschwindigkeiten von mehr als 40 m/s resultieren, liegen Beobachtungen zufolge allgemein jenseits der Wurf- beziehungsweise Bruchresistenz (Bock et al 2004, Wohlgemuth et al 2008). Derartige Belastungen traten im Studienzeitraum auf, und sie dürften sich in der Zukunft wiederholen.

Die Entwicklung der Wintersturmschäden widerspiegelt sich auch in der gesellschaftlichen Wahrnehmung. So wurden der Sturmschaden vom 20. Februar 1879 (570 979 m^3) als eigentliche Katastrophe dargestellt (Coaz 1880), der Sturmschaden vom 23. Februar 1935 (über 500 000 m^3) als die Lage der Forstwirtschaft und des Holzhandels sowie die Nachhaltigkeit ungünstig beeinflussend (EIFJF 1936) und der Sturmschaden vom 27. November 1983 (550 000 m^3) als zu grösseren Schwierigkeiten auf dem bereits überlasteten Nadelindustrieholzmarkt führend (Anonymus 1984). Die Schäden des Orkans Vivian im Jahre 1990 wurden schliesslich als die schwersten bezeichnet, die in der Schweiz bis dahin beobachtet wurden. Heute werden Schäden als von nationaler Bedeutung betrachtet, wenn sie sich im Bereich einer durchschnittlichen Jahresnutzung bewegen (BAFU 2008). Dieses Kriterium erfüllen gerade noch die Orkane Vivian und Lothar.

Abb 6. 5.1: Ein in einem Wintersturm geknickter Einzelbaum. Foto: Heinz Jost

6.6. Folgerungen

Winterstürme sind in Europa wiederkehrende Ereignisse, die vom meteorologischen Standpunkt her als nichts Aussergewöhnliches zu betrachten sind. Dass die Schweiz in den letzten Jahren von schweren Wintersturmschäden verschont blieb, bedeutet nicht, dass die Windstärke der Stürme abgenommen hat. Vielmehr zogen die Sturmzentren zum überwiegenden Teil nördlich der Schweiz vorbei.

Durch die besondere Topografie der Schweiz werden die Inner- und Südalpen weniger von Winterstürmen heimgesucht. Mit Ausnahme von Vivian sind alle schweren Winterstürme von West nach

Ost gezogen und von den nördlichen Voralpen am Eindringen in die inneren und südlichen Alpenteile gehindert worden, wobei das untere Rhonetal weniger stark geschützt war als beispielsweise die Täler des Vorder- und Hinterrheins. Vorratsreiche Wälder entlang des Alpennordhangs, im Jura und besonders im Mittelland dürfen dementsprechend als am stärksten windwurfgefährdet betrachtet werden.

Der Holzvorrat nimmt in vielen Regionen in der Schweiz weiterhin zu (Abegg et al 2014). Davon kann abgeleitet werden, dass das Schadholzvolumen durch Winterstürme, sofern sie diese Regionen treffen, nicht abnehmen, sondern zunehmen dürfte (Seidl et al 2014a). Eine Vorratsminderung, zum Beispiel durch kürzere Umtriebszeiten, dürfte sich auf die Schadholzmengen günstig auswirken, würde aber wohl anderen Interessen wie denjenigen des Natur- und Landschaftsschutzes zuwiderlaufen.

6.7. Literatur

Abegg M, Brändli UB, Cioldi F, Fischer C, Herold-Bonardi A et al (2014) Viertes Schweizerisches Landesforstinventar – Ergebnistabellen und Karten im Internet zum LFI 2009–2013 (LFI4b). Birmensdorf: Eidgenöss Forsch.anst WSL. www.lfi.ch/resultate (4.3.2015).

Anonymus (1984) Abfluss von Nadelindustrieholz beschleunigen. Wald Holz 54: 399–400.

BAFU (2008) Sturmschaden-Handbuch. Vollzugshilfe für die Bewältigung von Sturmschadenereignissen von nationaler Bedeutung im Wald. Bern: Bundesamt Umwelt, Umwelt-Vollzug 0801. 241 p.

Bengtsson L, Hodges KI, Keenlyside N (2009) Will extratropical storms intensify in a warmer climate? J Clim 22:2276–2301.

Bock J, Vinkler I, Duplat P, Renaud JP (2004) Stabilité au vent des hêtraies: les enseignements de la tempête de 1999. Forêt Entreprise 156: 34–38.

Booth JF, Wang SG, Polvani L (2013) Midlatitude storms in a moister world: lessons from idealized baroclinic life cycle experiments. Clim Dyn 41: 787–802.

Brändli UB (2000) Waldzunahme in der Schweiz – gestern und morgen. Birmensdorf: Eidgenöss Forsch.anstalt WSL, Inf.bl Forsch.bereich Landsch 45: 1–4.

Brändli UB (2010) Schweizerisches Landesforstinventar. Ergebnisse der dritten Erhebung 2004–2006. Birmensdorf: Eidgenöss Forsch.anstalt WSL. 312 p.

Brassel P, Brändli UB (1999) Schweizerisches Landesforstinventar. Ergebnisse der Zweitaufnahme 1993–1995. Bern: Haupt. 442 p.

Brönnimann S, Martius O, von Waldow H, Welker C, Luterbacher J et al (2012) Extreme winds at northern mid-latitudes since 1871. Meteorol Z 21: 1327.

Burningham H, French J (2013) Is the NAO winter index a reliable proxy for wind climate and storminess in northwest Europe? Int J Climat 33: 2036–2049

Coaz J (1880) Die Stürme vom 20. Februar, 25. Juni und 5. Dezember 1879 und der durch dieselben in den Waldungen der Schweiz verursachte Schaden. Bern: Jenet & Reinert. 57 p.

Della-Marta PM, Pinto JG (2009) Statistical uncertainty of changes in winter storms over the North Atlantic and Europe in an ensemble of transient climate simulations. Geophys Res Lett 36, L14703.

Donat MG, Leckebusch GC, Wild S, Ulbrich U (2011a) Future changes in European winter storm losses and extreme wind speeds inferred from GCM and RCM multi-model simulations. Nat Hazards Earth Syst Sci 11: 1351–1370.

Donat MG, Renggli D, Wild S, Alexander LV, Leckebusch GC et al (2011b) Reanalysis suggests long-term upward trends in European storminess since 1871. Geophys Res Lett 38: 1–6.

EAFV (1988) Schweizerisches Landesforstinventar: Ergebnisse der Erstaufnahme 1982–1986. Birmensdorf: Eidgenöss Anst Forstl Vers.wes, Ber 305. 375 p.

EIFJF (1936) Schweizerische Forststatistik 1935. Bern: Eidgenössisches Statistisches Amt, Schweizerische Forststatistik 10: 1–24.

Forster B, Meier F (2008) Sturm, Witterung und Borkenkäfer. Birmensdorf: Eidgenöss Forsch.anstalt WSL, Merkbl Prax 44. 88 p.

Ginzler C, Brändli UB, Hägeli M (2011) Waldflächenentwicklung der letzten 120 Jahre in der Schweiz. Schweiz Z Forstwes 162: 337–343

Hanewinkel M, Albrecht A, Schmidt M (2015) Können Windwurfschäden vermindert werden? Eine Analyse von Einflussgrössen. Schweiz Z Forstwes 166: 118–128

Kurz D, Alveteg M, Sverdrup H (1998) Acidification of Swiss forest soils. Development of a regional dynamic assessment. Bern:. Swiss Agency for the environment, Forests and Landscape (SAEFL), Environmental Documentation 89. 115 p.

Landolt E (1861) Witterungserscheinungen im Jahr 1860 und deren Einfluss auf die Vegetation und die Waldarbeiten. Schweiz Z Forstwes 11: 29–33.

Landolt, E (1862) Bericht an den hohen schweizerischen Bundesrath über die Untersuchung der schweiz. Hochgebirgswaldungen, vorgenommen in den Jahren 1858, 1859 und 1860. Bern: Fiala. 367 p.

Mitchell SJ (2013) Wind as a natural disturbance agent in forests: a synthesis. Forestry 86: 147–157

Pfister C (1998) Raum-zeitliche Rekonstruktion von Witterungsanomalien und Naturkatastrophen 1496–1995. Zürich: VDF. 140 p.

Pfister C (1999) Wetternachhersage – 500 Jahre Klimavariationen und Naturkatastrophen (1496–1995). Bern: Haupt. 304 p.

Pfister C (2009) Die «Katastrophenlücke» des 20. Jahrhunderts und der Verlust traditionalen Risikobewusstseins. Gaia 1:, 239–246.

Schelhaas, M. J., G. J. Nabuurs, et al (2003) Natural disturbances in the European forests in the 19th and 20th centuries. Gl Ch Biol 9: 1620-1633.

Seidl R, Rammer W, Blennow K (2014a) Simulating wind disturbance impacts on forest landscapes: Tree-level heterogeneity matters. Environ Modell Softw 51: 1–11.

Seidl R, Schelhaas MJ, Rammer W, Verkerk PJ (2014b) Increasing forest disturbances in Europe and their impact on carbon storage. Nat Clim Chang 4: 806–810.

Usbeck T, Wohlgemuth T, Pfister C, Volz R, Beniston M (2010a) Wind speed measurements and forest damage in Canton Zurich (Central Europe) from 1891 to winter 2007. Int J Climat 30: 347–358.

Usbeck T, Wohlgemuth T, Dobbertin M, Pfister C, Bürgi A et al (2010b) Increasing storm damage to forests in Switzerland from 1858 to 2007. Agric For Meteorol 150: 47–55.

Wohlgemuth T, Conedera M, Kupferschmid Albisetti A, Moser B, Usbeck T et al (2008) Effekte des Klimawandels auf Windwurf, Waldbrand und Walddynamik im Schweizer Wald. Schweiz Z Forstwes 159: 336–343

WSL, BUWAL, editors (2001) Lothar. Der Orkan 1999. Ereignisanalyse. Birmensdorf: Eidgenöss Forsch.anstalt WSL. 365 p.

7. Generelle Diskussion und Schlussfolgerungen

7.1. Allgemeiner Überblick

Stürme waren die Ursache der schadenreichsten Naturgefahren für Europas Wälder (Schelhaas et al., 2003). Voraussetzung für die schwersten Stürme in Europa sind Zyklonen der mittleren Breiten (Exner, 1925; Kraus und Ebel, 2003). Sie entstehen durch das Zusammentreffen warmer Luftmassen aus dem Süden sowie kalter Luftmassen aus dem Norden und können zu Stürmen führen, die in der Lage sind, Schäden über Hunderttausende Quadratkilometer verteilt zu verursachen (Schüepp, 1995; WSL und BUWAL, 2001). Es wird für die nordatlantisch-europäische Region erwartet, dass die Häufigkeit und Intensität von Mittelbreitenzyklonen zunimmt (Ranson et al., 2014). Dazu gehört auch eine Ausdehnung des Zeitraums zu erwartender schwerer Stürme insbesondere über Westeuropa in den Herbst. Die Ursache dafür liegt in höheren Temperaturen des Nordatlantiks, der zu Frontalzyklonen transformierten tropischen Stürmen zunehmend häufiger ermöglichen wird, Europa zu erreichen (Baatsen et al., 2015). Wenn die Luftfeuchte in einer wärmeren Welt zunimmt, dann sind in den mittleren Breiten stärkere Stürme mit tieferen Kerndrücken, höheren bodennahen Windgeschwindigkeiten und intensiveren Niederschlägen zu erwarten (Booth et al., 2013). Die Zugbahnen der Mittelbreitenzyklonen verschoben sich seit Ende des 19. Jahrhunderts in nördliche Richtung (Schiesser et al., 1997b) und dürften diesen Trend künftig beibehalten (Pinto et al., 2007; Pinto et al., 2009; Champion et al., 2011; Seland Graf und LaCoste, 2012; Hartmann et al., 2013). Ein Review aktueller Veröffentlichungen zu Klimawandel-Studien unter Einschluss des künftigen Sturmgeschehens in der nordatlantisch-europäischen Region erbrachte, dass für Mitteleuropa –und damit auch die Schweiz- grossmehrheitlich zunehmendes Sturmgeschehen prognostiziert wurde (Mölter et al., 2016). Dabei konnte dort kein klares Resultat zu Änderungen der Zyklonenaktivität gefunden werden.

Für die Entwicklung der europäischen Wälder wurde bereits eine Zunahme der natürlichen Störungen seit der Mitte des 19. Jahrhunderts festgestellt (Schelhaas et al., 2003; Seidl et al., 2009). Es können damit zum Beispiel Wälder als Kohlenstoffsenken geringere Effekte erzielen als erwartet, was umso stärker zum Tragen kommt je älter die Bestände werden (Fortin et al., 2014). Zunehmende Störungen können somit insbesondere dort die Kohlenstoffbilanz negativ beeinflussen wo heute schon ein natürliches Gleichgewicht zwischen Akkumulation und Freisetzung herrscht (Gimmi et al., 2009). Das träfe die eher vorratsreichen Wälder der Schweiz (Abegg et al., 2014) besonders stark. Schweizweit gesehen hat das bisher schwerste Sturmschadereignis im Wald zu Verlusten am stehenden Vorrat geführt, die etwas mehr als den jährlichen Zuwachs umfassten (BUWAL und WSL, 2005).

Untersuchungen von Sturmschadereignissen ergaben differenzierte Resultate über die ermittelten Variablen, die das Ausmass der Schäden massgeblich beeinflussten. So wurden in ausgewählten einschlägigen Studien, insbesondere neuere Veröffentlichungen bzw. die Schweiz betreffende Studien (Bazzigher und Schmid, 1969; Kuhn, 1995; Braun et al., 2003; Dobbertin, 2005; Mayer et al., 2005; Schindler et al., 2009; Schmidt et al., 2010; Klaus et al., 2011; Valinger und Fridman, 2011; Albrecht et al., 2012; Mikita et al., 2012; Schindler et al., 2012; Albrecht et al., 2013; Bonnesoeur et al., 2013; Jelonek et al., 2013; Waldron et al., 2013; Hanewinkel et al., 2014; Seidl et al., 2014a; Wallentin und Nilsson, 2014), insgesamt 28 verschiedene Standorts- und Bestandesparameter als wesentlich ermittelt. Hinzu kam, dass bei Studien zu unterschiedlichen Ereignissen in einander überlappenden Schadgebieten verschiedene Parameter als Hauptmerkmale der Schäden übereinstimmend identifiziert wurden, allerdings teilweise in unterschiedlicher Ausprägung (Holenstein, 1994; Kuhn, 1995; Dobbertin, 2005). Ausserdem wurde in einigen Studien auf mögliches Fehlen einflussreicher Grössen verwiesen, was auf die Resultate entsprechende Auswirkungen haben konnte (Hollenstein, 2002; Dobbertin, 2005; Hanewinkel et al., 2014).

Aufgrund der Vielfalt der bisherigen Ergebnisse und des bekannten Sturmschadrisikos der Schweizer Wälder (Bütikofer, 1987; Holenstein, 1994; Kuhn, 1995; Schmidtke und Scherrer, 1997; WSL und BUWAL, 2001; Indermühle et al., 2005) bestand Interesse an einer weiteren Untersuchung zu generellen Hauptursachen und der generellen räumlichen Verteilung von Sturmschäden in den Wäldern der Schweiz. Die hier vorgelegte Studie (Usbeck et al., 2010a; Usbeck et al., 2010b; Usbeck et al., 2012; Usbeck, 2015) wurde angefertigt, um Beiträge in beiden Hinsichten für Wintersturmschäden zu leisten. Sie basierte auf einem historisch-räumlichen Ansatz innerhalb der angewandten Klimatologie. Für die räumliche Auflösung wurde die Ebene der Kantone gewählt. Zudem wurden in Fallstudien andere räumliche Einheiten verwendet.

Vorhandene historische Untersuchungen zur räumlichen Verteilung von Sturmschäden im Wald betrafen Gebietseinheiten grösser als Kantone (Bütikofer, 1987; Schelhaas et al., 2003), relativ kleine Gebiete innerhalb der Schweiz (Gimmi et al., 2009; Hanewinkel et al., 2014) oder nicht die Schweiz (Nilsson et al., 2004; Hanewinkel et al., 2008; Changnon, 2009). Ausserdem wurden dort Sturmschäden allgemein untersucht, wogegen die hier vorgelegte Studie auf Wintersturmschäden fokussierte. Wie sich beim Schadgeschehen über einen Zeitraum von mehr als 100 Jahren die beobachteten Schäden zum gemessenen Wind verhielten, konnte bis dahin für die Schweiz noch nicht näher untersucht werden (Schiesser et al., 1997a). Die Resultate der hier vorgelegten Studie (Usbeck et al., 2010a) zeigten, dass in der Vergangenheit eine Zunahme sowohl der Häufigkeit und Schwere von Wintersturmereignissen als

auch der Windgeschwindigkeiten und der stehenden Vorräte stattgefunden hat. Zudem waren die beobachteten schweren Wintersturmschäden im Untersuchungszeitraum nicht gleichmässig über die Schweiz verteilt sondern konzentrierten sich auf die Kantone im Mittelland und in den Voralpen (Usbeck, 2015). Den engsten Zusammenhang mit den Sturmschäden zeigten die Windspitzen (Usbeck et al., 2010b; Usbeck et al., 2012).

7.2. Quellenkritik

7.2.1. Datenherkunft

Die Arbeit mit historischen Daten brachte verschiedene Aspekte mit sich, die sich von der Arbeit mit zielgerichtet neu erhobenen oder simulierten Daten unterschieden. Insbesondere betraf dies in mehrerlei Hinsicht die Herkunft der Daten selbst. Sofern keine speziellen Ursachen dem entgegenstanden, war die Verwendung der originalen oder original publizierten Daten die beste Lösung, da Übertragungsfehler nicht möglich waren bzw. in geringstmöglichem Umfang vorlagen (Bütikofer, 1987). Eine Ausnahme waren homogenisierte Datensätze. Sie stellten bereits fertig aufbereitete Datenreihen dar (Begert et al., 2005; Füllemann et al., 2011). Bei solchen Daten war lediglich die Gültigkeit der Homogenisierung zu prüfen (Winkler, 2009).

Zunächst war es zu Beginn einer auf historischen Daten beruhenden Studie nicht unbedingt sicher, ob die für den angestrebten Zweck notwendigen Daten und Metadaten überhaupt (noch) existierten (Pfister, 1998). Konnten Daten verfügbar gemacht werden, so stellte sich die Frage nach ihrer Qualität. Historische Daten sollten darum aus möglichst glaubwürdigen Quellen stammen (WSL und BUWAL, 2001). Dafür eigneten sich allgemein Aufzeichnungen und Publikationen öffentlicher Verwaltungen sowie der ihnen angeschlossenen Einrichtungen, weil für die Schweiz traditionell gut funktionierende Verwaltungen angenommen werden konnten (Bütikofer, 1987). Hohe Datenqualität durfte man auch von Publikationen in Fachorganen erwarten, wie z.B. der Schweizerischen Zeitschrift für Forstwesen. Als seriös bekannte Tageszeitungen wie die Neue Zürcher Zeitung und der Tages-Anzeiger wurden auch als glaubwürdig eingestuft und für die Studie insbesondere in solchen Fällen herangezogen, wenn eine Herkunft der Daten aus offiziellen Quellen wie Verwaltungseinheiten der Kantone bzw. des Bundes

erkennbar war. Die in der Studie verwendeten Daten entstammten ausschliesslich aus solchen, und damit als glaubwürdig eingestuften, Quellen.

Von grossem Vorteil für die Studie war, dass das Untersuchungsgebiet, die Schweiz, ihre Kantone und die Forstkreise des Kantons Zürich, innerhalb des Untersuchungszeitraums weitestgehend stabile Gebietsunterteilungen aufwiesen. Das bedeutete, dass die Daten sich über den Untersuchungszeitraum auf vergleichbare räumliche Herkünfte bezogen, wobei die Gründung des Kantons Jura im Jahr 1979 zu berücksichtigen war. Damit war es möglich, die zusammengetragenen Daten in einen sachlichen Zusammenhang zueinander zu bringen.

Ein ungelöstes Problem musste aber bleiben, dass für die Daten sowohl zu Sturmschaden als auch Waldfläche und Vorrat mit Ausnahme der LFI-Daten (EAFV, 1988; Brassel und Brändli, 1999; Brändli, 2010; Abegg et al., 2014) kaum Metainformationen, wie Aufnahmeanleitungen, gefunden werden konnten (Brändli, 2000; Ginzler et al., 2011). Darum wurden alle nicht auf die LFI zurückführbaren Daten zu Waldfläche und Vorrat sowie die Sturmschadendaten unter der Annahme der jeweiligen Vergleichbarkeit verwendet. Für die Daten der LFI lag Vergleichbarkeit vor (Abegg et al., 2014).

7.2.2. Sturm- und Schadendaten

Es wurden für die Artikel 1, 2 und 4 (Usbeck et al., 2010a; Usbeck et al., 2010b; Usbeck, 2015) Daten der Schadvolumen von Forstkreisen des Kantons Zürich, Kantonen und der Schweiz aus zeitgenössischen Publikationen verwendet. Für die Auswertungen in Artikel 3 (Usbeck et al., 2012) standen die luftbildgestützt erhobenen Schadflächen der Inventare zu den Orkanen „Vivian“ und „Lothar“ zur Verfügung. Homogenisierte Daten lagen nicht vor. Metadaten, wie eigentliche Aufnahmeanleitungen zur Ermittlung der Schäden der jeweiligen Sturmereignisse, konnten nicht gefunden werden.

Grosse Sturmholzmengen haben den Markt in der Vergangenheit temporär zuungunsten der Holzanbieter verändert (Holenstein, 1994; Raetz, 2004). Das konnte ein Motiv darstellen, zu geringe Schadendaten zu veröffentlichen (Bütikofer, 1987). Andererseits konnten Erwartungshaltungen bezüglich Unterstützungsleistungen (Holenstein, 1994; Raetz, 2004) dazu führen, Schadmengen zu hoch anzugeben. Trotzdem wurde von einer ausreichenden Glaubwürdigkeit der vorgefundenen Daten ausgegangen. Ein Indiz für eine hinreichende Datenqualität ist die in der Schweiz bereits in den 1870er Jahren eingeführte und in den Folgejahren wirksam gewordene Pflicht der Anstellung von Forstbeamten mit eidgenössischem Wählbarkeitszeugnis auf kantonalem Level (EOFI, 1878-1994). Darum wurden die

vor allem in kantonalen Rechenschaftsberichten oder Veröffentlichungen des Schweizer Bundes herausgegebenen Daten so verwendet wie publiziert. Die Schadflächeninventare wurden jeweils nach einheitlichen Kriterien durch geschultes Personal erhoben und waren damit glaubwürdig.

Die verwendeten Sturmdaten, die qualitativen Daten der Sturmbeschreibungen, basierten auf der MeteoSchweiz als Quelle. Sie wurden regulären oder speziellen Berichten derMeteoSchweiz, oder in der Fach- und Tagespresse widergegebenen Witterungs- und Wetterberichten entnommen. Stichprobenartige Vergleiche mit Messwerten homogener Klimareihen bestätigten die publizierten Angaben. Die qualitativen Daten wurden deshalb so verwendet wie veröffentlicht.

7.2.3. Walddaten

Zur Waldfläche der Schweiz lagen verschiedene Angaben aus unterschiedlichen Quellen vor, von denen aber Keine über den gesamten Untersuchungszeitraum verfügbar war. Zudem ging der Kenntnisstand zu den jeweiligen Erhebungen besonders für das 19. und frühe 20. Jahrhundert eher dahin, dass die forstflächen-bezogenen Statistiken nicht zu allen Zeiten gleich hohe Genauigkeiten aufwiesen (Flury, 1925). Gleichzeitig war Wald als ein bedeutender Anteil der Landesfläche und zudem Herkunft der wirtschaftlich wichtigen Ressource Holz (BUWAL und WSL, 2005) und nicht zuletzt hinsichtlich des Aufkommens an Steuern und anderen Leistungen von gesellschaftlichem und verwaltungstechnischem Interesse (Ritzmann-Blickenstorfer, 1998). Darum wurden bereits vor der Gründung des heutigen Schweizerischen Bundesstaates statistische Erhebungen durchgeführt, die auch die Waldfläche betrafen (Franscini, 1829; Franscini, 1848; Franscini, 1851). Anfangs des 20. Jahrhunderts war die Waldvermessung der Grundbuchvermessung zwar voraus (Flury, 1925), doch ergab diese Form der Walderfassung eine Jahrzehnte dauernde Annäherung an die reale, in stetiger Veränderung befindliche, Waldfläche. Neuere Auswertungen von flächendeckend vorhandenem Kartenmaterial gaben Grund zur Annahme, dass in frühen offiziellen Statistiken die Waldfläche unterschätzt wurde (Ginzler et al., 2011). Da Homogenisierungen nicht möglich waren, wurden nur eine mathematische Glättung vorgenommen, um Ausreisser abzumildern.

Der Vorrat wurde erstmals für die ganze Schweiz zum LFI1 ermittelt (EAFV, 1988). Frühere Erhebungen erstreckten sich nur auf bestimmte Eigentumsformen der Wälder (EIFJF, 1954), erfassten nur Teile des Untersuchungsgebiets (Weber, 1867) oder es erfolgten keine entsprechenden Feldaufnahmen (Ott, 1972). Die Entwicklung der historischen stehenden Vorräte der Schweizer Wälder wurde aber modellhaft

nachvollzogen (Kurz et al., 1998). Die Verwendung von anderen Vorratsdaten als denen vom LFI barg Unsicherheiten in sich (Kurz et al., 1998). Da das LFI nur einen relativ kurzen Abschnitt des Untersuchungszeitraums betraf, in früheren Studien aber weit geringere Vorräte berichtet wurden (Weber, 1867; EIFJF, 1954; Ott, 1972), wurden für den Zeitraum vor dem LFI der modellierte Vorrat und die Interpolation zwischen den Untersuchungsresultaten als optimale Annäherung angenommen.

7.2.4. Winddaten

Die Messung des Windes stellte sich gegenüber der anderer meteorologischer Elemente als schwierig dar (Hann, 1869; Schüepp, 1950; WMO, 2006). Eine Ursache dafür war die hohe räumliche Variabilität, die durch Umgebungseinflüsse zudem abgewandelt werden konnte. Deswegen waren sowohl bei der Messung als auch Bearbeitung besondere Sorgfalt vonnöten (Maurer et al., 1909; Schüepp, 1973). Windstärkeschätzungen bargen den Nachteil der Subjektivität, die zur Folge hatte, dass für starken Wind eine generellen Neigung zur Überschätzung festgestellt wurde (Clemmensen et al., 2014). Darum wurden für die hier präsentierte Studie nur Windgeschwindigkeitsmessungen einbezogen. Es wurden ausschliesslich Daten der MeteoSchweiz verwendet, um eine bestmögliche Qualitätssicherheit zu gewährleisten. Aus Gründen der Verfügbarkeit wurden Daten der Windspitzen teilweise aus meteorologischen bzw. forstlichen Publikationen oder der Tagespresse entnommen.

Mit einem Messbeginn von 1872 und der Datenverfügbarkeit ab 1891 dürfte es sich bei den Windmess-Reihen der MeteoSwiss-Messstation Zürich um aussergewöhnlich lange und bis heute aktive kontinuierliche Windmessungen gehandelt haben. Überdies galt die Station Zürich wegen ihrer Lage als repräsentativ für einen grossen Teil des Schweizer Mittellandes (Uttinger, 1968; Schiesser et al., 1997b). Eine früher beginnende Messreihe, auch mit länger zurück reichender Verfügbarkeit der originalen Aufzeichnungen, war in Bern vorhanden. Diese Reihe brach aber wegen einer Stationsverlagerung 1979 ab und war damit nicht verwendbar. Homogene Winddaten, die historische Daten einschliessen, wurden von der MeteoSchweiz nicht zur Verfügung gestellt (Füllemann et al., 2011).

Die verfügbaren Rohdaten der Züricher Wind-Messreihen konnten nicht als homogen eingestuft werden. Durch die in ausreichendem Masse publizierte Metadaten (Hann, 1869; Billwiller, 1893; Hann, 1901; Hann, 1906; ZWC, 1912; Hann und Süring, 1926; Noetzlin, 1941; Hann und Süring, 1951; Uttinger, 1968; Schiesser et al., 1997b) sowie unveröffentlichte Unterlagen der MeteoSchweiz in Zürich, insbesondere dem Auszug aus der Stationsgeschichte, und Parallelmessungen war es aber möglich, eine starkwind-

bezogene Homogenisierung für die Zwecke der Studie vorzunehmen. Ohne dies wäre eine Verwendung der Winddaten kaum sinnvoll möglich gewesen (Auer et al., 2007; Matulla et al., 2008).

7.2.5. Temperatur- und Niederschlagsdaten

Es wurden ausschliesslich Daten aus Datenquellen der MeteoSchweiz verwendet. Sowohl für Temperatur als auch Niederschlag waren homogenisierte Datenreihen ab 1864 bereits zu Beginn der hier vorgelegten Studie vorhanden (Begert et al., 2005). Später wurde eine neue Homogenisierung publiziert (Füllemann et al., 2011), die eine grössere Anzahl von Temperatur- und Niederschlagsmessreihen beinhaltete und in drei Fällen, Basel, Genf und Grand St. Bernard, bis vor 1864 zurück reichende Zeiträume umfasste. Da bei Erscheinen dieser neuen Homogenisierung die Hauptarbeiten zum Bereich Temperatur und Niederschlag im hier präsentierten Projekt bereits abgeschlossen (Usbeck et al., 2010a) waren musste darauf verzichtet werden, die neue Homogenisierung zu verwenden. Dieser Umstand sollte unproblematisch gewesen sein, da kein Hinweis auf eine etwaige Ungültigkeit der hier verwendeten Homogenisierung gefunden werden konnte.

Qualitative Angaben zu Temperatur und Niederschlag wurden ereignisbezogen gesammelt, wobei als Originalquelle nur die MeteoSchweiz berücksichtigt wurde, auch wenn deren Publikation z.B. in der Tagespresse stattfand. Diese Informationen wurden zur Abschätzung des Standortseigenschaft Bodenzustand hinsichtlich Durchfeuchtung und Gefrorenheit verwendet. Stichprobenartige Vergleiche mit Temperatur- und Niederschlagsmessungen bestätigten die Informationen aus den Wetter- und Witterungsberichten. Aus den Bodentemperatur-Messreihen der Langfristigen Waldökosystemforschung (LWF) der Eidg. Forschungsanstalt WSL ging hervor, dass in geschlossenen Beständen der dort untersuchten Schweizer Wälder unter heutigen Klimabedingungen der Wurzelbereich der Bäume nicht durchfror. Dieser Umstand dürfte entsprechend der Temperaturentwicklung bereits seit Beginn der Aufzeichnungen der MeteoSchweiz 1864 der Fall gewesen sein (M. Dobbertin, 2012, mündliche Mitteilung). Damit waren die Ergebnisse dieser Studie (Usbeck et al., 2010a) in Übereinstimmung mit den Erkenntnissen aus der LWF.

7.3. Artikel 1

7.3.1 Waldentwicklung und Wintersturm-Schadereignisse

Die Waldflächen wurden für verschiedene Statistiken erhoben. Soweit in der hier vorgestellten Studie als auch in Brändli (2000) für die Waldflächen dieselben Quellen benutzt wurden, waren die Ergebnisse naturgemäss identisch und belegten eine Zunahme um 63 % (Usbeck et al., 2010a). Geringere Waldflächenzunahmen seit dem späten 19. Jahrhundert ermittelten Ginzler et al. (2011). Diese drei Studien zeigten aber übereinstimmend eine deutliche Zunahme der Waldfläche der Schweiz seit der 2. Hälfte des 19. Jahrhunderts. Der stehende Vorrat nahm im Studienzeitraum um 293 % zu (Usbeck et al., 2010a).

Das Verfahren zur Erhebung der historischen Daten zu Sturmschäden (Usbeck et al., 2010a) ähnelte dem in einer vorangegangenen Studie Beschriebenen (Bütikofer, 1987). Die hier vorgestellte Untersuchung (Usbeck et al., 2010a) war aber auf Winterstürme spezialisiert, mit Schwerpunkt auf schwere Ereignisse, umfasste die ganze Schweiz, und reichte bis in die jüngere Vergangenheit. Zudem wurden für die Auswertungen unterschiedliche räumliche Einheiten gewählt. Eine direkte Vergleichbarkeit der Resultate beider Studien war damit nicht gegeben. Allerdings zeichnete sich ab, dass in beiden Studien für Teile des Mittellandes und der Voralpen eher mehr, den Jura und die westlichen Inneralpen dem gegenüber tendenziell geringere Schäden gefunden wurden. Für rund die Hälfte der Fläche der Schweiz waren Vergleiche nicht möglich, da in Bütikofer (1987) für diese Gebiete keine Resultate dargestellt waren.

Schiesser et al. (1997b) stellten fest, dass die Häufigkeit von Wintersturmereignissen seit Ende des 19. Jahrhunderts abnahm. Dem widersprach die Zunahme der Wintersturm-Schadereignisse nicht, die in der hier vorgelegten Studie festgestellt wurde (Usbeck et al., 2010a). Berücksichtigte man die Vorrats- (EAFV, 1988; Kurz et al., 1998; Brassel und Brändli, 1999; Brändli, 2010; Usbeck et al., 2010a; Abegg et al., 2014) und Flächenentwicklung der Wälder der Schweiz, gleich ob nach Brändli (2000), Usbeck et al. (2010a) oder Ginzler et al. (2011), so konnte in neuerer Zeit viel mehr Wald geschädigt werden als noch vor über 100 Jahren. Ältere Bestände waren gegenüber jüngeren allgemein nicht nur vorratsreicher sondern auch höher und anfälliger für Sturmschäden, wie z.B. Schelhaas et al. (2010), Valinger und Fridman (2011) und Albrecht et al. (2012) ermittelten. Dazu kam, dass bei einem Nordwärtstrend der Sturmbahnen (Hartmann et al., 2013) die Häufigkeit und Intensität von Mittelbreitenzyklonen zunahm (Ranson et al., 2014), oder bei reduzierter Anzahl von Zyklonen die Häufigkeit extremer Zyklonen stieg (Ulbrich et al.,

2009). Somit kann sich künftig durchaus der Effekt einstellen, dass bei selteneren Wintersturmereignissen die Häufigkeit und Schwere der Schäden zunimmt. Andererseits wurde für Mittel-, Nord- und Westeuropa auch eine Zunahme des Sturmgeschehens seit 1871 (Donat et al., 2011) und für die Zukunft in Mitteleuropa in der überwiegenden Mehrheit einschlägiger aktueller Studien publiziert (Mölter et al., 2016), was einen direkten Zusammenhang zur beobachteten Zunahme der Häufigkeit und Schwere der Wintersturmschäden in der Schweiz bedeutete.

7.3.2. Zustand des Waldbodens während Wintersturmereignissen

Die Standortseigenschaft Bodenzustand wurde dahingehend untersucht, ob der Boden zu den Zeitpunkten der Sturmereignisse gefroren oder ungefroren bzw. stark durchfeuchtet oder nicht stark durchfeuchtet war, was zu Resultaten von 96 % ungefrorenem und 96 % stark durchfeuchtetem Boden führte (Usbeck et al., 2010a). Dazu wurden Witterungsberichte ausgewertet und die Resultate stichprobenartig anhand von homogenen Niederschlags- und Temperaturmessreihen der MeteoSchweiz (Begert et al., 2005) überprüft. Der Boden im Bereich des Wurzelraums bot den Bäumen je nach den aktuellen mechanischen Eigenschaften unterschiedlich feste Verankerung. Grossen Einfluss übte die Feuchtigkeit im Boden aus. War der Boden des Wurzelraums gefroren, so wirkte er als ein fester Körper, auf den die Windkräfte über den Stamm übertragen werden. Damit wurde erwartet, dass die Stabilität gegenüber Windwurf stieg (Coaz, 1880; Peltola et al., 1999). Die Ergebnisse der hier vorgelegten Studie zeigten, dass der Einfluss bei den verschiedenen Ereignissen meist ähnlich gross gewesen sein sollte, da der Waldboden bereits bei den Schadereignissen im 19. Jahrhundert in fast allen Fällen ungefroren gewesen sein dürfte. Seitdem waren die Temperaturen zudem allgemein angestiegen. Einen grösseren Effekt dürfte der derzeit beobachtete Klimawandel aber in Skandinavien ausüben (Venaläinen et al., 2001). Für die Wälder der Schweiz wurde bezüglich der Bodendurchfeuchtung ermittelt, dass sie zu fast allen beobachteten Schadereignissen in überdurchschnittlichem Masse vorhanden war und darum die Höhe der Schäden im Vergleich einzelner Ereignisse zueinander eher weniger beeinflusst hat. Dieser Umstand dürfte durch die Ursache der untersuchten Schadereignisse, Winterstürme, erklärbar sein, da Niederschlagsprozesse zu den normal ablaufenden Vorgängen in Frontalzyklonen gehören (Kraus und Ebel, 2003).

7.3.3. Sturmschadenrelevante Winddaten

Wind übt unabhängig vom Ort, aber abhängig von seiner Geschwindigkeit, beim Zusammentreffen Wirkungen auf Bäume aus (Quine, 1991; Mitchell, 2013; Gardiner et al., 2016). Usbeck et al. (2010a) zeigten in einer Fallstudie für Zürich auf, dass die beobachtete Windspitzen von 32.2 m s^{-1} (Periode 1891-1929) auf 44.1 m s^{-1} (Periode 1969-2007) stieg. Der Zusammenhang zwischen den Sturmschäden und den gemessenen Windspitzen war signifikant (r^2 = 0.41, p = 0.0015). Diese Resultate bestätigen Ergebnisse früherer Untersuchungen: Hinsichtlich selten einwirkender hoher Windgeschwindigkeiten konnten die Zusammenhänge der Windwirkung an Bäumen dafür genutzt werden, Rückschlüsse auf die Intensität des Ereignisses, letztlich die Windgeschwindigkeit, zu ziehen (Hubrig, 2004). Dieser Umstand legte den Schluss nahe, dass Sturmschäden in Wäldern und Windgeschwindigkeiten in einem engen Zusammenhang standen. In unterschiedlichen Studien wurden Sturmschäden im Wald als mit verschiedenen Windparametern in engem Zusammenhang stehend gefunden: Windspitzen (Quine, 1991), Stundenmittel der Windgeschwindigkeit (Kamimura et al., 2013), Schadengrade der erweiterten Fujita-Skala (Blanchard, 2013), oder es wurde ein solcher Zusammenhang generell angenommen (Schüepp et al., 1994; Dobbertin, 2005; Busby et al., 2008; Xi et al., 2008; Bouchard et al., 2009).

7.4. Artikel 2

7.4.1 Lange homogene Windgeschwindigkeits-Datenreihen

Das Resultat des signifikanten Zusammenhangs der Sturmschäden mit den Windspitzen aus Usbeck et al. (2010a) unterstrich die Bedeutung der Winddaten für die Klärung ursächlicher Zusammenhänge der Entstehung von Wintersturmschäden im Wald. Um mit bestmöglichen Datengrundlagen weiter arbeiten zu können, wurden letztlich erfolgreiche Anstrengungen unternommen, lange Windgeschwindigkeits-Datenreihen zusammenzustellen und zu homogenisieren (Usbeck et al., 2010b). Die Resultate der Stundenwerte korrespondierten zudem sehr gut mit den von Brönnimann et al. (2012) berechneten 6-Stunden-Werten für Zürich.

Die Messung des Windes und die Auswertung der dabei aufgenommenen Daten ist oft problematisch (Mousson, 1864), da Wind eine hohe räumliche Variabilität besitzt und durch lokale Einflüsse leicht abgewandelt wird (Schüepp, 1973). Für die Westwinde der mittleren Breiten wurde auf eine allgemeine

Zunahme geschlossen, wobei festgestellt wurde, dass trotz jahrzehntelanger Messungen oberflächennahe Anemometer-Windmessungen über Land bislang nur selten für Trendanalysen benutzt wurden (IPCC, 2013). Als Ursache wurde dort genannt, dass meist wichtige Meta-Informationen zu den Messgeräten und den Messorten fehlten, weswegen lange homogenisierte Instrumenten-Windmessreihen selten waren. So homogenisierten z.B. Wan et al. (2010) stündliche mittlere Windgeschwindigkeiten von 117 Stationen in Kanada für den Zeitraum von 1953 bis 2006. Für die Schweiz, ein 242-mal kleineres Land, war dem gegenüber nur eine Station Gegenstand der Untersuchung, aber über einen mehr als doppelt so langen Zeitraum (Usbeck et al., 2010b). Wegen der grossen Entfernung zwischen beiden Ländern und der grossen räumlichen Variabilität des Windes konnten keine direkten Vergliche angestellt werden, jedoch unterstützten die Ergebnisse der hier vorgelegten Studie (Usbeck et al., 2010b) die Einschätzung von Wan et al. (2010), dass es möglich war, lange Windgeschwindigkeits-Datenreihen zu homogenisieren.

7.4.2. Entwicklung der Häufigkeit und Schwere von Wintersturm-Schadereignissen in den Wäldern des Kantons Zürich

Die Entwicklung der Wintersturmschäden im Kanton Zürich zeigte bezüglich Häufigkeit und Schwere ein ähnlich zunehmendes Verhalten wie in der gesamten Schweiz im selben Zeitraum, von 1895 bis 2004, (Usbeck et al., 2010a; Usbeck et al., 2010b). Im Kanton Zürich fehlte allerdings der Sturmschaden von 1895, und der Schaden 1990 von „Vivian“ fiel verhältnismässig gering aus. Diese Besonderheiten waren wahrscheinlich (1895, wenige Metainformationen verfügbar) bzw. sicher (1990 „Vivian“, z.B. Holenstein (1994); Schüepp et al. (1994); Schüepp (1995)) auf den relativ seltenen Verlauf des Kaltfrontdurchgangs von Norden nach Süden zurückzuführen. Damit konnte man die Wintersturmschäden des Kantons Zürich auch als repräsentativ für die Wintersturmschäden der Schweiz ansehen. Somit stand die Entwicklung der Wintersturmschäden im Kanton Zürich im Einklang mit der Entwicklung der Sturmschäden in Europa (Schelhaas et al., 2003; Seidl et al., 2014b).

7.4.3. Zusammenhang zwischen Winddruck und Sturmschaden

Die Druckkraft der Windspitze war der einzige Windparameter, dessen Daten in der hier vorgelegten Untersuchung in signifikantem Zusammenhang (r_S = 0.67) mit den registrierten Wintersturmschäden in den Forstkreisen der Wälder im Kanton Zürich standen (Usbeck et al., 2010b). Sowohl die Druckkräfte

der maximalen stündlichen mittleren Windgeschwindigkeit als auch die Druckkräfte der sturmtäglichen mittleren Windgeschwindigkeit zeigten keinen signifikanten Zusammenhang, wenngleich die maximalen Stundenmittel bei grösseren Schadereignissen und direktem räumlichen Bezug zum Ort der Windmessung einen erkennbaren Zusammenhang zeigten (r_s = 0.50). Wintersturm-Durchgänge dauerten, bezogen auf einen Ort, meist nur wenige Stunden. Darum war mit einem geringen Zusammenhang der beobachteten Sturmschäden mit den Tagesmitteln der Wind-Druckkräfte zu rechnen. Diese Vermutung wurde durch die Resultate bestätigt. Die Schäden grosser Schadereignisse zeigten bereits mit den Stundenmittel-Druckkräfte erkennbare Zusammenhänge, viel mehr noch die signifikanten Zusammenhänge der Windspitzen-Druckkräfte mit den Schäden. Darum konnte man die Ergebnisse der hier vorgelegten Studie als Bestätigung ermittelter Resultate bzw. getroffener Annahmen zum Zusammenhang zwischen Schaden und Wind aus anderen Untersuchungen sehen (Quine, 1991; Schüepp et al., 1994; Dobbertin, 2005; Busby et al., 2008; Xi et al., 2008; Bouchard et al., 2009; Blanchard, 2013; Kamimura et al., 2013).

7.5. Artikel 3

7.5.1. Räumlicher Zusammenhang zwischen Winddruck und Schadflächenanteil auf nationaler Ebene

Nachdem in Usbeck et al. (2010a) und Usbeck et al. (2010b) die enge Beziehung von Wind und Sturmschaden anhand von langen Reihen beobachteter Windwerte einer einzelnen repräsentativen Messstation dargestellt werden konnte, wurde anschliessend untersucht, ob auch ein enger Zusammenhang räumlich verteilt gemessener bzw. simulierter Winddaten mit räumlich hoch aufgelösten Wald- und Sturmschaddaten nachweisbar war (Usbeck et al., 2012). Die Ergebnisse deuteten darauf hin, dass die räumliche Verteilung der Böen im Sturm das Schadgeschehen massgeblich beeinflussten, was die Resultate früherer Studien bestätigte, wie z.B. Quine (1991); Gardiner et al. (2000); Otto (2000); Meyer et al. (2008); Schindler et al. (2009); Gardiner et al. (2010).

Die Schadflächenanteile zeigten signifikante Zusammenhänge zu Druckkräften gemessener Windspitzen in acht, und zu Druckkräften gemessener 10-min-Mittelwerte der Windgeschwindigkeiten in einer der untersuchten 120 Varianten. Massgebliche Zusammenhänge konnten für die Fallstudien zu den Schäden

der Orkane „Vivian“ und „Lothar“ nur für einen kleinen Teil der untersuchten Umgebungsflächen der Winddaten-Koordinaten sowie eine Experten-Analyse gefunden werden. Die Schadanteile der runden Umgebungsflächen aller besetzten vier von insgesamt fünf Grössen und der beiden grössten in Windrichtung ausgerichteten rechteckigen Umgebungsflächen im Falle des Orkans „Vivian“ und die kleinsten besetzten runden Umgebungsflächen der Wind-Messorte des Orkans „Lothar“ standen in einem wesentlichen Zusammenhang mit den Winddrücken der gemessenen Windspitzen. Ausserdem standen die Schadflächenanteile der kleinsten besetzten runden Umgebungsflächen des Orkans „Lothar“ in massgeblichem Zusammenhang mit den Drücken der gemessenen 10-Minuten-Mittel der Windgeschwindigkeit. Weiter einschränkend kam hinzu, dass die Bestimmtheitsmasse im Falle signifikanter Zusammenhänge nur bei den Schadanteilen der beiden kleinsten runden Umgebungsflächen mit $R^2 = 0.79$ und $R^2 = 0.67$ relativ hoch waren, in den übrigen Fällen unter 0.5 lagen.

Die Schadflächenanteile standen mit Druckkräften simulierter Winddaten in keinem Fall der Auswertung in signifikantem Zusammenhang. Eine mögliche Ursache dafür war, dass für die hier vorgelegte Studie das Resultat des ersten Laufes eines Simulationsmodells verwendet wurde und darin die Variabilität der Windspitzen nicht adäquat abgebildet war. Der geringe Anteil signifikanter Ergebnisse des Zusammenhangs zwischen windmessdaten-basierter Druckkraft und Schadflächenanteil könnte zum Teil in den Anforderungen an Windmessungen begründet gelegen haben (WMO, 2006): Die Einhaltung eines entsprechenden Abstands zu Hindernissen, um eine Beeinflussung der Messungen auszuschliessen. Hinzu kam die hohe räumliche Variabilität des Windes (Schüepp, 1973). Einerseits war damit in unmittelbarer Nähe der Messstationen kein Wald vorhanden, wodurch keine Schäden auftreten konnten, auch wenn der Wind stark genug war, Schäden verursachen zu können. Andererseits war die räumliche Variabilität des Windes möglicherweise ausreichend hoch, sodass die Werte der Windmessungen ab entsprechender Entfernungen zu den Wäldern nicht mehr repräsentativ für die Erklärung der Schaden-Nichtschaden-Verteilung waren. Ein Hinweis darauf konnte sein, dass es sich bei den Varianten mit signifikanten Zusammenhängen und besten Bestimmtheitsmassen um relativ kleine kreisförmige Umgebungsflächen in ihrem Zusammenhang mit Windspitzen handelte.

7.6. Artikel 4

7.6.1. Räumliche Sturmschadmuster

Wintersturmschäden in Wäldern waren innerhalb der Schweiz auch über längere Zeiträume gesehen räumlich nicht gleichmässig verteilt, wobei aber ein enger Zusammenhang zwischen Schaden und Windgeschwindigkeit bestand (Usbeck et al., 2010a; Usbeck et al., 2010b). Auf diesen Erkenntnissen aufbauend wurde eine Quantifizierung der Schadbetroffenheit auf kantonalem Niveau vorgenommen. Aus den Ergebnissen konnte man schlussfolgern, dass Gebiete mit geringen Schäden von Winterstürmen weniger stark betroffen wurden, wie die Kantone Tessin und Genf (Usbeck, 2015).

Die Winterstürme, die die untersuchten Schäden verursachten, wurden von Mittelbreitenzyklonen verursacht. Durch andere Sturmursachen, wie z.B. Föhnstürme (MeteoSchweiz, 2015), Hagelstürme (Schiesser et al., 1997b) oder Bisenstürme (BAFU, 2009), hervorgerufene Schäden dürften jeweils entsprechenden räumlichen Schadmustern folgen. Darum war es nur bedingt möglich, die Ergebnisse der hier vorgelegten Studie zur räumlichen Verteilung von Wintersturmschäden mit Ergebnissen von Studien zu vergleichen, die die räumliche Verteilung aller beobachteter Sturmschäden zum Gegenstand hatten, wie es z.B. bei Bütikofer (1987) oder Nilsson et al. (2004) der Fall war. Übereinstimmung zeigte sich hinsichtlich der Resultate, dass räumliche Sturmschadmuster existierten. Sturmschäden nahmen über den gemeinsamen Untersuchungszeitraum nach Häufigkeit und Intensität zu (Nilsson et al., 2004), wobei in Schweden ein Maximum in den 1980er Jahren erreicht wurde, was für die Schweiz in den 1990er Jahren der Fall war (Usbeck et al., 2010a; Usbeck, 2015). Mittlerweile wurde mit den Schäden des Orkans „Gudrun“ in Schweden ein neues Maximum verzeichnet (Valinger und Fridman, 2011), das die dortige Haupt-Schadregion Südschweden bestätigte.

7.6.2. Aktualisierung von Reihen zu Wintersturmschäden und Windsgeschwindigkeiten

Nach der Publikation der schweizweiten Untersuchung zu Wintersturmschäden und Windspitzen für den Zeitraum von 1858 bis 2007 (Usbeck et al., 2010a) konnte eine aktualisierte Auswertung, für den Zeitraum 1865 bis 2014, vorgenommen werden (Usbeck, 2015). Die Resultate der Wintersturmschaden-Reihe 1865 bis 2014 zeigten, dass in den letzten 15 Jahren dieses Zeitraums kein extremes Wintersturmereignis stattfand (Abb. 6.4.1). 15 Jahre waren bezogen auf den hier betrachteten

Studienzeitraum keine Ursache, zwingend eine Trendwende anzunehmen: So dauert es genau 88 Jahre, vom 20. Februar 1879 bis zum 20. Februar 1967, dass der Schaden des schwersten Wintersturms des 19. Jahrhunderts übertroffen wurde, was durch die Folgen der Sturmserie des 1967er Winters geschah. Von da an dauerte es etwas mehr als 23 Jahre bis zum schwersten bis dahin bekannten Wintersturm „Vivian“, vom 27. und 28. Februar 1990, und noch einmal knapp neun Jahre bis zum heute noch umfangreichsten Schadereignis, dem Orkan „Lothar“ am 26. Dezember 1999.

Aktualisiert wurde die Reihe der Windspitzen, da ihr Parameter in den vorangegangenen Untersuchungen der hier vorgelegten Studie direkt bzw. mittels der daraus errechneten Winddrücke die engsten Zusammenhänge mit den Sturmschäden zeigte (Usbeck et al., 2010a; Usbeck et al., 2010b). Mit den beiden neuen 5-Jahres-Clustern 2005-2009 und 2010-2014 hatten sowohl Anzahl als auch Geschwindigkeiten der Windspitzen ab 30 m s^{-1} (in Clustern zu 5 m s^{-1}) ein so niedriges Niveau erreicht wie zuletzt vor dem Zeitraum 1975-1979 gegenüber 2005-2009 bzw. 1965-1969 für das Maximum und vor 1955-1959 für die Häufigkeit gegenüber 2010-2014 (Abb. 6.4.3).Einerseits betraf das Absinken sowohl der Häufigkeiten als auch der Maxima der gemessenen Windspitzen nunmehr zwei aufeinander folgende 5-Jahres-Zeiträume (Usbeck, 2015), andererseits hatten über anderen Gebieten Europas während der selben Zeit extreme Wintersturmereignisse stattgefunden: „Gudrun“ 2005 (Valinger und Fridman, 2011), „Kyrill“ 2007 (Spatzierer et al., 2007; Fink et al., 2009), „Paula“ und „Emma“ 2008 (Steyrer et al., 2008), „Klaus“ 2009 (Liberato et al., 2011) und der Sturmwinter 2013/2014 (Kendon und McCarthy, 2015). Diese Stürme hinterliessen katastrophale Schäden von Spanien bis Österreich, von Grossbritannien bis Südschweden und Polen. Dass die Schweiz dabei zweimal nur gestreift wurde, 2007 bei „Kyrill“ (BAFU, 2007) und 2008 bei „Emma“ (BAFU, 2008b), dafür z.B. von den schwächeren Winterstürmen „Joris“ und „Quinten“ 2009 (BAFU, 2009) getroffen wurde, dürfte eher Zufall gewesen sein.

7.7. Gesamtschau

Der gesellschaftliche Nutzen dieser Studie, für Verwaltung, Wirtschaft, Wissenschaft wie auch die breite Öffentlichkeit, besteht insbesondere im Ergebnis, dass auch künftig mit extremen Sturmschadereignissen gerechnet werden muss, die durchaus die schwersten bisher bekannten Ereignisse übertreffen können (Usbeck et al., 2010a; Usbeck, 2015). Dabei darf erwartet werden, dass sich die regionalen

Schadverteilungen zu den nun bekannten langjährigen Schadmustern ähnlich verhalten werden (Usbeck, 2015). Die Erkenntnisse zu langjährig beobachteter Schwere, räumlichen Verteilung und Abständen der Wiederkehr solcher Ereignisse können künftig dienlich sein, z.B. im Katastrophenschutz, in (forst)wirtschaftlichen Planungen, für künftige Risikomodelle oder allgemein das Bewusstsein um mögliche Wintersturm-Schadausmasse bereichern.

In der hier vorgelegten Studie wurde erstmalig für die ganze Schweiz auf der Grundlage von über 100 Jahre langen Reihen (Wald: Fläche, Vorrat, Wintersturmschäden; Wind: Spitzen, mittlere Geschwindigkeiten) gezeigt, dass schwere Wintersturmschäden am Wald in engem Zusammenhang mit der Stärke des Windes, insbesondere der Windspitzen, sowie dem Vorrat standen und auch über lange Zeitspannen gesehen räumlich nicht gleichverteilt waren (Usbeck et al., 2010a; Usbeck et al., 2010b; Usbeck et al., 2012; Usbeck, 2015). Dabei spielte die Datenverfügbarkeit und –qualität eine zentrale Rolle, insbesondere bei historischen Daten (Usbeck et al., 2010a; Usbeck et al., 2010b). Diese wiederum waren ursächlich abhängig sowohl vom verwaltungs- und wissenschaftsorganisatorischen, wissenschaftlich-technischen als auch ökonomischen Entwicklungsstand innerhalb der Gesellschaft (Ritzmann-Blickenstorfer, 1998; Usbeck et al., 2010b; Usbeck, 2015). Gerade diese, ab der Mitte des 19. Jahrhundert sich rasch verbessernden, Bedingungen schafften Voraussetzungen die es erlaubten, die Homogenisierung von bis in das 19. Jahrhundert zurück reichende Windmessreihen erfolgreich abzuschliessen (Usbeck et al., 2010b; IPCC, 2013). Später, in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts, waren es wiederum hauptsächlich die Resultate gesellschaftlicher und wirtschaftlicher Entwicklung sowie Wahrnehmung, wegen denen die Verfügbarkeit und –qualität von Sturmholzdaten wieder abnahm (Pfister, 1998; Usbeck, 2015).

Die Ergebnisse der hier vorgelegten Studie bestätigten zudem die entsprechenden Resultate früherer Studien, die für andere räumlichen Ebenen oder für andere geographische Gebiete erstellt wurden. Das betraf besonders die Zunahme der Schäden, wie z.B. Schelhaas et al. (2003) ermittelten, dass auf regionalem Level Sturmschäden im Wald gut mit dem Wind korrelierten (Xi et al., 2008) und dass Sturmschäden auf dem Level regionaler Gebietskörperschaften über das Land nicht gleich verteilt war (Nilsson et al., 2004; Welker et al., 2016). Zudem zeigten die räumlichen Verteilungen der Schäden in den Lothar-Sturmschadinventaren der Waldschäden (Usbeck et al., 2012) und der Versicherungsschäden nach Postleitzahlen (Welker et al., 2016) optisch auffällige Ähnlichkeiten.

Konkret waren die Resultate der hier vorliegenden Studie auf forstlichem Gebiet die Zusammenstellung und Aufbereitung von Datenreihen zu Waldfläche und Wintersturmschaden der Wälder auf kantonaler

und nationaler Ebene sowie zur Vorratsentwicklung in der Schweiz (Usbeck et al., 2010a; Usbeck et al., 2010b; Usbeck, 2015). Lange meteorologische Reihen wurden zu mittleren Wintertemperaturen und mittleren winterlichen Niederschlagssummen unterhalb der Waldgrenze berechnet (Usbeck et al., 2010a) und die Zusammenstellung sowie starkwind-bezogene Homogenisierung von langen Wind-Datenreihen der MeteoSchweiz-Station Zürich vorgenommen (Usbeck et al., 2010b). Die Auswertungen dieser Reihen ergaben, dass während Wintersturm-Schadereignissen die Waldböden der Schweiz fast immer ungefroren und überdurchschnittlich stark durchfeuchtet waren (Usbeck et al., 2010a). Es konnte weiterhin aufgezeigt werden, dass nicht nur Waldflächen, Vorräte und Wintersturmschäden über den Untersuchungszeitraum angestiegen waren, sondern ab 1864 auch Temperatur und Niederschlag (Usbeck et al., 2010a). Die Höhe der extremen Wintersturmschäden hatte im Verhältnis zu Waldfläche und Vorrat überproportional zugenommen (Usbeck et al., 2010a). Soweit die Wind-Datenreihen zurück reichten, was rund 80 % des Studienzeitraums betraf, konnte ein enger Zusammenhang zwischen Sturmschaden und Windspitze bzw. deren Druckkraft aufgezeigt werden. Signifikante Zusammenhänge zeigten sich sowohl bei den zeitlichen Reihen wie in den Fallstudien zu einzelnen Ereignissen fast ausschliesslich zwischen Schaden und Windspitze bzw. ihrer Druckkraft (Usbeck et al., 2010a; Usbeck et al., 2010b; Usbeck et al., 2012; Usbeck, 2015). Ausserdem wurde aufgezeigt, dass in der Vergangenheit die Wälder in Kantonen des Mittellandes und der Voralpen von schweren Wintersturmschäden im Mittel deutlich stärker betroffen wurden als insbesondere Kantone der Inneralpen und auf der Alpensüdseite (Usbeck, 2015).

Insbesondere die Arbeiten zur Zusammenstellung und Homogenisierung der Wind-Datenreihen (Usbeck et al., 2010b), aber auch zu den langen Reihen der Wintersturmschäden und Waldflächen, Temperaturen und Niederschlägen (Usbeck et al., 2010a) haben gezeigt, dass eine intensive Suche nach historischen Messwerten und zugehörigen Metadaten zwar aufwändig, bei sorgfältiger Auswahl jedoch erfolgversprechend ist und für die wissenschaftliche Gemeinschaft nützlich sein kann (IPCC, 2013). Einmal verfügbar gemacht, können lange Datenreihen z.B. für vertiefende Untersuchungen verwendet, zum Vergleich mit Modell-Outputs oder deren Adjustierung herangezogen werden.

7.8. Ausblick / Weitere Fragen

In der jüngeren Vergangenheit wurden Klimamodellierunges-Studien für die nordatlantisch-europäische Region veröffentlicht, die zumeist auch Aussagen über das künftig zu erwartende Sturmgeschehen enthielten. Nach Mölter et al. (2016) zeigten deren Ergebnisse für die mitteleuropäische Region, zu der die Schweiz gehört, mit grosser Mehrheit Resultate hinsichtlich einer Zunahme des Sturmgeschehens. Erwartet werden für die Schweiz auch für die kommenden Jahre Schadereignisse von nationaler Bedeutung (BAFU, 2008a). Somit kann davon ausgegangen werden, dass Winterstürme auch in der Zukunft ein Gefahrenpotential für die Wälder der Schweiz darstellen (Wohlgemuth et al., 2008; Hartmann et al., 2013; Wohlgemuth et al., 2014) und als bedeutende Naturgefahr Forschungsgegenstand bleiben (Wohlgemuth et al., 2014).

Nachdem in der hier vorgelegten Studie der enge Zusammenhang von Sturmschaden und Windspitze (Usbeck et al., 2010a; Usbeck et al., 2010b) und die unterschiedliche durchschnittliche Schadbetroffenheit auf kantonaler Ebene (Usbeck, 2015) nachgewiesen wurde, haben sich aus diesen Resultaten weiterführende Fragen ergeben. Sie stellen gleichzeitig den Ausblick dar, in welchen Hinsichten es bereits heute besonders interessant erscheint, ausgehend von dieser Studie weiter zu forschen, neue Forschung zu initiieren oder Möglichkeiten zu suchen, mit bestehenden entsprechenden Forschungsprojekten zusammenzuarbeiten bzw. sich einzubringen.

Zur **räumliche**n **Sturmschadverteilung** (Usbeck, 2015) stellt sich die Frage, ob es möglich ist, feinerskalige Verteilungen darzustellen. Hierbei stellt sich auch die Frage, ob regionale bzw. räumlich höher aufgelöste Schadverteilungen zudem mit Bezug auf naturräumliche Grenzen darstellbar wären. Interessante Forschungsergebnisse zum historischen und gegenwärtigen Sturmgeschehen in der Schweiz sind in neuerer Zeit insbesondere aus dem Oeschger-Zentrum für Klimaforschung (OCCR) publiziert worden (Dierer et al., 2014; Stucki et al., 2014; Stucki et al., 2015; Welker et al., 2016). Hier ist Synergiepotential durchaus denkbar, da insbesondere bei hoher Schadintensität ähnliche Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge bezüglich der Entstehung von Schäden im Wald und an anderen Gütern zu existieren scheinen (Prahl et al., 2015; Welker et al., 2016).

Ein sorgfältiger Einbezug von Reanalyse-Daten (Compo et al., 2011; Poli et al., 2016; Rose und Apt, 2016) kann insbesondere bei der Schaffung hoch aufgelöster Sturmschadrisikokarten von Nutzen sein. Reanalyse-Daten erscheinen auch als interessant für die Ermittlung räumlich aufgelöster

Wiederkehrperioden von Ereignissen, da für Anwendungen aus dem Bereich der Extremwertstatistik auch die längsten verfügbaren Messreihen keine robusten Resultate erwarten lassen und ansonsten nur auf modellierte Daten zurückgegriffen werden könnte (Brönnimann und Luterbacher, 2012).

Zu **historische**n **Winddaten** ist in der Schweiz ein grosses Forschungspotential gegeben, da bislang nur sehr wenig des verfügbaren Materials ausgewertet wurde. Das dürfte zunächst unter anderem in der grösstenteils noch nicht erfolgte Digitalisierung von Messdaten und Metainformationen begründet sein (Füllemann et al., 2011). Auch für die hier vorgelegte Studie wurde nur das unbedingt nötige Mass an Daten digitalisiert (Usbeck et al., 2010b), was nur einen Bruchteil der publizierten bzw. archvierten Daten der Züricher und Berner Windreihen ausmacht. Insbesondere durch eine komplette Bearbeitung der Berner und Züricher Windmessungen sollten interessante Erkenntnisse insbesondere zu den frühen Jahrzehnten Schweizerischer Windmessung möglich sein, die dann auch das Potential internationaler Beachtung mit sich brächten (IPCC, 2013).

Zum **Zusammenhang von Wintersturmschäden mit unterschiedlichen Windparametern** konnten seit der Veröffentlichung zum Zusammenhang der Züricher Reihen (Usbeck et al., 2010b) weitere historische Daten zu Wintersturm-Windspitzen dieser Messstation verfügbar gemacht werden. Eine bis in das Jahr 1891 führende erweiterte Auswertung könnte Antworten darauf geben, warum bei ähnlich hohen maximalen Wind-Stundenwerten wie am Ende des 20. Jahrhunderts die beobachteten Sturmschäden gegen Ende des 19. Jahrhunderts um Grössenordnungen geringer blieben.

Zur **gesellschaftlichen Wahrnehmung und** dem daraus folgenden **Umgang mit Wintersturmschäden im Wald** (Usbeck, 2015) im Kontext der wissenschaftlich-technischen sowie ökonomischen Entwicklung in ihrer Beziehung zum entsprechenden politischen und verwaltungsseitigen Vorgehen seit der Gründung des heutigen Schweizerischen Bundesstaates könnte eine eigenständige Abhandlung ein weit detaillierteres und in die Tiefe gehendes Bild entwerfen als es in der hier vorgelegten Studie möglich war.

7.9. Literaturverzeichnis zu genereller Diskussion und Schluss-folgerungen

Abegg, M., Brändli, U.-B., Coldi, F., Fischer, C., Herold-Bonardi, A., Huber, M., Keller, M., Meile, R., Rösler, E., Speich, S., Traub, B. und Vidondo, B., 2014. Viertes Schweizerisches Landesforstinventar -

Ergebnisse und Karten im Internet zum LFI 2009-2013 (LFI4b). (Published online 06.11.2014; Dated: 14.04.2015). 21.02.2016. http://www.lfi.ch/resultate/

Albrecht, A., Hanewinkel, M., Bauhus, J. und 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(1): 229-247.

Albrecht, A., Kohnle, U., Hanewinkel, M. und Bauhus, J., 2013. Storm damage of Douglas-fir unexpectedly high compared to Norway spruce. ANNALS OF FOREST SCIENCE, 70(2): 195-207.

Auer, I., Bohm, R., Jurkovic, A., Lipa, W., Orlik, A., Potzmann, R., Schoner, W., Ungersbock, M., Matulla, C., Briffa, K., Jones, P., Efthymiadis, D., Brunetti, M., Nanni, T., Maugeri, M., Mercalli, L., Mestre, O., Moisselin, J.M., Begert, M., Muller-Westermeier, G., Kveton, V., Bochnicek, O., Stastny, P., Lapin, M., Szalai, S., Szentimrey, T., Cegnar, T., Dolinar, M., Gajic-Capka, M., Zaninovic, K., Majstorovic, Z. und Nieplova, E., 2007. HISTALP - historical instrumental climatological surface time series of the Greater Alpine Region. Int J Climatol, 27(1): 17-46.

Baatsen, M., Haarsma, R.J., Van Delden, A.J. und de Vries, H., 2015. Severe Autumn storms in future Western Europe with a warmer Atlantic Ocean. Clim. Dyn., 45(3-4): 949-964.

BAFU, 2007. Auswirkungen des Sturms "Kyrill" im Schweizer Wald - eine kleine Schadensbilanz. 25.03.2016. www.bafu.damin.ch/dokumentation/medieninformation/00962/index.html?lang=de&msg-id=16810

BAFU, 2008a. Sturmschaden-Handbuch. Vollzugshilfe für die Bewältigung von Sturmschadereignissen von nationaler Bedeutung im Wald. 3. überarbeitete Auflage, Bundesamt für Umwelt, Bern.

BAFU, 2008b. Sturm "Emma" verschont den Schweizer Wald. 25.03.2016. www.bafu.admin.ch/dokumentation/medieninformation/00962/index.html?lang=de&msg-id=17721

BAFU, 2009. Sturm "Quinten" verursacht weniger Waldschäden als befürchtet. 25.03.2016. www.bafu.admin.ch/wald/01256/12717/index.html?lang=de&msg-id=25376

Bazzigher, G. und Schmid, P., 1969. Sturmschaden und Fäule. Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen, 120(10): 521-535.

Begert, M., Schlegel, T. und Kirchhofer, W., 2005. Homogeneous temperature and precipitation series of Switzerland from 1864 to 2000. Int J Climatol, 25: 65-80.

Billwiller, R., 1893. Einleitung. Annalen der Schweizerischen Meteorologischen Central-Anstalt 1891, 28: V-VI.

Blanchard, D.O., 2013. A comparison of wind speed and forest damage associated with tornadoes in northern Arizona. Weather Forecast, 28: 408-417.

Bonnesoeur, V., Fournier, M., Bock, J., Badeau, V., Fortin, M. und Colin, F., 2013. Improving statistical windthrow modeling of 2 Fagus sylvatica stand structures through mechanical analysis. Forest Ecol Manag, 289: 535-543.

Booth, J.F., Wang, S.G. und Polvani, L., 2013. Midlatitude storms in a moister world: lessons from idealized baroclinic life cycle experiments. Clim. Dyn., 41(3-4): 787-802.

Bouchard, M., Pothier, D. und Ruel, J.C., 2009. Stand-replacing windthrow in the boreal forests of eastern Quebec. Canadian Journal of Forest Research-Revue Canadienne De Recherche Forestiere, 39(2): 481-487.

Brändli, U.-B., 2000. Waldzunahme in der Schweiz - gestern und morgen. Informationsblatt Forschungsbereich Landschaft, 45: 1-4.

Brändli, U.-B.R. (Editor), 2010. Schweizerisches Landesforstinventar. Ergebnisse der dritten Erhebung 2004–2006. Schweizerisches Landesforstinventar. Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL, Birmensdorf, Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern, Birmensdorf and Bern, 312 pp.

Brassel, P. und Brändli, U.-B., 1999. Schweizerisches Landesforstinventar. Ergebnisse der Zweitaufnahme 1993-1995. Verlag Paul Haupt, Bern-Stuttgart-Wien, 442 pp.

Braun, S., Schindler, C., Volz, R. und Flückiger, W., 2003. Forest damages by the storm "Lothar" in permanent observation plots in Switzerland: the significance of soil acidification and nitrogen deposition. Water, Air, and Soil Pollution, 142: 327-340.

Brönnimann, S. und Luterbacher, J., 2012. Weather and climate extremes during the past 100 years. Meteorologische Zeitschrift, 21(1): 9-11.

Brönnimann, S., Martius, O., von Waldow, H., Welker, C., Luterbacher, J., Compo, G.P., Sardeshmukh, P.D. und Usbeck, T., 2012. Extreme winds at northern mid-latitudes since 1871. Meteorologische Zeitschrift, 21(1): 13-27.

Busby, P.E., Motzkin, G. und Boose, E.R., 2008. Landscape-level variation in forest response to hurricane disturbance across a storm track. Canadian Journal of Forest Research-Revue Canadienne De Recherche Forestiere, 38(12): 2942-2950.

Bütikofer, N., 1987. Historische Waldschäden der Schweiz (1800 - 1960), Universität Bern, Bern, 94 pp.

BUWAL und WSL, 2005. Waldbericht 2005 – Zahlen und Fakten zum Zustand des Schweizer Waldes. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, Bern, Birmensdorf, 152 pp.

Champion, A.J., Hodges, K.I., Bengtsson, L.O., Keenlyside, N.S. und Esch, M., 2011. Impact of increasing resolution and a warmer climate on extreme weather from Northern Hemisphere extratropical cyclones. Tellus Ser. A-Dyn. Meteorol. Oceanol., 63(5): 893-906.

Changnon, S.A., 2009. Temporal and spatial distributions of wind storm damages in the United States. Clim. Change, 94(3-4): 473-482.

Clemmensen, L.B., Hansen, K.W.T. und Kroon, A., 2014. Storminess variation at Skagen, northern Denmark since AD 1860: Relations to climate change and implications for coastal dunes. Aeolian Res., 15: 101-112.

Coaz, J.W.F., 1880. Die Stürme vom 20. Februar, 25. Juni und 5. Dezember 1879 und der durch dieselben in den Waldungen der Schweiz verursachte Schaden. Jenet & Reinert, Bern, 57 pp.

Compo, G.P., Withaker, J.S., Sardesmukh, P.D., Matsu, N., Allan, R.J., Yin, X., Gleason, B.E., Vose, R.S., Rutledge, G., Bessemoulin, P., Brönnimann, S., Brunet, M., Crouthamel, R.I., Grant, R.N., Groisman, P.Y., Jones, P.D., Kruk, M.C., Kruger, A.C., Marshall, G.J., Maugen, M., Mok, H.Y., Nordi, O., Ross, T.F., Trigo, R.M., Wang, X.L., Woodruff, S.D. und Worley, S.J., 2011. The Twentieth century reanalysis project. Q J Roy Meteor Soc, 137(654): 1-28.

Dierer, S., Müller, S., Stucki, P., Brönnimann, S. und Romppainen-Martius, O., 2014. Karten der Sturmgefährdung in der Schweiz. Flächendeckende Darstellung der Böenspitzen in der Schweiz für verschiedene Wiederkehrperioden. Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bundesamt für Meteorologie ind Klimatologie MeteoSchweiz, Bern, 86 pp.

Dobbertin, M., 2005. Erfassung der Bestandesdaten und Schäden auf dem repräsentativen 4x4-km Sanasilva-Netz. In: M. Indermühle, Raetz, P., Volz, R. (Editor), LOTHAR Ursächlichen Zusammenhänge und Risikobewertung. Synthese des Teilprogramms 6. Umwelt-Materialien. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bern, pp. 39-52.

Donat, M.G., Renggli, D., Wild, S., Alexander, L.V., Leckebusch, G.C. und Ulbrich, U., 2011. Reanalysis suggests long-term upward trends in European storminess since 1871. Geophysical Research Letters, 38: 6.

EAFV, 1988. Schweizerisches Landesforstinventar: Ergebnisse der Erstaufnahme 1982-1986. Berichte der Eidgenössischen Anstalt für das Forstliche Versuchswesen (EAFV), 305, 1-375 pp.

EIFJF, 1954. Der stehende Holzvorrat in den öffentlichen Waldungen der Schweiz. Erhebungen 1951 / 52. Eidgenössische Inspektion für Forstwesen, Jagd und Fischerei (EIFJF), Bern, 34 pp.

EOFI, 1878-1994. Etat der schweizerischen Forstbeamten mit wissenschaftlicher Bildung. Eidgenössisches Oberforstinspektorat (EOFI), Bern.

Exner, F.M., 1925. Die dynamische Meteorologie. Julius Springer, Wien, 421 pp.

Fink, A.H., Brucher, T., Ermert, V., Kruger, A. und Pinto, J.G., 2009. The European storm Kyrill in January 2007: synoptic evolution, meteorological impacts and some considerations with respect to climate change. Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 9(2): 405-423.

Flury, P., 1925. Die forstlichen Verhältnisse der Schweiz. Kommissionsverlag von Beer & Cie., Zürich, Zürich, 246 pp.

Fortin, M., Albrecht, A., Kohnle, U. und Ningre, F., 2014. The Impact of Windstorm Damage in the Assessment of the Carbon Balance in Even-Aged Fagus sylvatica L. Stands. Forests, 5(4): 784-801.

Franscini, S., 1829. Statistik der Schweiz. Heinrich Remigius Sauerländer, Aarau.

Franscini, S., 1848. Neue Statistik der Schweiz, Erster Band. Hallersche Buchdruckerei, Bern.

Franscini, S., 1851. Neue Statistik der Schweiz. Nachtrag, Nachtrag. Hallersche Buchdruckerei, Bern.

Füllemann, C., Begert, M., Croci-Maspoli, M. und Brönnimann, S., 2011. Digitalisieren und Homogenisieren von historischen Klimadaten des Swiss NBCN - Resultate aus DigiHom. Arbeitsberichte der MeteoSchweiz, 236. Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie, MeteoSchweiz, Zürich, 48 pp.

Gardiner, B., Peltola, H. und Kellomaki, S., 2000. Comparison of two models for predicting the critical wind speeds required to damage coniferous trees. Ecol. Model., 129(1): 1-23.

Gardiner, B., Blennow, K., Carnus, J.-M., Fleischer, P., Ingemarson, F., Landmann, G., Lindner, M., Marzano, M., Nicoll, B., Orazio, C., Peyron, J.-L., Reviron, M.-P., Schelhaas, M.J., Schuck, A., Spielmann, M. und Usbeck, T., 2010. Destructive Storms in European Forests: Past and Forthcoming Impacts, European Forest Institute EFI, Atlantic European Regionel Ofice - EFIATLANTIC, Joensuu.

Gardiner, B., Berry, P. und Moulia, B., 2016. Review: Wind impacts on plant growth, mechanics and damage. Plant Sci, 245: 94-118.

Gimmi, U., Wolf, A., Burgi, M., Scherstjanoi, M. und Bugmann, H., 2009. Quantifying disturbance effects on vegetation carbon pools in mountain forests based on historical data. Reg. Envir. Chang., 9(2): 121-130.

Ginzler, C., Brändli, U.-B. und Hägeli, M., 2011. Waldflächenentwicklung der letzten 120 Jahre in der Schweiz. Schweiz Z Forstwes, 162(9): 337-343.

Hanewinkel, M., Breidenbach, J., Neeff, T. und Kublin, E., 2008. Seventy-seven years of natural disturbances in a mountain forest area - the influence of storm, snow, and insect damage analysed with a long-term time series. Canadian Journal of Forest Research-Revue Canadienne De Recherche Forestiere, 38(8): 2249-2261.

Hanewinkel, M., Kuhn, T., Bugmann, H., Lanz, A. und Brang, P., 2014. Vulnerability of uneven-aged forests to storm damage. Forestry, 87(4): 525-534.

Hann, J., 1869. Untersuchungen über die Winde der nördlichen Hemisphäre und ihre klimatologische Bedeutung. Sitzb. d. k. Akad. D. Wissensch. II. Abth., I.X. Bd.(Juli-Heft): unnumbered.

Hann, J., 1901. Lehrbuch der Meteorologie. Chr. Herm. Tauchnitz, Leipzig, 805 pp.

Hann, J., 1906. Lehrbuch der Meteorologie. Chr. Herm. Tauchnitz, Leipzig, 642 pp.

Hann, J. und Süring, R., 1926. Lehrbuch der Meteorologie. Chr. Herm. Tauchnitz, Leipzig, 867 pp.

Hann, J. und Süring, R., 1951. Lehrbuch der Meteorologie, 2. S. Hirzel, Leipzig, 1092 pp.

Hartmann, D.I., KleinTank, A.M.G., Rusticucci, M., Alexander, L.V., Brönnimann, S., Charabi, Y., Dentener, F.J., Dulgokencky, E.J., Easterling, D.R., Kaplan, A., Soden, B.J., Thorne, P.W., Wild, M. und Zhai, P.M., 2013. Observations: Athmosphere and surface, Climate Change 2013: The physical science basis. Contribution of the Working Group I to the Fifth Assessment Reoprt of the International Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tingor, S.K. Allen, J. boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Holenstein, B., 1994. Sturmschäden 1990 im Schweizer Wald. In: BUWAL (Editor), Schriftenreihe Umwelt. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bern, pp. 41.

Hollenstein, K., 2002. Herleitung eines Modells zur Abschätzung der mechanischen Stabilität von Waldbeständen. Ergebnisse des Komponentenprojekts C. Polyprojekt PRIMALP, ETH Zürich, Zürich.

Hubrig, M., 2004. Analyse von Tornado- und Downburst-Windschäden an Bäumen. Analysis of Tornado and Downburst Wind Damage to Trees. Forst und Holz, 59: 78-84.

Indermühle, M., Raetz, P. und Volz, R. (Editors), 2005. LOTHAR Ursächliche Zusammenhänge und Risikoentwicklung. Synthese des Teilprogramms 6. Umwelt-Materialien, Nr. 184. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bern, 145 pp.

IPCC, 2013. Climate Change 2013: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Quin, G.-K., Plattner, M. Tingor, S.K.Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.

Jelonek, T., Walkowiak, R., Jakubowski, M. und Tomczak, A., 2013. Indices of tree stability in Scots pine stands damaged by wind. Sylwan, 157(5): 323-329.

Kamimura, K., Saito, S., Kinoshita, H., Kitagawa, K., Uchida, T. und Mizunaga, H., 2013. Analysis of wind damage caused by multiple tropical storm events in Japanese Cryptomeria japonica forests. Forestry, 86(4): 411-420.

Kendon, M. und McCarthy, M., 2015. The UK's wet and stormy winter of 2013/2014. Weather, 70(2): 40-47.

Klaus, M., Holsten, A., Hostert, P. und Kropp, J.P., 2011. Integrated methodology to assess windthrow impacts on forest stands under climate change. Forest Ecol Manag, 261(11): 1799-1810.

Kraus, H. und Ebel, U., 2003. Risiko Wetter: Die Entstehung von Stürmen und anderen atmosphärischen Gefahren. Springer Berlin Heidelberg

Kuhn, N., 1995. Die standörtliche Abhängigkeit der Vivian-Windwürfe. Informationsblatt des Forschungsberiches Landschaftsökologie, Nr. 28: 1-3.

Kurz, D., Alveteg, M. und Sverdrup, H., 1998. Acidification of Swiss Forest Soils. Development of a Regional Dynamic Assessment. Environmental Documentation, No. 89. Swiss Agency for the environment, Forests and Landscape (SAEFL), Bern, 115 pp.

Liberato, M.L.R., Pinto, J.G., Trigo, I.F. und Trigo, R.M., 2011. Klaus - an exceptional winter storm over northern Iberia and southern France. Weather, 66(12): 330-334.

Matulla, C., Schoner, W., Alexandersson, H., von Storch, H. und Wang, X.L., 2008. European storminess: late nineteenth century to present. Clim. Dyn., 31(2-3): 125-130.

Maurer, J., Billwiller jr., R. und Hess, C., 1909. Das Klima der Schweiz. Auf Grundlage der 37jährigen Beobachtungsperiode 1864-1900, 1. Huber & Co., Frauenfeld, 302 pp.

Mayer, P., Brang, P., Dobbertin, M., Hallenbarter, D., Renaud, J.P., Walthert, L. und Zimmermann, S., 2005. Forest storm damage is more frequent on acidic soils. ANNALS OF FOREST SCIENCE, 62(4): 303-311.

MeteoSchweiz, 2015. Der Föhn. 25.03.2016. www.meteoschweiz.admin.ch/home/klima/vergangenheit/klima-der-schweiz/berichte-rund-ums-jahr/foehn.html

Meyer, F.D., Paulsen, J. und Korner, C., 2008. Windthrow damage in Picea abies is associated with physical and chemical stem wood properties. Trees-Structure and Function, 22(4): 463-473.

Mikita, T., Klimanek, M. und Kolejka, J., 2012. Usage of multidimensional statistic methods with MAXTOPEX factor for Windthrow risk assessment. ALLGEMEINE FORST UND JAGDZEITUNG, 183(3-4): 63-74.

Mitchell, S.J., 2013. Wind as a natural disturbance agent in forests: a synthesis. Forestry, 86(2): 147-157.

Mölter, T., Schindler, D., Albrecht, A.T. und Kohnle, U., 2016. Reviwe on the projections of future storminess over the North Atlantic European Region. Atmos, 7(4): 1-40.

Mousson, A., 1864. Bericht über die Organisation meteorologischer Beobachtungen in der Schweiz, Zürich, 69 pp.

Nilsson, C., Stjernquist, I., Barring, L., Schlyter, P., Jonsson, A.M. und Samuelsson, H., 2004. Recorded storm damage in Swedish forests 1901-2000. Forest Ecol Manag, 199(1): 165-173.

Noetzlin, U., 1941. Beiträge zur Frage der Windmessung am Boden unter besonderer Berücksichtigung der Böenmessung. Wissenschaftliche Abhandlungen des Deutschen Reichsamtes für Wetterdienst (Luftwaffe), 8(5): 1-78.

Ott, E., 1972. Erhebungen über den gegenwärtigen Zustand des Schweizer Waldes als Grundlage waldbaulicher Zielsetzungen. Teil A. In: W. Bosshard (Editor), Mitteilungen. Schweizerische Anstalt für das forstliche Versuchswesen, pp. 1-193.

Otto, H.-J., 2000. Waldbauliche Erfahrungen nach Sturmkatastrophen - eine Rückschau in Niedersachsen (Silvicultural Experience after Wind-Throw Catastrophs - a Retrospect View in Lower Saxony). Forst und Holz, 55(12): 371-376.

Peltola, H., Kellomaki, S. und Vaisanen, H., 1999. Model computations of the impact of climatic change on the windthrow risk of trees. Clim. Change, 41(1): 17-36.

Pfister, C., 1998. Raum-zeitliche Rekonstruktion von Witterungsanomalien und Naturkatastrophen 1496-1995, Zürich, 140 pp.

Pinto, J.G., Ulbrich, U., Leckebusch, G.C., Spangehl, T., Reyers, M. und Zacharias, S., 2007. Changes in storm track and cyclone activity in three SRES ensemble experiments with the ECHAM5/MPI-OM1 GCM. Clim Dyn, 29: 195-210.

Pinto, J.G., Zacharias, S., Fink, A.H., Leckebusch, G.C. und Ulbrich, U., 2009. Factors contributing to the development of extreme North Atlantic cyclones and their relationship with the NAO. Clim. Dyn., 32(5): 711-737.

Poli, P., Hersbach, H., Dee, D.P., Berrisford, P., Simmons, A.J., Vitart, F., Laloyaux, P., Tan, D.G.H., Peubey, C., Thepaut, J.N., Tremolet, Y., Holm, E.V., Bonavita, M., Isaksen, L. und Fisher, M., 2016. ERA-20C: An Atmospheric Reanalysis of the Twentieth Century. J. Clim., 29(11): 4083-4097.

Prahl, B.F., Rybski, D., Burghoff, O. und Kropp, J.P., 2015. Comparison of storm damage functions and their performance. Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 15(4): 769-788.

Quine, C.P., 1991. Recent storm damage to trees and woodlands in southern Britain, HMSO, London.

Raetz, P., 2004. Erkenntnisse aus der Sturmschadenbewältigung. Synthese des Lothar-Grundlagenprogramms. Schriftenreihe Umwelt, 367. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bern, 86 pp.

Ranson, M., Kousky, C., Ruth, M., Jantarasami, L., Crimmins, A. und Tarquinio, L., 2014. Tropical and extratropical cyclone damages under climate change. Clim. Change, 127(2): 227-241.

Ritzmann-Blickenstorfer, H., 1998. 150 Jahre Schweizerischer Bundesstaat im Lichte der Statistik. Bundesamt für Statistik, Neuchâtel, 45 pp.

Rose, S. und Apt, J., 2016. Quantifying sources of uncertainty in reanalysis derived wind speed. Renew. Energy, 94: 157-165.

Schelhaas, J.-M., Hengeveld, G., Moriondo, M., Reinds, G.J., Kundzewicz, W., ter Maat, H. und Bindi, M., 2010. Assessing risk and adaptation options to fires and windstorms in European forestry. Mitg Adapt Glob Change, 15: 681-701.

Schelhaas, M.J., Nabuurs, G.J. und Schuck, A., 2003. Natural disturbances in the European forests in the 19th and 20th centuries. Global Change Biology, 9(11): 1620-1633.

Schiesser, H.-H., Pfister, C. und Bader, J., 1997a. Winter Storms in Switzerland North of the Alps 1864/1865-1993/1994. Theor. Appl. Climatol., 58: 1-9.

Schiesser, H.-H., Waldvogel, A., Schmid, W. und Willemse, S., 1997b. Klimatologie der Stürme und Sturmsysteme anhand von Radar- und Schadendaten. Schlussbericht NFP 31. vdf, Hochschulverlag an der ETH Zürich, Zürich, 132 pp.

Schindler, D., Grebhan, K., Albrecht, A. und Schonborn, J., 2009. Modelling the wind damage probability in forests in Southwestern Germany for the 1999 winter storm 'Lothar'. International Journal of Biometeorology, 53(6): 543-554.

Schindler, D., Grebhan, K., Albrecht, A., Schonborn, J. und 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(1): 57-69.

Schmidt, M., Hanewinkel, M., Kandler, G., Kublin, E. und Kohnle, U., 2010. An inventory-based approach for modeling single-tree storm damage - experiences with the winter storm of 1999 in southwestern Germany. Canadian Journal of Forest Research-Revue Canadienne De Recherche Forestiere, 40(8): 1636-1652.

Schmidtke, H. und Scherrer, H.-U., 1997. Sturmschäden im Wald: [Projektschlussbericht im Rahmen des nationalen Forschungsprogrammes "Klimaänderungen und Naturkatastrophen in der Schweiz", NFP 31]. vdf, Hochschulverlag AG an der ETH Zürich, Zürich, 38 pp.

Schüepp, M., 1950. Wolken, Wind und Wetter. Forschung und Leben. Wissenschaftliche Bibliothek der Büchergilde Gutenberg, 14. Büchergilde Gutenberg, Zürich, 263 pp.

Schüepp, M., 1973. Klimatologie der Schweiz, Wind. Supplement to Annales of the Swiss Meteorological Institute, 107.

Schüepp, M., Schiesser, H.H., Huntrieser, H., Scherrer, H.U. und Schmidtke, H., 1994. The winterstorm "Vivian" of 27 February 1990: about the meteorological development, wind forces and damage situation in the forests of Switzerland. Theor. Appl. Climatol., 49: 183-200.

Schüepp, M., 1995. VIVIAN. Sturmperiode Februar 1990. Arbeitsberichte der Schweizerischen Meteorologischen Anstalt, Nr. 182. Schweizerische Meteorologische Anstalt, Zürich, 17 pp.

Seidl, R., Schelhaas, M.-J., Lindner, M. und Lexer, M.J., 2009. Modelling bark beetle disturbances in a large scale forest scenario model to assess climate change impacts and evaluate adaptive management strategies. Reg. Envir. Chang., 9(2): 101-119.

Seidl, R., Rammer, W. und Blennow, K., 2014a. Simulating wind disturbance impacts on forest landscapes: Tree-level heterogeneity matters. Environ. Modell. Softw., 51: 1-11.

Seidl, R., Schelhaas, M.-J., Rammer, W. und Verkerk, P.J., 2014b. Increasing forest disturances in Europe and their impact on carbon storage. Nat Clim Change, 4(806-810).

Seland Graf, L. und LaCoste, J.H., 2012. Changes in the extratropical storm tracks in response to changes in SST in an AGCM. J Climate, 25: 1854-1870.

Spatzierer, M., Sävert, t. und Laps, S., 2007. Orkantief KYRILL - 18., 19.01.2007 (Tief Nr. 33) - Der schwerste Orkan seit Jahrzehnten. www.unwetterzentrale.de/uwz/348.html

Steyrer, G., Cech, T.L., Fürst, A., Hoyer-Tomiczek, U., Krehan, H., Perny, B. und Tomiczek, C., 2008. Noch keine Beruhigung in Sicht. Forstzeitung, 119(4): 15-17.

Stucki, P., Brnönimann, S., Martius, O., Welker, C., Imhof, M., von Wattenwyl, N. und Philipp, N., 2014. A catalog of high-impact windstorms in Switzerland since 1859. Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 14(11): 2867-2882.

Stucki, P., Brönnimann, S., Martius, O., Welker, C., Rickli, R., Dierer, S., Bresch, D.N., Compo, G.P. und Sardeshmukh, P.D., 2015. Dynamical Downscaling and Loss Modeling for the Reconstruction of Historical Weather Extremes and Their Impacts: A Severe Foehn Storm in 1925. Bull. Amer. Meteorol. Soc., 96(8).

Ulbrich, U., Leckebusch, G.C. und Pinto, J.G., 2009. Extra-tropical cyclones in the present and future climate: a review. Theor. Appl. Climatol., 96(1-2): 117-131.

Usbeck, T., Wohlgemuth, T., Dobbertin, M., Pfister, C., Burgi, A. und Rebetez, M., 2010a. Increasing storm damage to forests in Switzerland from 1858 to 2007. Agricultural and Forest Meteorology, 150(1): 47-55.

Usbeck, T., Wohlgemuth, T., Pfister, C., Volz, R. und Beniston, M., 2010b. Wind speed measurements and forest damage in Canton Zurich (Central Europe) from 1891 to winter 2007. Int J Climatol, 30(3): 347-358.

Usbeck, T., Waldner, P., Dobbertin, M., Ginzler, C., Hoffmann, C., Sutter, F., Steinmeier, C., Volz, R., Schneiter, G. und Rebetez, M., 2012. Relating remotely sensed forest damage data to wind data: storms Lothar (1999) and Vivian (1990) in Switzerland. Theor. Appl. Climatol., 108(3-4): 451-462.

Usbeck, T., 2015. Wintersturmschäden im Schweizer Wald von 1865 bis 2014. Schweiz Z Forstwes, 166(3): 184-190.

Uttinger, H., 1968. Die Zahl der Tage mit Windspitzen von mindestens 20 Metern pro Sekunde in Zürich (1934-1967). Veröffentlichungen der Schweizerischen Meteorologischen Zentralanstalt, 8. City-Druck AG, Zürich, 22 pp.

Valinger, E. und Fridman, J., 2011. Factors affecting the probability of windthrow at stand level as a result of Gudrun winter storm in southern Sweden. Forest Ecol Manag, 262(3): 398-403.

Venaläinen, A., Tuomenvirta, H., Lahtinen, R. und Heikinheimo, m., 2001. The influence of climate warming on soil frost on snow-free surfaces in Finland. Clim. Change, 50: 111-128.

Waldron, K., Ruel, J.-C. und Gauthier, S., 2013. The effects of site characteristics on the landscape-level windthrow regime in the North Shore region of Quebec, Canada. Forestry, 86: 159-171.

Wallentin, C. und Nilsson, U., 2014. Storm and snow damage in a Norway spruce thinning experiment in southern Sweden. Forestry, 87(2): 229-238.

Wan, H., Wang, X.L. und Swali, V.R., 2010. Homogenization and trend analysis of Canadian near-surface wind speeds. J Climate, 23.

Weber, 1867. Auszug aus der Forst-Statistik des Kantons Bern. Buchdruckerei von J. Allemann, Bern.

Welker, C., Martius, O., Stucki, P., Bresch, D., Dierer, S. und Brönnimann, S., 2016. Modelling economic losses of historic and present-day high-impact winter windstorms in Switzerland. Tellus Ser. A-Dyn. Meteorol. Oceanol., 68.

Winkler, P., 2009. Revision and necessary correction of the longterm temperature series if Hohenpeissenberg, 1781-2006. Theor Appl Climatol, 98: 259-268.

WMO, 2006. World Meteorological Organization: Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation. Preliminary seventh edition. WMO-No., 8: 1-569.

Wohlgemuth, T., Conedera, M., Kupferschmid Albisetti, A., Moser, B., Usbeck, T., Brang, P. und Dobbertin, M., 2008. Effekte des Klimawandels auf Windwurf, Waldbrand und Walddynamik im schweizer Wald. Schweiz. Z. Forstwes., 159(10): 336-343.

Wohlgemuth, T., Brang, P., Bugmann, H., Rigling, A. und Zimmermann, N.E., 2014. Forschung zu Wald und Klimawandel in Mitteleuropa: eine Werkschau. Schweiz Z Forstwes, 165(2): 27-36.

WSL und BUWAL (Editors), 2001. Lothar. Der Orkan 1999. Ereignisanalyse. Eidg. Forschungsanstalt WSL, Bundesamt für Wald, Schnee und Landschaft BUWAL, Birmensdorf, Bern, 365 pp.

Xi, W.M., Peet, R.K., Decoster, J.K. und Urban, D.L., 2008. Tree damage risk factors associated with large, infrequent wind disturbances of Carolina forests. Forestry, 81(3): 317-334.

ZWC, 1912. Die drahtlose Telegraphie. Zürcher Wochen-Chronik (ZWC)(455): 481, 483.

Abbildungsverzeichnis

Artikel 1

Figure 3.4.1: Total forest area 1859 - 2006 and average growing stock per hectare 1860–2006 in Switzerland according to various data sources and interpolations (see text). 86

Figure 3.4.2: Amount of severe winter storm damage in Swiss forests: estimated values in grey, adjustments indicated in black (difference). 86

Figure 3.4.3: Trend in average daily winter temperatures as weighted for the 5-year running means of the eight MeteoSwiss stations Basel, Bern, Chateau-d'Oex, Davos, Engelberg, Genève, Sion, and Zurich. Homogenised data for the periods Dec-Jan-Feb derived from MeteoSwiss. 88

Figure 3.4.4: Trend in winter precipitation as weighted for the 5-year running means of the eight stations Basel, Bern, Chateau-d'Oex, Davos, Engelberg, Genève, Sion, and Zurich. Homogenised data for the periods December to January to Febuary derived from MeteoSwiss. 89

Figure 3.4.5: Maximum gust wind speed during WS events in Canton Zurich (Zurich MeteoSwiss station) and damage per hectare in Canton Zurich, from 1891 to winter 2007. Regression line: ($\log10(y) = -10.206 + \log10(x) \times 6.565$; $R^2 = 0.405$, $p = 0.0015$). 91

Figure 3.4.6: Maximum gust wind speed during WS events in Canton Zurich (Zurich MeteoSwiss station), daily maximum gust wind speed of >30 ms^{-1}, and damage levels in respect to growing stock in Canton Zurich, for the period from January 1891 to winter 2006-2007. 91

Artikel 2

Figure 4.3.1: History of wind measurement at the Zurich climate station in terms of locality, instruments used and data collected. 110

Figure 4.4.1: Ranked values of the high-tail homogenized daily maximum hourly average wind speed in winter from 1 January 1891 to 31 March 2007 at the Zurich climate station. 118

Figure 4.4.2: Number of days with high maximum hourly average wind speed in winter (October-March) from 1895 to 2004 at the Zurich climate station at 5-year intervals. 118

Figure 4.4.3: Number of days with high maximum gust wind speed in winter (October-March) from 1935 to 2004 at the Zurich climate station at 5-year intervals. 119

Figure 4.4.4: Winter storm damaged part of the growing stock from 1895 to 2004 in Zurich at 5-year intervals. 120

Artikel 3

Figure 5.3.1: Spatial distributions of the samples and estimations: **a** inventoried forest damage from the Lothar storm in Switzerland (*black areas*) in the inventory area *(grey*); **b** simulation of the Lothar storm in Switzerland, *grid points* buffers 5 km in radius around the grid points (*grey* regions of interest); **c** Inventoried forest damage from the Vivian storm in Switzerland (*black areas*) from the buffers 5 km in radius (*grey* buffer area) around the ANETZ meteorological stations; **d** simulation of the Lothar storm in Switzerland: *grid points* circle 3 km in radius, equivalent in area to the rectangular buffers around the grid points, longitudinal to the wind direction (*grey* regions of interest); **e** simulation of the Lothar storm in Switzerland: *grid points* circle 3 km in radius, equivalent in area to the rectangular buffers around the grid points, perpendicular to the wind direction (*grey* regions of interest); **f** expert estimates related to the Lothar storm in Switzerland (MeteoSwiss estimation): Swiss stream network (*thin black lines and grey areas*), inventoried forest damage (*black areas*), isotaches (*black lines*, thickness according to estimated maximum gust-wind speed [km h^{-1}]; numbers, estimated interisotach average

of the maximum gust wind speed for a certain time step; isotachs: WSL and BUWAL, 2001); **g** expert estimates related to the Lothar storm in Switzerland (WSL estimation): areas with estimated maximum gust-wind speeds greater than 125 km h^{-1} (*grey areas*) 148

Figure 5.5.1: Box-plots illustrating the variability of the observed wind pressure in the eight interisotach-clusters of the maximum gust map (Expertise MeteoSwiss): clusters named according to the mean of the estimated wind pressure vs. observed wind pressure 154

Figure 5.5.2: Box-plots illustrating the variability of the observed damage area fraction in the eight interisotach-clusters of the maximum gust map (Expertise MeteoSwiss): clusters named according to the mean of the estimated wind pressure vs. observed damage area fraction 155

Figure 5.5.3: Box-plots illustrating the variability of the observed wind pressure in the two interisotach-clusters of the maximum gust map (Expertise WSL): clusters named according to the estimated wind pressure level vs. observed wind pressure 156

Figure 5.5.4: Box-plots illustrating the variability of the observed damage area fraction in the two interisotach-clusters of the maximum gust map (Expertise WSL): clusters named according to the estimated wind pressure level vs. The observed damage area fraction 157

Artikel 4

Abb 6.3.1: Entwicklung der Bezugsgrösse Vorrat pro Hektare. 1865 bis 1982: hypothetischer Vorrat gemäss Kurz et al (1998), ab 1983 Vorrat (der lebenden Bäume) pro Hektare gemäss Landesforstinventar (Auswertungseinheit: gemeinsamer zugänglicher Wald ohne Gebüschwald LFI1–LFI4b). 175

Abb 6.4.1: Schadholzvolumen und Schadanteil der 26 schweren Winterstürme (Schaden ≥70 000 m^3 je Ereignis) in der Schweiz von 1865 bis 2014. 177

Abb 6.4.2: Relative Schäden (Schadholzvolumen pro Hektare Waldfläche) pro Kanton und für die Schweiz. Angegeben sind der Mittelwert und die Standardabweichung der 26 schweren Winterstürme (Schaden ≥ 70 000 m^3 je Ereignis) von 1865 bis 2014 in der Schweiz. 178

Abb 6.4.3: Anzahl täglicher Spitzenböen ≥30.0 m/s an der SwissMetNet-Station Zürich-Fluntern (ab Periode 1895–1899) und Anzahl schwerer Winterstürme (Schaden ≥ 70 000 m^3 je Ereignis; ab Periode 1865–1869) je 5-Jahres-Intervall. 179

Abb 6.5.1: Ein in einem Wintersturm geknickter Einzelbaum. 183

Tabellenverzeichnis

Artikel 1

Table 3.4.1: Severe winter storm damage >70,000 m^3 during the past 150 years. 85

Table 3.4.2: Severe winter storm damage and climate in the damaged region during the past 150 years. 87

Table 3.4.3: Comparison of qualitative soil conditions in the Swiss lowlands during 215 winter storm events (according to weather reports) and the 26 recorded severe winter storms. 87

Table 3.4.4: Strong daily maximum gust wind speed events (≥30 m s^{-1}) recorded at the Zurich climate station from 1 January 1891 to 31 March 2007. 90

Table 3.4.5: Correspondence between maximum gust wind speed [m s^{-1}] at the Zurich climate station and forest damage [m^3 ha^{-1}] in Canton Zurich since 1 January 1891 expressed in product-moment and rank correlation coefficients. 90

Artikel 2

Table 4.4.1: Rank correlation coefficients between wind force and windstorm damage in Canton Zurich with respect to daily wind distributions in winter (October-March) from 1 January 1891 to 31 March 2007: number of measurements (n) in brackets, significant values underlined ($p < 0.05$). 121

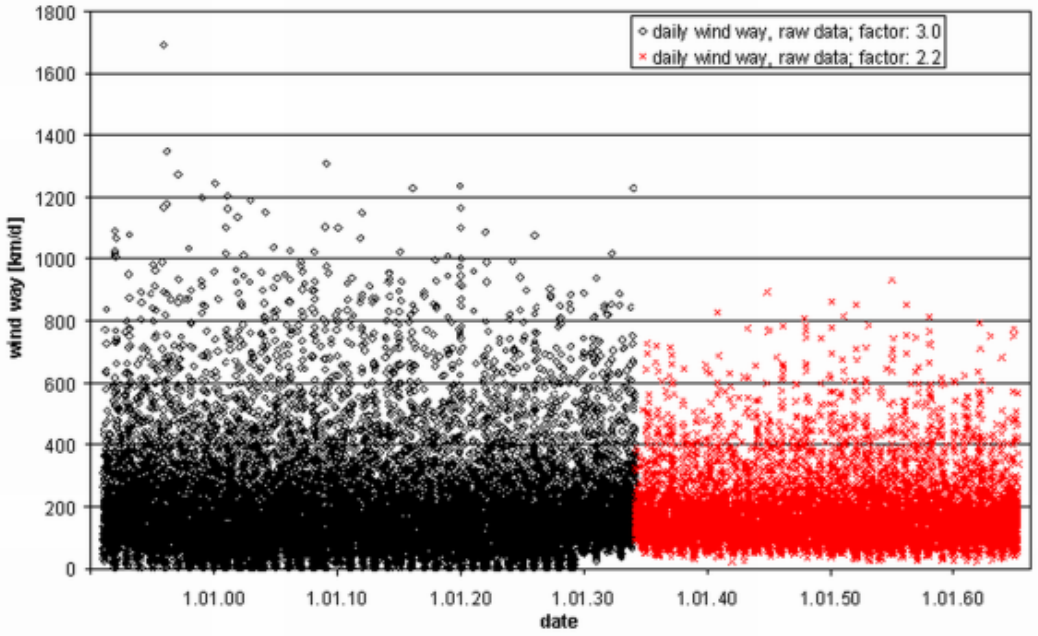
Table 4.4.2: Semi-percentile statistic of the qualitatively and quantitatively recorded windstorm damage events of Zurich with respect to daily wind speed distributions in winter (October-March) from 1 January 1891 to 31 March 2007. 122

Artikel 3

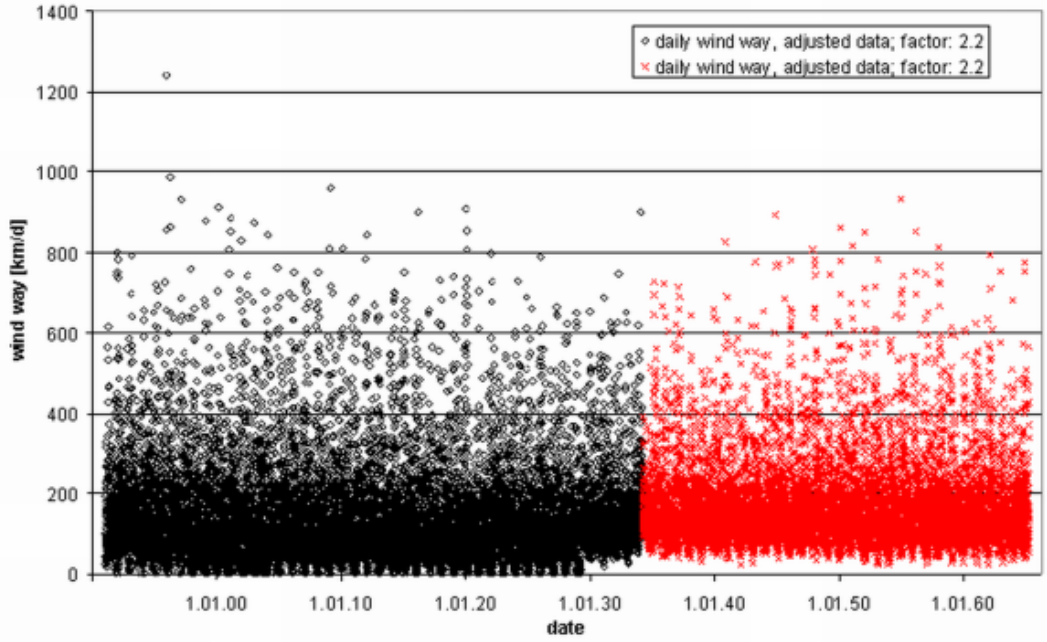
Table 5.3.1:	Wind speed variables used in this study	145
Table 5.3.2:	Investigation plan illustrating the scheduled approaches	146
Table 5.5.1:	Coefficients of determination (R^2) and probabilities of the test statistics (p values) according to the investigation plan (described in section 3; legend, see Table 5.3.2; *bold p* values; *underlined* significant values)	152

Anhang

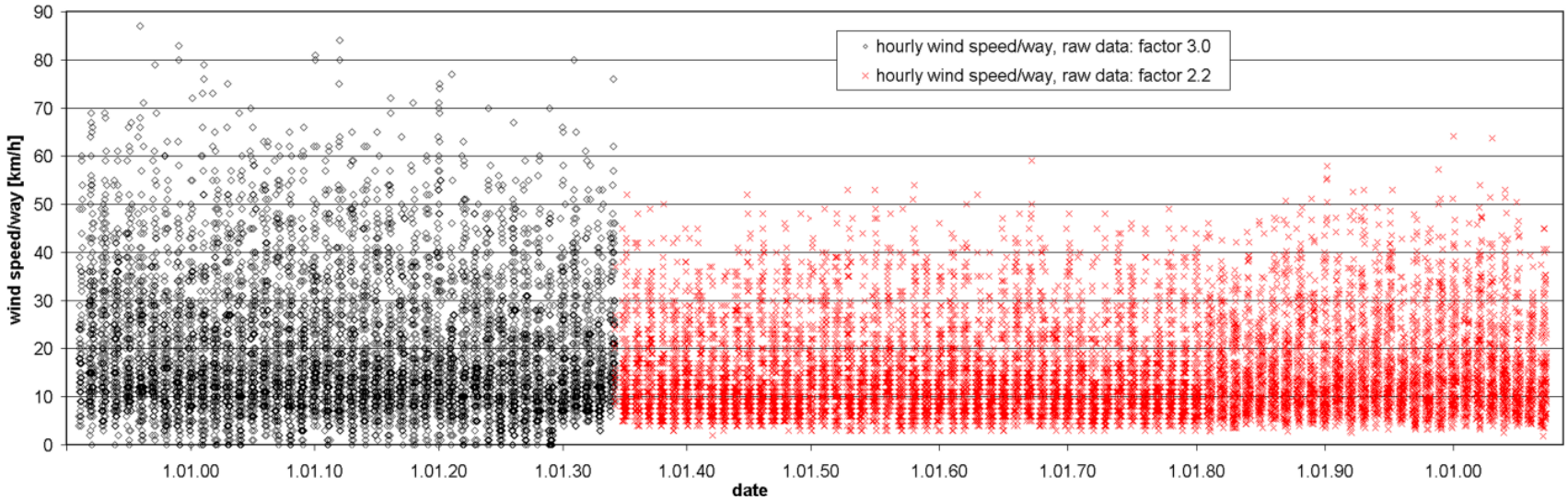
Zusätzliches Material zu Artikel 2



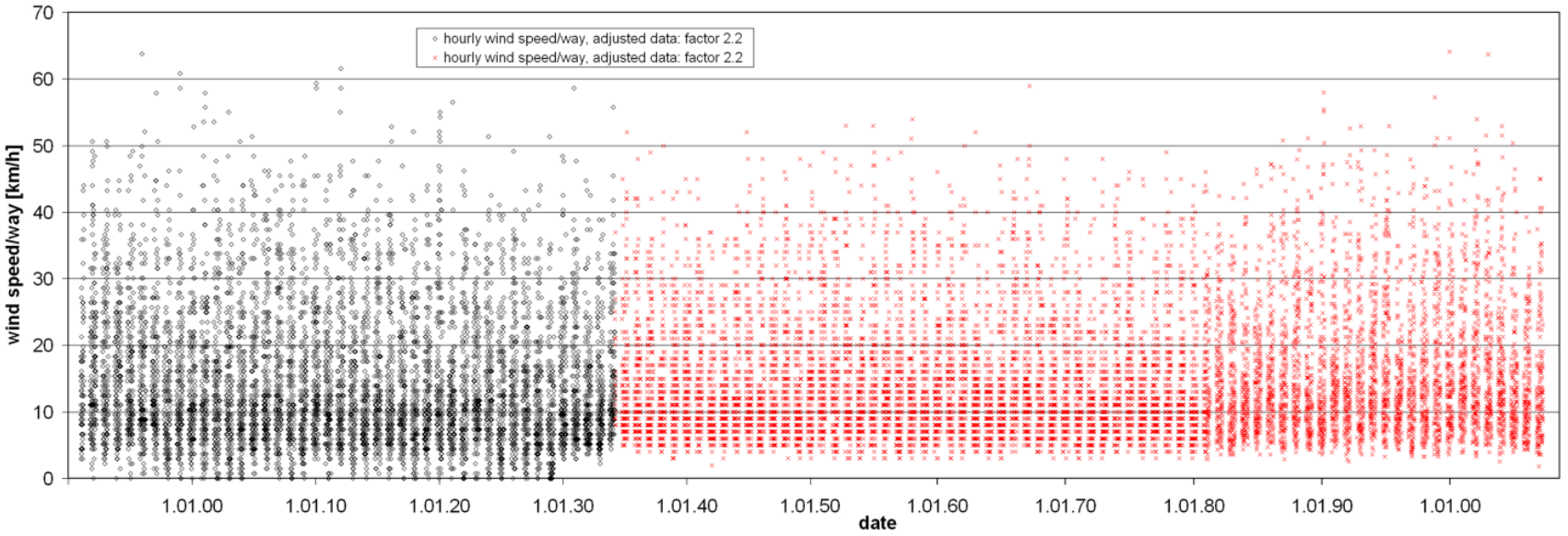
Supplement 1a: Daily wind run until and after correction (5 March 1934): raw data.



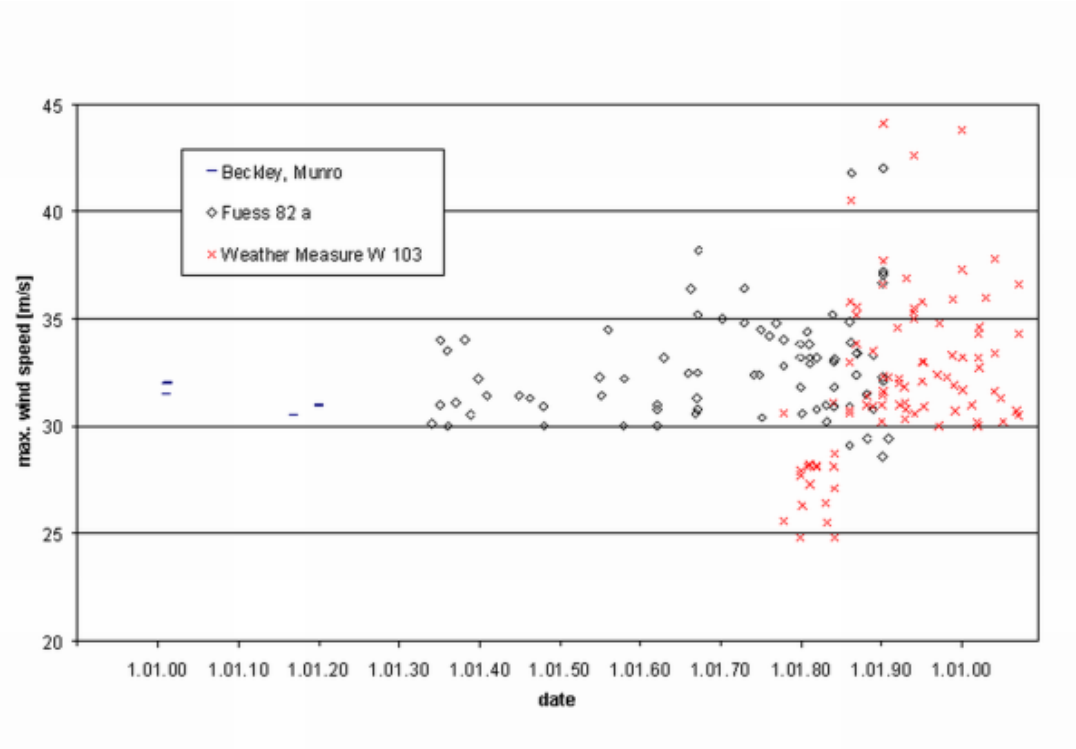
Supplement 1b: Daily wind run until and after correction (5 March 1934): adjusted data



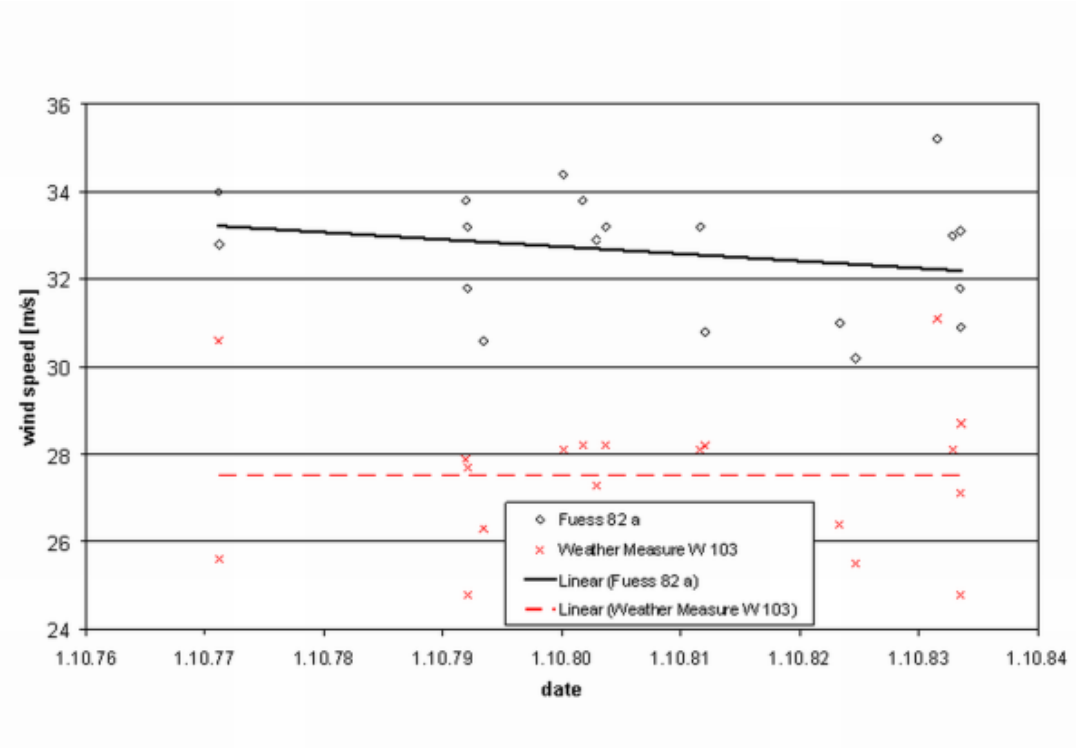
Supplement 2a: Daily maximum of hourly average wind speed until and after correction (5 March 1934): raw data



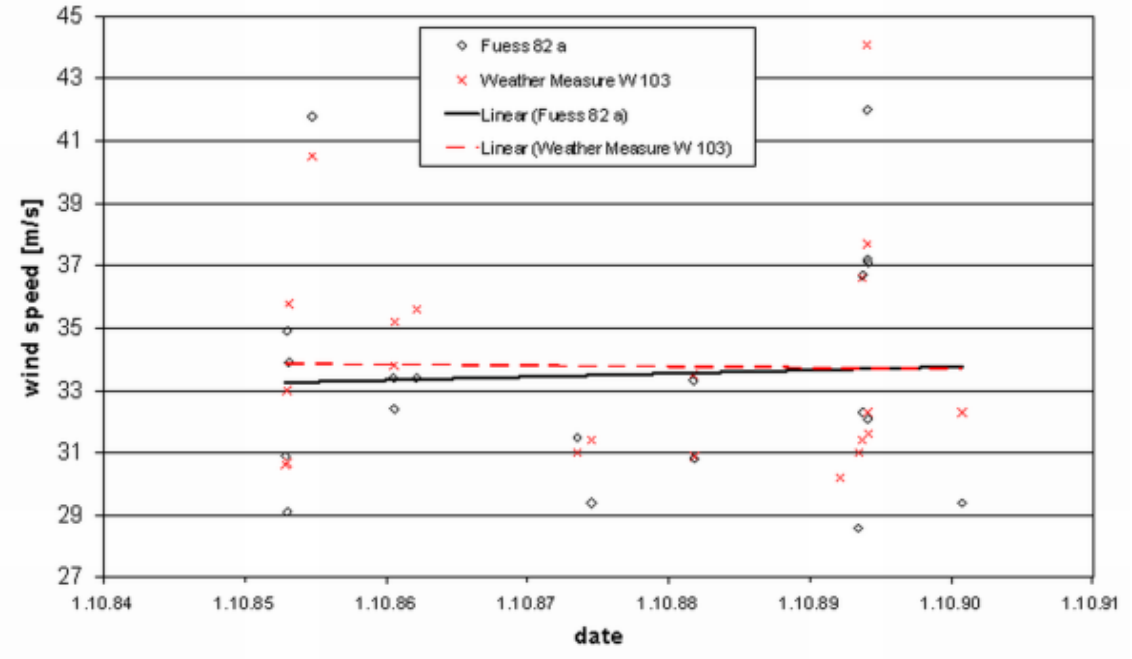
Supplement 2b: Daily maximum of hourly average wind speed until and after correction (5 March 1934): adjusted data



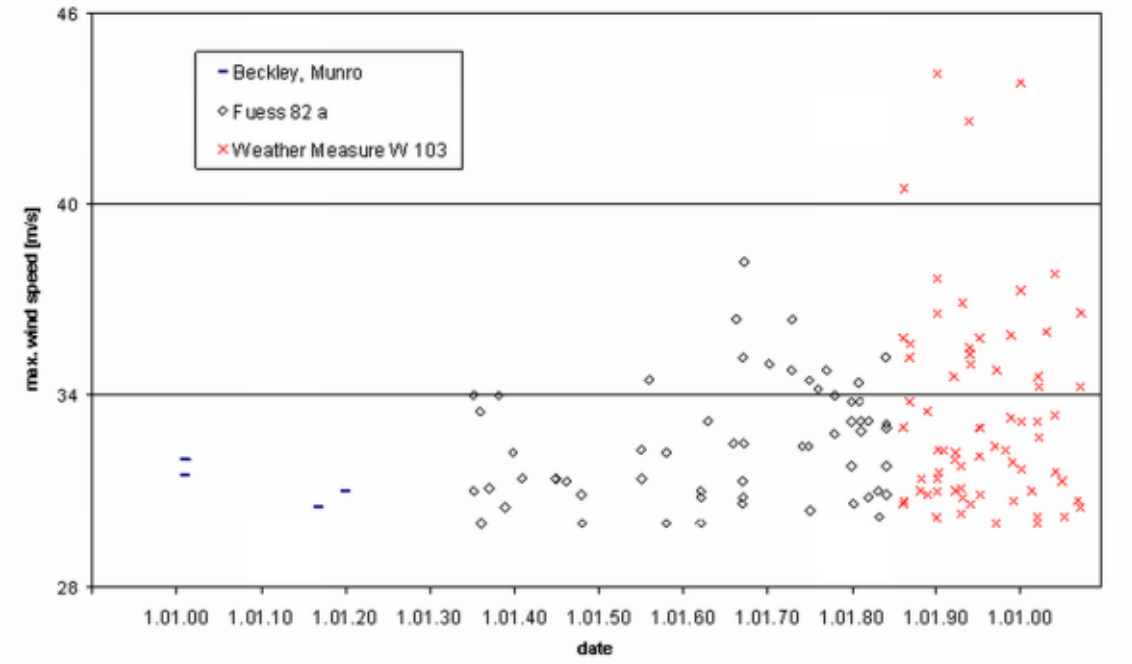
Supplement 3a: Daily maximum gust wind speed of at least 30 m/s and corresponding parallel measurements



Supplement 3b: Daily maximum gust wind speed of at least 30 m/s and corresponding parallel measurements: since setup of the Weather Measure W 103 until its replacement



Supplement 3c: Daily maximum gust wind speed of at least 30 m/s and corresponding parallel measurements: since the replacement of the Weather Measure W 103 until end of winter 1990



Supplement 3d: Daily maximum gust wind speed of at least 30 m/s; 1934 to 2007 homogenised

Publikationen

Die unten aufgeführte Liste enthält meine Publikationen bzw. Publikationen mit meiner Beteiligung, die in Verbindung mit der Thematik der hier vorgestellten Untersuchung stehen. Die vier durch Fettdruck hervorgehobenen Veröffentlichungen sind Teil der vorliegenden Studie.

Usbeck, T., 2015. Wintersturmschäden im Schweizer Wald von 1865 bis 2014. Schweiz. Z. Forstwes. 166, 3: 184-190.
→ Artikel 4

Brönnimann, S., Martius, O., von Waldow, H., Welker, C., Luterbacher, J., Compo, G.P., Sardeshmukh, P.D., Usbeck, T., 2012. Extreme winds at northern mid-latitudes since 1871. Meteorol. Z. 21, 1: 13-27.

Usbeck, T., Waldner, P., Dobbertin, M., Ginzler, C., Hoffmann, C., Sutter, F., Steinmeier, C., Volz, R., Schneiter, G., Rebetez, M., 2012: Relating remotely sensed forest damage data to wind data: storms Lothar (1999) and Vivian (1990) in Switzerland. Theor. Appl. Climatol. 108, 3-4: 451-462.
→ Artikel 3

Usbeck, T., Wohlgemuth, T., Pfister, C., Volz, R., Beniston, M., Dobbertin, M., 2010. Wind speed measurements and forest damage in Canton Zurich (Central Europe) from 1891 to winter 2007. Int. J. Climatol. 30, 3: 347-358.
→ Artikel 2

Usbeck, T., Wohlgemuth, T., Dobbertin, M., Pfister, C., Bürgi, A., Rebetez, M., 2010. Increasing storm damage to forests in Switzerland from 1858 to 2007. Agric. For. Meteorol. 150, 1: 47-55.
→ Artikel 1

Gardiner, B., Blennow K., Carnus J.M., Fleischer P., Ingemarson F., Landmann G., Lindner M., Marzano M., Nicoll B., Orazio C., Peyron J.L., Reviron M.P., Schelhaas M.J., Schuck A., Spielmann M., and Usbeck T., 2010. Destructive storms in European forests: past and forthcoming impacts. The Atlantic European Regional Office of the European Forest Institute – EFIATLANTIC report to the EC. 138 p. URL: http://ec.europa.eu/environment/forests/pdf/STORMS%20Final_Report.pdf (letztmalig besucht: 20.10.2016)

Usbeck, T., 2010. Vor dem nächsten Sturm. Erkenntnisse aus dem Orkan „Lothar“: Seminar an der SHL Zollikofen. Wald und Holz. 7: 25-27.

Usbeck, T., Wohlgemuth, T., Dobbertin, M., 2009. Change detection: maximum wind speed measurements and assessments of storm damage to forest: the importance of quality control. [Abstract] In: Kaennel Dobbertin, M. (ed) Long-term ecosystem research: understanding the present to shape the future. International Conference Zürich, Switzerland, September 7-10, 2009. Abstracts. Birmensdorf, Swiss Federal Research Institute WSL. 107.

Wohlgemuth, T., Conedera, M., Kupferschmid Albisetti, A., Moser, B., Usbeck, T., Brang, P., Dobbertin, M., 2008. Effekte des Klimawandels auf Windwurf, Waldbrand und Walddynamik im Schweizer Wald. Schweiz. Z. Forstwes. 159, 10: 336-343.

Dobbertin, M., Usbeck, T., 2007. Windwurf und Risiko. In: Wohlgemuth, T. (Red.) Forschungsprogramm Walddynamik: Fazit und Trends. Fachtagung der Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf, 28. November 2007. Abstracts und Publikationen. Birmensdorf, Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL. 5.

Hoffmann, C.W., Kovalev, A.V., Lischke, H., Mochalov, S.A., Soukhovolsky, V.G., Usbeck, T. , 2007. Reforestation after windthrow in Ural: Models on Different Scales. Proceedings of the Vancouver Conference August 5-9, 2007. Fourth International Wind and Trees conference. The International Union of Forest Research Organizations (IUFRO) Section 8.01.11. p. 53. URL: http://faculty.forestry.ubc.ca/mitchell/publications/wind_&_trees_abstracts_combined.pdf (letztmalig besucht: 20.10.2016)

Hoffmann, C.W., Kovalev, A.V., Lässig, R., Lischke, H., Mochalov, S.A., Soukhovolsky, V.G., Usbeck, T., 2007. Assessing storm events and reforestation in the Ural, Russia. Proceedings of the Vancouver Conference August 5-9, 2007. Fourth International Wind and Trees conference. The International Union of Forest Research Organizations (IUFRO) Section 8.01.11. p. 80. URL: http://faculty.forestry.ubc.ca/mitchell/publications/wind_&_trees_abstracts_combined.pdf (letztmalig besucht: 20.10.2016)

Lebenslauf

Alfred Tilo Usbeck

geboren am 02. Juni 1965 in Karl-Marx-Stadt, DDR (heute Chemnitz, Deutschland)

Berufsausbildung und berufliche Weiterbildung

1981 – 1983 **Facharbeiterausbildung**, Abschluss: **Holzmodellbauer**

1988 – 1989 Lehrgang **Holzschutz**, Abschluss: **zugelassener Holzschutzfachmann**

1994 – 1995 Lehrgang **Technikfolgen-Umwelt**, Abschluss: **Testate**

Studien

1987 – 1990 **Holztechnik** an der Ingenieurschule für Holztechnik Dresden, Fachrichtung Möbel und Bauelemente; Abschluss: **Ingenieur für Möbel und Bauelemente**

1995 – 2002 **Forstwissenschaften** (Vertiefungsrichtung: Wirtschaft/Planung) an der Technischen Universität Dresden in Tharandt, Fakultät Forst-, Geo- und Hydrowissenschaften; Abschluss: **Diplom-Forstwirt**

Wissenschaftliche Tätigkeiten:

2003 Praktikum: **Aktualisierung langer Temperatur- und Niederschlagsreihen der Schweiz**

2003 – 2009 Projekt: **Windwurf und Risiko – Entwicklung eines Windwurf-Risikomodells unter Verwendung der Informationen der Winterstürme Vivian und Lothar**

2005 Projekt: **Schwemmholz**

2005 Praktikum: **Baumphysiologische Untersuchungen zweier Koniferenarten im subtropischen Gürtel Chinas**

2008 Praktikum: **Stickstoffeinträge in Waldböden unter Bedingungen des Klimawandels**

2009 Projekt: **Kosten des Trinkwasserschutzes im Schweizer Wald**

2009 – 2010 Projekt: **Destructive Storms in European Forests: Past and Forthcoming Impacts**

2010 – 2016 **Dissertation** an der Université de Neuchâtel, Faculté des lettres et sciences humaines, und der Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf, Forschungseinheit Walddynamik