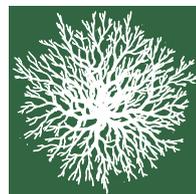


# Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen



Journal forestier suisse  
Rivista forestale svizzera  
Swiss Forestry Journal

ISSN 0036-7818 (Print) • ISSN 2235-1469 (Internet)  
[www.forstverein.ch](http://www.forstverein.ch)

Zweimonatliche wissenschaftliche Zeitschrift des Schweizerischen Forstvereins

Journal scientifique bimensuel de la Société forestière suisse

Bimonthly scientific journal by the Swiss Forestry Society

The journal is covered by AGRIS, CAB Abstracts, HoWiLit, Scopus and Swiss Wildlife Information Service (SWIS), Wildlife & Ecology Studies Worldwide.

#### Finanzielle Unterstützung • Soutien financier • Financial support

- Bundesamt für Umwelt (BAFU) • Office fédéral de l'environnement (OFEV)
- Akademie der Naturwissenschaften Schweiz (SCNAT) • Académie suisse des sciences naturelles (SCNAT)
- die Schweizer Kantone • les cantons suisses

#### Herausgeber • Editeur • Publisher

Schweizerischer Forstverein, Geschäftsstelle, Obstgartenstrasse 27,  
CH-8006 Zürich, Telefon +41 44 350 08 02, [info@forstverein.ch](mailto:info@forstverein.ch)

#### Chefredaktorin • Rédactrice en chef • Editor-in-chief

Barbara Allgaier Leuch  
Mythenstrasse 2, CH-8308 Illnau, Telefon +41 52 347 21 79, [szf@forstverein.ch](mailto:szf@forstverein.ch)

#### Inserate • Annonces • Advertisements

Stämpfli AG, Inseratemanagement,  
Wölflistrasse 1, Postfach, CH-3001 Bern,  
Telefon +41 31 300 63 82, [inserate@staempfli.com](mailto:inserate@staempfli.com)

#### Copyright

Reprints only with the approval of the publisher

#### Mitgliedschaft • Affiliation • Membership

beim Schweizerischen Forstverein • à la Société forestière suisse

- Einzelmitglied • membre individuel: CHF 200.– (EUR 175.–)
- Kollektivmitglied • membre collectif: CHF 400.– (EUR 350.–)
- Familienmitgliedschaft • membre famille: CHF 325.– (EUR 285.–)
- Studierende • étudiants: CHF 100.– (EUR 85.–)

In der Mitgliedschaft sind das Abonnement der Schweizerischen Zeitschrift für Forstwesen und der Zugang zur elektronischen Zeitschrift inbegriffen • L'abonnement du Journal forestier suisse et l'accès au Journal électronique sont inclus dans l'affiliation.

#### Abonnement • Abonnement • Subscription

Switzerland: CHF 175.–  
International: EUR 130.–  
Internet access for individual subscribers is free.

EXCELLENCE IN PROJECT MANAGEMENT

# CYCAD

Ihr Spezialist für  
Gruben, Steinbrüche  
und Deponien.



Cycad AG • Langmauerweg 12 • CH-3011 Bern  
+41 31 318 7744 • [info@cycad.ch](mailto:info@cycad.ch) • [www.cycad.ch](http://www.cycad.ch)

Ich will die Schweizerische Zeitschrift für  
Forstwesen abonnieren • Mitglied beim  
Schweizerischen Forstverein werden



Je m'abonne au Journal forestier  
suisse • J'adhère à la Société  
forestière suisse



I subscribe to the Swiss Forestry Journal •  
I apply for membership of the  
Swiss Forestry Society



# Können Windwurfschäden vermindert werden? Eine Analyse von Einflussgrößen

Marc Hanewinkel    Albert-Ludwigs-Universität Freiburg (DE)\*  
Axel Albrecht      Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg (DE)  
Matthias Schmidt    Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (DE)

## Können Windwurfschäden vermindert werden? Eine Analyse von Einflussgrößen

Der Artikel beschäftigt sich mit den wichtigsten Faktoren, die Sturmschäden in Wäldern beeinflussen können, und mit der Frage, wie diese Schäden minimiert werden können. Bei den Einflussfaktoren wird unterschieden zwischen baumbezogenen Parametern (z.B. Baumart, Baumhöhe, Schlankheitsgrad), geländebezogenen Variablen (z.B. Windgeschwindigkeit, Bodenzustand) sowie der Art der Waldbehandlung und der Bestandesstruktur. Hierbei zeigt sich bei der Analyse einer Vielzahl von Untersuchungen, die sowohl empirische als auch mechanistische Modelle umfassen, dass Nadelbäume, insbesondere die Fichte, gegenüber Laubbäumen eine erhöhte Schadenwahrscheinlichkeit aufweisen. Viele Untersuchungen weisen auf einen signifikanten Einfluss der Baumhöhe auf die Sturmschadensanfälligkeit hin, während dem Schlankheitsgrad nicht in allen Studien dieselbe Bedeutung zukommt. Die waldbauliche Behandlung, insbesondere Zeitpunkt und Intensität der Eingriffe, hat ebenfalls einen Einfluss auf die Höhe des zu erwartenden Sturmschadens, ebenso die Bodenvernässung und die Exposition gegenüber der Hauptwindrichtung. Plenterwälder erweisen sich in den vorhandenen Studien aus der Schweiz als wenig sturmanfällig, doch lässt sich eine generelle Überlegenheit dieser ungleichaltrigen Wälder gegenüber gleichaltrigen aufgrund fehlender Daten derzeit nicht nachweisen. Nach einer Diskussion der Bedeutung der verschiedenen Variablen werden Massnahmen zur Reduktion von Sturmschäden angesprochen. Dabei wird vor allem auf Baumartenwahl, Begrenzung der Bestandesoberhöhe sowie frühe, intensive Durchforstungen eingegangen.

**Keywords:** windthrow, storm damage, statistical modelling, mechanistic modelling, predictors  
**doi:** 10.3188/szf.2015.0118

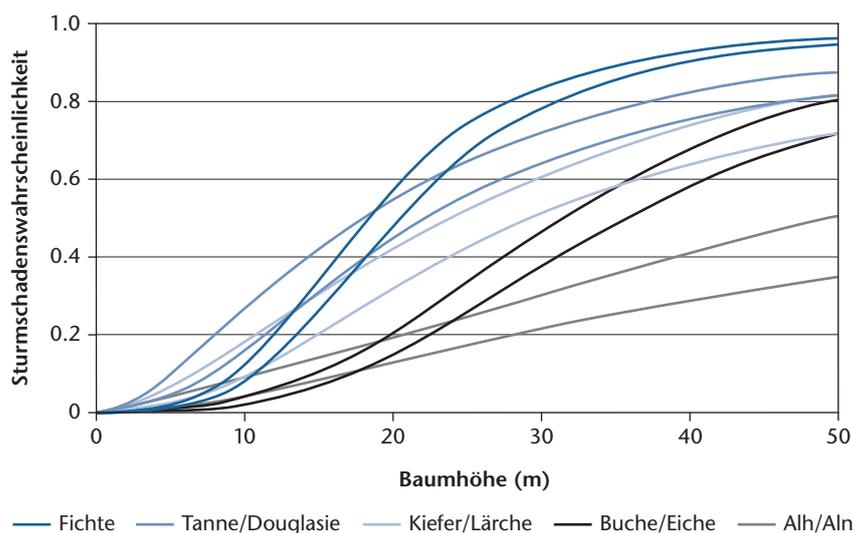
\* Tennenbacherstrasse 4, DE-79106 Freiburg, E-Mail marc.hanewinkel@ife.uni-freiburg.de

**S**türme sind bezogen auf das Schadholzvolumen nach wie vor die wichtigste Störung in den Wäldern Europas. Nach Schelhaas et al (2003) wurden in Europa in den Jahren 1950 bis 2000 im Durchschnitt jährlich 35 Millionen Kubikmeter Schadholz durch Störungen verursacht, davon waren 53 Prozent auf Stürme, im Wesentlichen Winterstürme, zurückzuführen. In der Schweiz waren die Stürme Vivian und Wiebke (Spätwinter 1990) sowie Lothar (Dezember 1999) besonders prominent. In einer Untersuchung im Grossraum Zürich stellten Usbeck et al (2010) fest, dass das Sturmschadenniveau in den letzten 50 Jahren um das 17- bis 22-Fache höher war als in den Jahren davor. Bei der wissenschaftlichen Analyse von Sturmschäden werden zwei unterschiedliche Typen von Modellen verwendet: 1) mechanistische Modelle, die unmittelbar auf physikalischen Gesetzmässigkeiten beruhen und Daten auf der Basis von Experimenten wie Umzieh- oder Windtunnelexperimenten ermitteln, und

2) empirische (statistische) Modelle, die einen statistischen Zusammenhang zwischen beobachteten Sturmschäden und möglichen Einflussfaktoren in Form einer Wahrscheinlichkeit herstellen. Solche Faktoren, die die Höhe des jeweiligen Schadens eines Sturmereignisses beeinflussen, variieren je nach den lokalen Bedingungen stark. Grob können zwei Gruppen von Faktoren unterschieden werden: 1) vom Menschen nicht beeinflusste wie Windklima (z.B. mittlere Windgeschwindigkeit sowie maximale Böengeschwindigkeit und Windrichtung; Usbeck et al 2010), Exposition, Wasserhaushalt und Bodensubstrat; 2) vom Menschen im Rahmen der Bewirtschaftung beeinflusste Faktoren. Dazu gehören Parameter wie Baumart und Baum- oder Bestandeshöhe sowie Schlankheitsgrad (h/d-Verhältnis), Kronenlänge, Bestandesdichte und -struktur (für einen Überblick über die Risikofaktoren vgl. Hanewinkel et al 2011). In den meisten Studien über Sturmschäden werden Baum- und Bestandescharakteristika



**Abb 1** Die Sturmfläche Schwanden (Glarus) im Jahr 1991, d.h. ein Jahr nach Vivian: Die unbelaubten Buchen vermochten dem Sturm zu trotzen, die Nadelbäume wurden geworfen. Foto: Heinz Kasper/WSL



**Abb 2** Sturmschadenswahrscheinlichkeit in Abhängigkeit von der Baumart und der Baumhöhe (nach Schmidt et al 2010). Die beiden Kurven je Baumart bezeichnen jeweils das Vertrauensintervall (95%). Alh/Aln: sonstige Laubbäume mit hoher (Alh) bzw. niedriger (Aln) Umtriebszeit.

häufiger als schadenbestimmend genannt als Standorteigenschaften. Ziel des vorliegenden Beitrages ist es, die wichtigsten Einflussgrößen für Sturmschäden in Wäldern zu eruieren und, falls möglich, deren Beeinflussbarkeit durch Bewirtschaftung zu analysieren. Die Analyse basiert im Wesentlichen auf Studien zu Sturmschäden aus dem europäischen Raum. Wo möglich und vorhanden, wird Bezug auf Untersuchungen aus der Schweiz genommen. In einem abschliessenden Kapitel werden Massnahmen zur Schadensreduktion diskutiert.

### Baumart

Der Baumarteffekt basiert im Wesentlichen auf dem höheren Luftwiderstand immergrüner Nadelwälder während der Sturmsaison im Winter, während Laubbäume in dieser Zeit keine Blätter haben

(Mayer et al 2005, Schütz et al 2006, Hanewinkel et al 2008; Abbildung 1). Entsprechend wiesen Dobbertin et al (2002) auf der Basis einer Stichprobe auf dem Sanasilva-Netz für die Schweiz einen klaren Effekt der Baumart auf das Schadensausmass des Sturmes Lothar nach: Fichten und Tannen waren mehr als doppelt so häufig geschädigt wie Laubbölder. Modellvergleiche in Bezug auf Baumarten sind jedoch begrenzt, da es derzeit noch keinen Ansatz gibt, der die gesamte Bandbreite von Baumarten abdeckt. Auch Schmidt et al (2010) fanden eine abnehmende Sturmschadenswahrscheinlichkeit für Einzelbäume auf der Basis von Schäden durch den Sturm Lothar von i) Fichte über ii) Weisstanne/Douglasie, iii) Waldkiefer/Europäische Lärche, zu iv) Buche/Eiche und v) sonstigen Laubbäumen. Eine ähnliche Rangfolge beschreiben auch andere Autoren (Peltola et al 1999, Jalkanen & Mattila 2000, Hanewinkel et al 2004, Mayer et al 2005, Schütz et al 2006). Bei den Nadelbaumarten berichtet Dhôte (2005) folgende Reihung für die Sturmschadensanfälligkeit: Fichte > Kiefer > Tanne > Sitkafichte > Douglasie > Schwarzkiefer > Europäische Lärche (vgl. auch Bouchon 1987).

Bei der Douglasie wird aufgrund der besseren Verankerung im Boden häufig eine höhere Sturmschadensresistenz als für die Fichte angenommen. Bemerkenswerterweise ermittelten Albrecht et al (2013) auf der Basis einer langfristigen Datenreihe von zur Hauptsache Reinbeständen eine überproportional hohe Anfälligkeit von Douglasien für Sturmschäden, die sogar diejenige der Fichte übersteigt. Unterstützt wird dieses Ergebnis in Teilen auch von Schmidt et al (2010), die zeigten, dass bei niedrigen Baumhöhen (<18 m) die Anfälligkeit der Baumartengruppe Tanne/Douglasie höher ist als die der Fichte (Abbildung 2).

### Baumhöhe und abgeleitete Dimensionsparameter

Viele statistische (Kellomäki & Peltola 1998, Schmidt et al 2010) und mechanistische Modellierungsansätze (Peltola et al 1999, Cucchi et al 2005) prognostizieren eine mit zunehmender Baumhöhe steigende Schadenswahrscheinlichkeit. Dies wird auch von der Untersuchung von Dobbertin et al (2002) für die Schweiz bestätigt. Die Studie von Schmidt et al (2010) beschreibt einen herausragenden Effekt der Baumhöhe auf die Schadenswahrscheinlichkeit, wobei dieser Effekt je nach Baumart unterschiedlich gross ist und individuelle Charakteristiken zeigt: So wiesen sowohl Fichten als auch Buchen sensitive Höhenbereiche auf, was sich im sigmoiden Verlauf der Schadenswahrscheinlichkeitskurve in Abbildung 2 zeigt, während bei Tanne, Douglasie, Kiefer und Lärche die Schadenswahrscheinlichkeit eher gleichmässig anstieg.

In verschiedenen Modellen werden Parameter verwendet, die mehr oder weniger eng mit der Bestandeshöhe korreliert sind. So benutzten Fridman & Valinger (1998) unter anderem das Stammvolumen, den mittleren Durchmesser, die Mittelhöhe und einen Volumenindex als unabhängige Variablen in ihren empirischen Modellen. Nach den Ergebnissen des statistischen Modells von Jalkanen & Mattila (2000) steigt die Anfälligkeit eines Waldbestandes für Sturmschäden mit zunehmendem Durchmesser und Bestandesalter. Die Baumhöhe, insbesondere die Bestandesoberhöhe, hat in Modellen den Vorteil, dass sie mehr oder weniger unabhängig von der waldbaulichen Behandlung ist. Sie ist allerdings wesentlich aufwendiger zu erfassen als der Durchmesser, was durch neuere Technologien wie LIDAR jedoch zunehmend einfacher wird.

### Schlankheitsgrad

Der Effekt der mit steigendem Schlankheitsgrad ( $h/d$ -Wert) steigenden Schadenswahrscheinlichkeit wird in vielen Untersuchungen beschrieben (z.B. Peltola et al 1999, Gardiner et al 1997). Lediglich Schütz et al (2006) fanden einen vernachlässigbaren Einfluss des Schlankheitsgrads bei Fichte und Buche. Peltola et al (1999), Kellomäki & Peltola (1998) sowie Peltola & Kellomäki (1993) prognostizierten – für Fichten und Kiefern in Finnland – einen schnelleren Anstieg der Schadenswahrscheinlichkeit mit zunehmendem Schlankheitsgrad als Albrecht et al (2012), die eine breite Palette von Baumarten mit einem weiten Altersrahmen in Baden-Württemberg untersuchten. Eine Differenzierung zwischen Sturmwurf und Sturmbruch ist in der Regel bei statistischen Modellen mangels Daten nicht möglich. Hierfür wäre eine Information über den Bodenzustand wie zum Beispiel gefroren/nass (Usbeck et al 2010) essenziell. In mechanistischen Modellen kann dagegen die Auswirkung des Schlankheitsgrads auf die Wahrscheinlichkeit von Sturmwurf und -bruch getrennt ermittelt werden (Peltola et al 1999, Gardiner et al 1997, Peltola & Kellomäki 1993, Galinski 1989), da sich die zugrunde liegenden physikalischen Gesetzmässigkeiten detailliert beschreiben lassen.

Albrecht et al (2012) beurteilten den Schlankheitsgrad als Modellvariable kritisch, da dieser Wert von der Durchforstung beeinflusst und häufig als Indikator für Stabilität verwendet wird (Schmid-Haas & Bachofen 1991, Nykänen et al 1997, Päätaalo 2000, Slodicak & Novak 2006). Tatsächlich ändert sich der Schlankheitsgrad behandlungsbedingt über die Zeit. Er kann sich auch natürlicherweise verändern durch das charakteristische Wachstumsverhalten der Bäume mit schnellem Höhenwachstum in frühen Entwicklungsstadien und verlangsamtem in der Reifephase. Deshalb haben alte Bäume auch tie-

feren Schlankheitsgrade als jüngere. Es empfiehlt sich daher, zunächst die Baum- oder Bestandesoberhöhe als Schadensindikator zu berücksichtigen und dann, in einem zweiten Schritt, den Einfluss des Schlankheitsgrads auf die Stabilität zu analysieren.

Niedrigere Schlankheitsgrade, die als Indikatoren für ein niedrigeres Schneebruchrisiko und damit für eine höhere individuelle Baumstabilität ermittelt wurden (z.B. Petty & Worrel 1981, Peltola et al 1997), sind nicht unbedingt ein Zeichen für eine generell höhere Stabilität gegenüber Sturmschäden. Zunächst zeigen sie lediglich eine höhere Schaftstabilität an und können als Weiser für die Schaftbruchgefährdung gelten. Geringere Schlankheitsgrade sind aber gleichzeitig auch mit breiteren Kronen korreliert (Hasenauer & Monserud 1996, Weiskittel et al 2009) und erhöhen damit die Windlast auf dem Einzelbaum. Breitere Kronen zeigen wiederum grössere Wurzeldimensionen an (z.B. Wurzelvolumen oder Durchmesser des Wurzeltellers) und erhöhen damit das Verankerungsmoment des Einzelbaumes (Bolkenius 2001). Daher kann der Schlankheitsgrad das Sturmschadensrisiko in zwei verschiedene Richtungen beeinflussen. Entsprechend dokumentieren viele Studien geringere Sturmschäden bei tieferen Schlankheitsgraden (Cremer et al 1982, Saidani 2004, Scott & Mitchell 2005), andere aber bei höheren (Valinger & Fridman 1997, Müller 2002).

### Waldbauliche Eingriffe

Waldbauliche Eingriffe können das Sturmrisiko in verschiedener Art und Weise beeinflussen. Langfristig bestimmen sowohl die Baumartenwahl (siehe oben) als auch die damit verbundene Umtriebszeit beziehungsweise der Zieldurchmesser die generelle Schadensprädisposition von Waldbeständen. Der Effekt eines mit verlängerter Umtriebszeit beziehungsweise höherem Zieldurchmesser erhöhten Schadensrisikos ist das Ergebnis der damit verbundenen ansteigenden Baum- oder Bestandeshöhe (Lohmander & Helles 1987, Peterson 2000), die beide auch mit dem Alter korreliert sind. Darüber hinaus beeinflussen auch Durchforstungen das Sturmschadensrisiko.

### Durchforstungen und ihr Zeitpunkt

Werden Durchforstungen in einem frühen Altersstadium des Bestandes durchgeführt, haben sie einen positiven Effekt auf die Einzelbaumstabilität. Dies wird dem durch die Freistellung vergrösserten Wuchsraum des Einzelbaumes zugeschrieben, der die Entwicklung eines gut strukturierten Wurzelsystems begünstigt und zu einer besseren Verankerung des Einzelbaumes im Boden führt (Nielsen 1990, Nielsen 1995). In Waldbeständen, die eine be-



**Abb 3** Durchforstungen beeinflussen das Sturmschadensrisiko in verschiedener Hinsicht. Auf jeden Fall setzen sie die kollektive Stabilität von Beständen vorübergehend herab.

Foto: Ulrich Wasem/WSL

stimmte Oberhöhe überschritten haben, tendieren Durchforstungen jedoch dazu, die Bestände zumindest temporär zu destabilisieren, im Wesentlichen dadurch, dass das Kronendach durchbrochen und dessen Rauigkeit damit erhöht wird. Da sich das Kronendach in der Regel innerhalb von zwei bis acht Jahren nach der Durchforstung wieder schliesst, erhöht sich das Sturmschadensrisiko eines Bestandes nach einer Durchforstung im Wesentlichen nur vorübergehend (Cremer et al 1982, König 1995, Schmid-Haas & Bachofen 1991). Eine Ausnahme sind verspätete, starke Durchforstungen, die dem spezifischen Alterstrend des Zuwachsverhaltens beziehungsweise des Reaktionsvermögens der jeweiligen Baumart zuwiderlaufen. Während Durchforstungen generell als ein möglicher Risikofaktor erkannt worden sind, ist derzeit noch unklar, wie bedeutend ihr Effekt ist verglichen mit demjenigen anderer Faktoren wie Baumart, Baumhöhe oder Schlankheitsgrad.

In der Studie von Albrecht et al (2012) erwiesen sich die waldbaulichen Eingriffe (Abbildung 3) als der dritt wichtigste Faktor nach der Baumart und der Baum-/Bestandesdimension, um beobachtete Sturmschäden zu erklären. Diese Erkenntnisse sind insofern bemerkenswert, als im empirischen Modell neben Bestandescharakteristika auch meteorologische und geografische Informationen (z.B. ein Index der Exponiertheit, der sog. TOPEX-Index, sowie modellierte Windgeschwindigkeiten) und Standorteigenschaften (Wasserhaushalt, Versauerung) einfließen. Auch in einer Arbeit zu kanadischen Wäldern lieferten topografische Variablen weniger Erklärungskraft als erwartet (Mitchell et al 2001), während sich die Dauer seit dem letzten Eingriff als ein signifikanter Prädiktor erwies. Dagegen dürfte die Exponiertheit beim Sturm Lothar für viele Waldschäden in der Schweiz ausschlaggebend gewesen sein. Dies wird durch eine neue Studie für das Em-

mental (Kanton Bern; 180 km<sup>2</sup>) bestätigt (Stadelmann et al 2014), indem das verwendete empirische Modell das räumliche Auftreten von Schäden allein mit topografischen Variablen, d.h. ohne Einbezug von Bewirtschaftungsfaktoren, zu erklären vermag.

### Durchforstungsstärke

In den Modellen von Albrecht et al (2012) erhielt der Durchforstungsquotient, ein Mass für die Entnahme herrschender Bäume, ein hohes Gewicht. Damit lässt sich ein klarer Effekt der Intensität von Holzertemassnahmen auf die Schadensanfälligkeit von Beständen belegen, insbesondere je mehr herrschende Bäume entnommen wurden. Dies erscheint plausibel, da dominante Bäume in der Regel ein besser entwickeltes Grobwurzelsystem haben (Kühr 1999) als kodominante, intermediäre oder gar unterdrückte und damit ein stabiles Bestandesgerüst bilden. Werden diese gut verankerten Bäume entfernt, verbleiben die weniger stabilen Individuen im Bestand. Erschwerend kommt hinzu, dass diese weniger stabilen Bäume zusätzlich höheren, nun eben ungebremsten Windbelastungen ausgesetzt sind. Vergleichbare Ergebnisse in Bezug auf den Durchforstungsquotienten gibt es derzeit in der Literatur nicht.

Mehrere Publikationen weisen auf ein mit zunehmendem Holzentnahmevermögen steigendes Sturmschadensrisiko hin (Cremer et al 1982, Lohmänder & Helles 1987, Müller 2002, Schmid-Haas & Bachofen 1991). Vermutlich verursacht die temporäre Unterbrechung des Kronendachs stärkere Turbulenzen und stärkere Schwingungen der Bäume. Andere Studien finden zwar einen positiven Zusammenhang zwischen dem Sturmschadensrisiko und der Durchforstungstätigkeit, können aber nicht erklären, ob es sich um einen parallel zur Entnahmemenge ansteigenden Effekt handelt (Jalkanen & Mattila 2000, Dobbertin 2002, Mason 2002, Achim et al 2005). Auf jeden Fall weisen alle diese Studien darauf hin, dass Durchforstungen die kollektive Stabilität von Beständen vorübergehend herabsetzen. Lediglich in wenigen Studien fallen Bestandesvariablen, die in Verbindung mit Durchforstungsmassnahmen stehen, als nicht signifikante Prädiktoren weg (Schütz et al 2006, Roessler 2007). Die Ernte von Samenbäumen sowie bestandesöffnende Fällmassnahmen (z.B. für Gräben, Wege, Strassen, Stromleitungen oder Sanitärhiebe nach Schadereignissen) erhöhten die Wahrscheinlichkeit eines Sturmschadens im empirischen Modell von Jalkanen & Mattila (2000).

### Kahlschläge

In von Kahlschlagwirtschaft dominierten Waldbausystemen, zum Beispiel in Skandinavien, sind Sturmschäden an den Rändern von verbleibenden Beständen in den ersten Jahren nach der

Ernte Gegenstand vieler Untersuchungen. Die neu windexponierten Bestandesränder sind besonders anfällig für Sturmschäden, da die Bäume nicht an die Windexposition am Rand angepasst und damit weniger stabil als Randbäume sind. Waldbauliche Methoden, die darauf abzielen, diese Schäden im Zuge der flächigen Ernte zu reduzieren, umfassen das Vermeiden der Anlage von Kahlschlagsflächen senkrecht zur vorherrschenden Windrichtung (Blennow & Olofsson 2008) sowie die Erhaltung einer gewissen Anzahl von Einzelbäumen oder Baumgruppen auf den Kahlschlagflächen (Moore et al 2003, Scott & Mitchell 2005, di Lucca et al 2006, Hautala & Vanha-Majamaa 2006). Mit diesen Massnahmen lassen sich Windlast und Turbulenzen an den Steilrändern verringern, was zu weniger Sturmschäden nach Erntemassnahmen führt.

### **Bodeneigenschaften und Bodenzustand**

In mehreren Untersuchungen wurde nachgewiesen, dass Bodeneigenschaften einen Einfluss auf die Sturmschadensanfälligkeit haben: Dies gilt insbesondere für die Fichte auf Standorten, auf denen die Sauerstoffverfügbarkeit durch temporäre Vernässung stark eingeschränkt ist. Schelhaas et al (2003) führen die starke Ausdehnung des Fichtenanbaus auch auf vernässende Standorte als einen möglichen Grund für den Anstieg des Sturmholzes in den letzten Jahrzehnten in Europa an. Der Wasserhaushalt erwies sich als ein signifikanter Prädiktor in den empirischen Sturmschadensmodellen in Baden-Württemberg (Hanewinkel et al 2008, Schmidt et al 2010). Die Studie von Hanewinkel et al (2008), die sich im Wesentlichen mit stark von der Fichte dominierten Beständen im Schwarzwald befasste, konnte zeigen, dass Standorte mit sehr nassen (anmoorigen) Humusformen ähnliche Effekte auf die Sturmschadensanfälligkeit von Beständen haben wie vernässende Standorte. In der Modellstudie von Schmidt et al (2010) erhöhte sich die erklärte Varianz durch die Berücksichtigung von Vernässung in einem bodensensitiven Teilmodell für die Fichte. Dadurch ergab sich eine steigende Sturmschadenswahrscheinlichkeit für Fichtenbestände von «nicht vernässend» über «grundwasserbeeinflusst» und «leicht vernässend» bis zu «vernässend». Schadenerhöhenden Einfluss von Staunässe bestätigen auch Albrecht et al (2012) und eine Vielzahl der in dieser Studie genannten Arbeiten.

In der Schwarzwaldstudie (Hanewinkel et al 2008) wurden mit zunehmender Verschlechterung des Humuszustandes, der in der Regel zu stärkerer Versauerung führt, grössere Sturmschäden festgestellt. Die Studie bestätigt damit auch die Untersuchung von Mayer et al (2005), die einen signifikan-

ten Effekt der Bodenversauerung auf Lothar-Schäden in Frankreich, Deutschland und der Schweiz feststellte. Dagegen liess sich ein solcher Zusammenhang in Wäldern von Britisch-Kolumbien (Kanada) nicht nachweisen (Scott & Mitchell 2005).

Die Wichtigkeit des Bodenzustandes für das Risiko von Sturmschäden konnten Usbeck et al (2010) anhand von Wetterdaten vor Sturmereignissen für den Grossraum Zürich zeigen. Sie konnten nachweisen, dass schwere Sturmschäden fast immer dann entstanden, wenn die Böden nicht gefroren und zudem nass waren. Diese Ergebnisse werden indirekt auch für Schweden durch die Modellstudie von Blennow & Olofsson (2008) gestützt, die unter einem sich ändernden Windklima höhere Sturmschäden in Südschweden erwarten. Auch dort spielt fehlender Bodenfrost aufgrund höherer Temperaturen im Winter eine wichtige Rolle als schadensbestimmender Faktor.

### **Geländeeigenschaften und Windgeschwindigkeit**

In Zentraleuropa bieten sich vorwiegend die Schäden nach Lothar für die Untersuchung des Zusammenhangs mit dem Gelände und der herrschenden Windstärke an. So analysierten Schmoedel & Kottmeier (2008) die im Nordschwarzwald verursachten Schäden hinsichtlich orografischer und edaphischer Parameter anhand von Fernerkundungsdaten. Die grössten Schäden des von Westen her kommenden Orkans wurden auf Passhöhen, in Tälern mit west-östlicher Ausrichtung sowie an den Westflanken des ersten Höhenzuges von West nach Ost gefunden. Ein ähnliches Schadensmuster zeigten die Modellvorhersagen von Schmidt et al (2010). Auch das empirische Regressionsmodell von Mayer et al (2005) für Südwestdeutschland auf der Basis von Monitoringdaten kam zu höheren Schäden nach Lothar auf westexponierten Standorten. Die Analyse von Stadelmann et al (2014) im Emmental führte als wichtigsten Faktor die Geländeexponiertheit (topografischer Positionsindex, im 25-m-Höhenmodell mit Radius  $r = 200$  m gerechnet) auf, gefolgt von Hangexposition (mehr Schäden in Süd- und Westlagen), Meereshöhe, Neigung und Fichtenanteil.

In der Studie von Albrecht et al (2012) für die langfristige Sturmanfälligkeit von Wäldern in Baden-Württemberg zeigten die modellierten Windgeschwindigkeiten und Expositionsindizes einen relativ geringen Einfluss (siehe auch Mitchell et al 2001), was im Gegensatz zu den Erkenntnissen anderer Autoren steht, die davon ausgehen, dass katastrophale Sturmschäden im Wesentlichen durch das zugrunde liegende Windfeld bestimmt werden (MacCurrach 1991, Quine 1995, Wilson 2004). Fehlen detaillierte Informationen zum Wald, können vorhandene geo-



**Abb 4** Strukturierte Bestände wie dieser Plenterwald sind winddurchlässiger, weshalb sie oft als weniger sturmanfällig betrachtet werden. Foto: Ulrich Wasem/WSL

grafische, topografische und orografische Parameter hilfreich sein, um die Risikodisposition von Waldbeständen zu erklären (Saidani 2004, Schmoeckel 2005, Schindler et al 2009, Schindler et al 2012).

Geländeeigenschaften und die damit verbundenen Windparameter können auch unerwartete Resultate erzeugen: In einem der Submodelle von Albrecht et al (2012) zeigten die Expositionsindizes und die Böendaten für Lothar Ergebnisse, die dem allgemeinen Empfinden widersprechen: Niedrigere Böengeschwindigkeiten führten zu höheren Schäden und eine stärkere topografische Exponiertheit zu geringeren. Die Böendaten deuten darauf hin, dass Bäume auf eine stärker windgeprägte Umgebung mit einer Anpassung ihres Wachstumsverhaltens reagieren. Ein schwächeres Höhenwachstum in Kombination mit verstärktem Stamm- und Wurzeldurchmesserwachstum könnte eine Reaktion der Bäume sein, die durch die stärker vom Wind beeinflussten und exponierteren Standortbedingungen hervorgerufen wird. Dieses Phänomen, das auch als «adaptives Wachstum» bezeichnet wird, könnte eine physikalische Stabilisierung bei den Einzelbäumen bewirken und wurde bereits von mehreren Autoren beschrieben (Cremer et al 1982, Nicoll et al 1995, Stokes et al 1995, Telewski 1995, Meng et al 2008). Dem gegenüber steht wiederum die Analyse von 26 Winterstürmen der letzten 150 Jahre in der Region Zürich (Usbeck et al 2010), die einen deutlichen Zusammenhang zwischen Windgeschwindigkeit und Sturm Schäden nachweist. Spitzenböengeschwindigkeiten von mehr als 35 Metern pro Sekunde (126 km/h) wa-

ren hier jeweils mit erheblichen Sturmschäden verbunden.

### Bestandesstruktur

Die Bestandesstruktur (Abbildung 4) ist wohl einer der am schwierigsten zu erfassenden und in Sturmschadensrisikomodelle zu integrierenden Parameter. Empirische Modelle oder Entscheidungsbäume können nur recht unspezifische und kumulative Parameter wie stehenden Vorrat, Vorratsindex oder Bestandesdichte (Fridman & Valinger 1998, Hanewinkel et al 2008, Kamimura et al 2008) oder ziemlich einfache Strukturindizes berücksichtigen. Windtunnel- und Luftströmungsmodellstudien haben jedoch gezeigt, dass die Bestandesstruktur die Form des Windprofils beeinflusst, was Folgen für die Windlast auf Einzelbäumen in unterschiedlichen Bestandeskonfigurationen hat (Agster & Ruck 2003, Lohou et al 2003, Morse et al 2003, Gardiner et al 2005, Dupont & Brunet 2008). Die meisten dieser Studien folgern, dass stärker strukturierte Bestände für Windböen durchlässiger sind und die Energie in kleinere Wirbel ableiten. Damit werde die ursprüngliche Böe weniger heftig und damit auch weniger zerstörerisch gemacht. Die als Konsequenz erhöhte Windlast auf dem einzelnen Baumindividuum wurde jedoch nicht im Detail untersucht.

Basierend auf einer Literaturstudie kommt Mason (2002) zu der Erkenntnis, dass ein strukturreicher Sitkafichtenbestand auf Standorten mit mo-

derater Windexposition gegen Sturmschäden stabiler sein könnte als ein konventionell gleichmässig durchforsteter Bestand. Allerdings verschwindet dieser Vorteil mit zunehmender Windexposition.

### Sturmanfälligkeit von Plenterwäldern

Bei klassischen ungleichaltrigen Wäldern (Plenterwälder; Abbildung 4) wird aufgrund der hohen Einzelbaumstabilität generell eine niedrige Anfälligkeit gegen Sturmschäden unterstellt. Allerdings wurde dies mangels empirischer Sturmschadendaten in solchen Wäldern (Dobbertin 2002) nur selten untersucht. Zwei Arbeiten über Lotharsturmschäden in der Schweiz kommen zum Schluss, dass Plenterwälder eine hohe Sturmfestigkeit aufweisen. Die erste Studie untersuchte Plenterwälder im Emmental auf einer Fläche von 520 ha mittels grober Stichprobeninventur (Dvorak et al 2001), und die zweite, neue Studie griff auf ein mehrmals wiederholtes Vollinventar des Staatswaldes des Neuenburger Juras zu (Hanewinkel et al 2014). Hier war das allgemeine Schadensniveau in den Plenterwäldern trotz teilweise extremen Windgeschwindigkeiten während des Sturms Lothar relativ niedrig. Als erklärende Variablen für die Sturmanfälligkeit der Plenterwälder resultierten die Bestandesstruktur, der Zeitpunkt des letzten Ernteeingriffs sowie topografische Variablen (Exposition und Geländeform). Diese Variablen unterscheiden sich auffällig von denjenigen, die typischerweise zur Erklärung von Sturm-

schäden in gleichaltrigen Wäldern gefunden werden, also zum Beispiel Bestandesdichte, Durchforstungsintensität oder Baumartenzusammensetzung.

Die Effekte von Bestandesstruktur und struktureller Diversität auf das Sturmschadensrisiko sind kaum zu trennen und werden oft mit denen der Baumartenmischung oder der Bestandes- oder Baumhöhe verwechselt. Stufige Bestände sind oft auch gemischte Bestände, und da besonders Laubbaumarten ein generell niedrigeres Wintersturmrisko aufweisen, lässt sich die allgemeine Schlussfolgerung, dass stufige Bestände generell windresistenter sind, oft einfach auf einen Baumarten- oder einen Baumhöheneffekt (mehr Bäume mit geringerer Höhe in ungleichaltrigen Wäldern) reduzieren.

Die Frage, ob stufige, ungleichaltrige Bestände tatsächlich weniger sturmschadensanfällig sind als einschichtige, gleichaltrige ist derzeit nicht abschliessend geklärt. Dagegen kann davon ausgegangen werden, dass ungleichaltrige Wälder ein höheres Potenzial für eine rasche natürliche Verjüngung nach einem Sturmereignis haben, was einen bedeutenden waldbaulichen Vorteil darstellen kann. Folglich könnten ungleichaltrige Wälder zwar nicht unbedingt generell stabiler, im Falle eines Sturmschadens aber jedenfalls resilienter sein.

### Umliegende Waldbestände

Verschiedene Studien weisen auf einen bedeutenden Effekt von in Windrichtung vorgelagerten

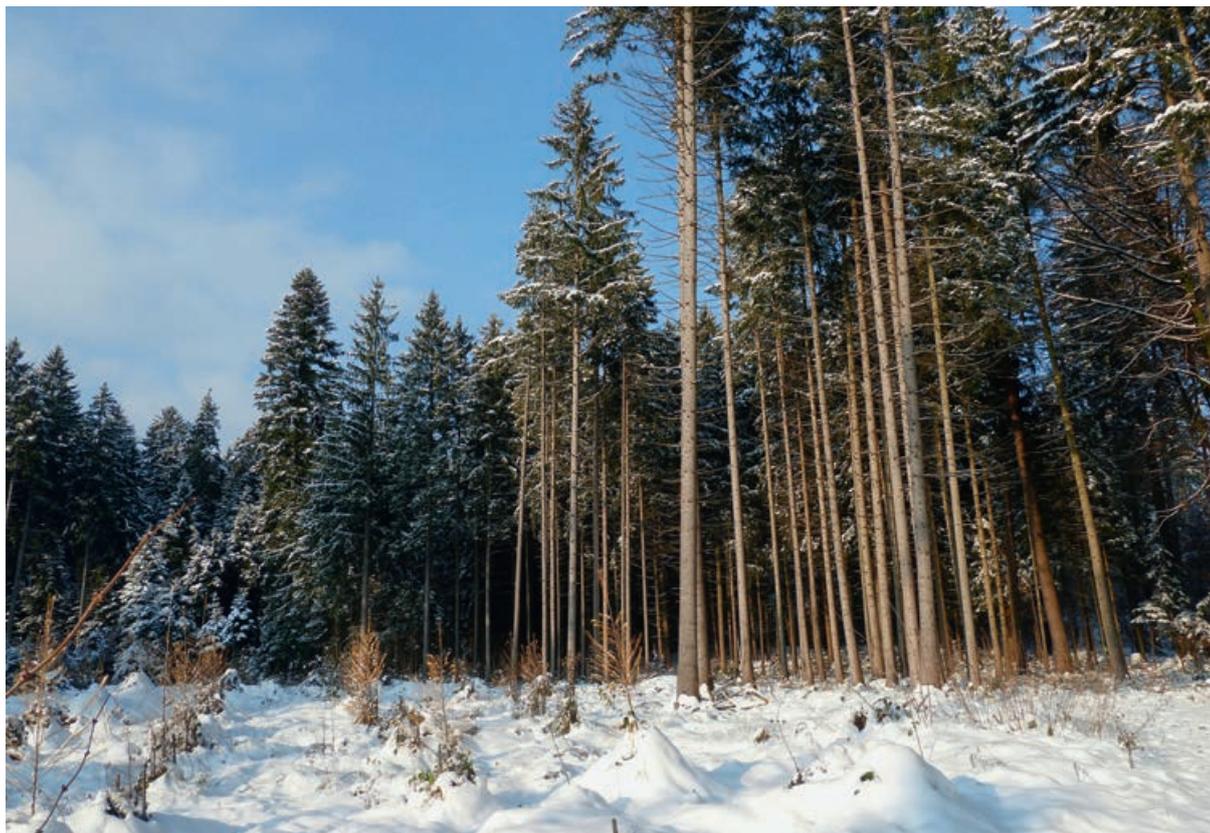


Abb 5 Steilränder erhöhen das Sturmschadensrisiko.

Foto: Barbara Allgaier Leuch

Bestandeslücken (Abbildung 5) auf die Schadenswahrscheinlichkeit hin. Dieser Effekt ist besonders in Waldbausystemen von Bedeutung, die regelmässig Kahlschläge in grösserem Umfang vorsehen wie in Skandinavien oder Nordamerika. Die Grösse solcher Kahlfächen und die Distanz zum vorgelagerten Bestandesrand sind daher wichtige Parameter in einem mechanistischen Modell von Peltola et al (1999) für Sturmschäden in Finnland. Ebenso haben Mitchell et al (2001) in ihrem empirischen Modell für Wälder in Britisch-Kolumbien die Ausrichtung der Bestandesränder integriert.

Die Distanz zum nächstgelegenen westlich (d.h. in Windrichtung) vorgelagerten Bestandesrand fand bei Schmidt et al (2010) keinen Eingang in das endgültige Modell. Aufschlussreicher wäre wohl eine Kombination dieser Variable mit der Struktur des Bestandesrands gewesen, doch ist diese Information nur selten verfügbar, insbesondere bei empirischen Modellen, die Grossrauminventurdaten verwenden (Fridman & Valinger 1998, Jalkanen & Mattila 2000, Schmidt et al 2010). In der Schweiz, wo Kahlschläge schon seit Langem keine Rolle mehr spielen, können als Folge von Störungen oder Nutzungen dennoch auch Situationen entstehen, wo die räumliche Position der Bestände zueinander für die Höhe des Sturmschadensrisikos eine Rolle spielt. Allerdings sind die Möglichkeiten, das Risiko durch waldbauliche Massnahmen aktiv zu verringern, ausserordentlich begrenzt. Wie in einem neueren Review ausgeführt wird (Hanewinkel et al 2011), stellte die Minimierung von Sturmschäden für mehr als ein Jahrhundert ein zentrales Ziel der Forsteinrichtungsplanung in Teilen Zentraleuropas dar. Angestrebt wurde die Minimierung durch die Optimierung der sogenannten «räumlichen Ordnung», d.h. der alters- beziehungsweise höhenrelevanten Position der verschiedenen Waldbestände zueinander (Wagner 1923). Betrachtet man die Sturmschäden nicht nur der jüngeren Vergangenheit, muss der Erfolg der Massnahmen, die das Ziel hatten, durch langfristige, «intelligente» Nutzungssysteme immer den ältesten Bestand an der windabgewandten Seite einer Schlagreihe zu positionieren, jedoch als ausserordentlich bescheiden eingestuft werden.

### **Bedeutung der verschiedenen Variablen**

Die Ergebnisse von Albrecht et al (2012) deuten darauf hin, dass sich mithilfe von Bestandeseigenschaften umschreibenden Variablen langfristige Sturmschadendaten, die mehrere Sturmereignisse umfassen, am besten analysieren lassen. So waren Prädiktoren, die den Waldbestand selbst charakterisieren, in ihrer Untersuchung wichtiger als solche zum Boden, zur Topografie oder zum Wind. Baum-

art und durchschnittliche Baum- oder Bestandesdimensionen erklärten mehr als die Hälfte des beobachteten Sturmschadens. Andere Autoren klassifizieren ebenfalls Baumart (König 1995, Peterson 2000, Dobbertin 2002, Müller 2002, Mayer et al 2005) und Informationen über die Baumhöhe (Cremer et al 1982, Lohmander & Helles 1987, Schmid-Haas & Bachofen 1991, Schmidt et al 2010) als die wichtigsten Prädiktoren für Sturmschäden, insbesondere auf der Basis von einzelnen Sturmereignissen. Boden- und Geländeeigenschaften erscheinen hingegen als weniger wichtig. Aber auch hier besteht das Problem der unterschiedlichen Datenverfügbarkeit und -qualität. So weisen Bestockungsinformationen in der Regel eine höhere Genauigkeit auf als Witterungsparameter oder bodenkundliche Informationen. Insbesondere wenn Stichprobeninventuren verwendet werden, liegen lokale Messungen aller Einzelbäume oder zumindest repräsentative Messungen vor. Die Eigenschaften von Winterstürmen und Bodenparameter müssen dagegen unter Verwendung von Hilfsvariablen mehr oder weniger aufwendig regionalisiert werden. Für Bodenparameter ist dies in vielen Regionen dadurch erschwert, dass eine einheitliche hochaufgelöste Kartierungsgrundlage fehlt. Windfelder in hoher räumlicher Auflösung zu regionalisieren, ist noch schwieriger, da die Anzahl der Messstationen bisher nicht ausreicht, auch nur das überregionale räumliche Muster hinreichend genau zu beschreiben.

Die Tatsache, dass in manchen Untersuchungen (Gardiner et al 1997, Peltola et al 1999) der Schlankheitsgrad als wichtiger erscheint als die Baumhöhe (Schmidt et al 2010), muss nicht unbedingt ein Widerspruch sein. Die ersteren umfassen in der Regel Wälder, die mit kurzen Umtriebszeiten bewirtschaftet werden, was zu einem eingeschränkten Höhenrahmen, den diese Untersuchungen umfassen, führt und damit die Bedeutung des Schlankheitsgrads erhöht. Letztere beschäftigen sich häufig mit Wäldern mit langen Umtriebszeiten, bei denen bedeutende Höhen erreicht werden. Eine übergreifende Reihung der Wichtigkeit verschiedener Einflussfaktoren sollte daher immer eine möglichst grosse Anzahl von Untersuchungen berücksichtigen.

### **Schlussfolgerungen – Massnahmen zur Schadensreduktion**

Aufgrund der derzeitigen klimatischen Entwicklung muss damit gerechnet werden, dass die Intensität und Häufigkeit der Stürme, denen die Wälder in Mitteleuropa ausgesetzt sein werden, zumindest nicht signifikant abnimmt. Sturmschäden könnten europaweit im Vergleich zu früher eher zunehmen (Seidl et al 2014). Stocker et al (2013) erwarteten, dass sich die Winterstürme in Europa nordwärts



**Abb 6** Die Möglichkeiten, Wintersturmschäden durch waldbauliche Massnahmen zu begrenzen, sind eher limitiert. Von zentraler Bedeutung ist dabei die Baumartenwahl, weil die winterkahlen Laubbäume weniger stark gefährdet sind als die wintergrünen Nadelbäume. Foto: Barbara Allgaier Leuch

verschieben, womit das Sturmschadensrisiko in der Schweiz leicht abnehmen würde. Die Möglichkeiten, Sturmschäden durch waldbauliche Massnahmen zu begrenzen, sind eher limitiert. Eine zentrale Rolle spielt dabei die Baumartenwahl (Abbildung 6). Nadelbaumarten, insbesondere die Fichte, sind klar stärker gefährdet als Laubbäume, während die Gefährdung der Douglasie hier kontrovers diskutiert wird (Albrecht et al 2013). In den in Mitteleuropa vorherrschenden Waldbausystemen, die lange Umtriebszeiten oder ungleichaltrige Waldstrukturen vorsehen, kommt der Baumhöhe als schadensbestimmender Variablen eine zentrale Bedeutung zu. Hier sollte zur Minimierung des Schadens das Ziel sein, entweder die angestrebten Zieldurchmesser bei niedrigeren Höhen zu erreichen, was in gleichaltrigen Wäldern durch frühe und starke Durchforstungen erreicht werden kann, oder die Zieldurchmesser in Abhängigkeit vom Risikopotenzial des Standortes zu variieren. In gleichaltrigen Wäldern bedeutet dies, dass die Stabilität über den Schlankheitsgrad gesteuert werden kann, da bei gleicher Höhe Bäume mit einem niedrigeren Schlankheitsgrad grössere Durchmesser und damit eine höhere Schaftstabilität aufweisen. Ungleichaltrige Wälder, die in der Untersuchung des Kantons Neuenburg (Hanewinkel et al 2014) trotz einem extremen Sturmereignis ein eher tiefes Schadensniveau zeigten, weisen gegenüber gleichaltrigen zumindest den Vorteil einer höheren Resilienz nach Windwurf auf. Inwieweit ungleichaltrige Wälder auch weniger sturmschadenanfällig sind als gleichaltrige und ob durch ein Absenken des Zieldurchmessers und damit des an-

gestrebten Gleichgewichtsvorrats hier auch eine Reduktion des Sturmschadensrisikos erreicht werden kann, sollte Gegenstand zukünftiger Untersuchungen sein. ■

Eingereicht: 25. September 2014, akzeptiert (mit Review): 11. März 2015

## Literatur

- ACHIM A, RUEL JC, GARDINER BA, LAFLAMME G, MEUNIER S (2005) Modelling the vulnerability of balsam fir forests to wind damage. *For Ecol Manage* 204: 35–50.
- AGSTER W, RUCK B (2003) The influence of aerodynamic properties of forest edges and stands on the pressure pattern within a forest. In: Ruck B, Kottmeier C, Mattheck C, Quine C, Wilhelm G, editors. *Wind effects on trees*. Karlsruhe: University Karlsruhe. pp. 25–32.
- ALBRECHT A, HANEWINKEL M, BAUHUS J, KOHNLE U (2012) How does silviculture affect storm damage in forests of south-western Germany? Results from empirical modeling based on long-term observations. *Eur J Forest Res* 131: 229–247.
- ALBRECHT A, KOHNLE U, HANEWINKEL M, BAUHUS J (2013) Storm damage of Douglas fir unexpectedly high compared to Norway spruce. *Ann For Sci* 70: 195–207.
- BLENNOW K, OLOFSSON E (2008) The probability of wind damage in forestry under a changed wind climate. *Clim Chang* 87: 347–360.
- BOLKENIUS D (2001) Zur Wurzel Ausbildung von Fichte (*Picea abies* L. Karst) und Weisstanne (*Abies alba* Mill.) in gleichaltrigen und ungleichaltrigen Beständen. *Freiburg i.Br.: Univ Freiburg, Freiburger Forstl Forsch* 35. 155 p.
- BOUCHON J (1987) Etat de la recherche relative aux dégâts forestiers dus aux tempêtes. *Rev For Fr* 39: 301–312.
- CREMER KW, BOROUGH CJ, MCKINNEL FH, CARTER PR (1982) Effects of stocking and thinning on wind damage in plantations. *N Z J For Sci* 12: 244–268.
- CUCCHI V, MEREDIEU C, STOKES A, COLIGNY FD, SUAREZ J ET AL (2005) Modelling the windthrow risk for simulated forest stands of maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.). *For Ecol Manage* 2005: 184–196.
- DHÔTE JF (2005) Implication of forest diversity in resistance to strong winds. In: Scherer-Lorenzen M, Körner C, Schulze ED, editors. *Forest diversity and function*. Heidelberg: Springer. pp. 291–307.
- DI LUCCA CM, MITCHELL SJ, BYRNE KE (2006) Using TIPSYPY to evaluate windthrow effects on regeneration in variable retention harvests. Victoria: B.C. Ministry Forest Range, Extension Note 77. 6 p.
- DOBBERTIN M (2002) Influence of stand structure and site factors on wind damage comparing the storms Vivian and Lothar. *For Snow Landsc Res* 1/2: 187–205.
- DOBBERTIN M, SEIFERT H, SCHWYZER A (2002) Ausmass der Sturmschäden. *Wald Holz* 83 (1): 39–42.
- DUPONT S, BRUNET Y (2008) Impact of forest edge shape on tree stability: a large-eddy simulation study. *Forestry* 81: 299–315.
- DVORAK L, BACHMANN P, MANDALLAZ D (2001) Sturmschäden in ungleichförmigen Beständen. *Schweiz Z Forstwes* 152: 445–452. doi: 10.3188/szf.2001.0445
- FRIDMAN J, VALINGER E (1998) Modelling probability of snow and wind damage using tree, stand, and site characteristics from *Pinus sylvestris* sample plots. *Scand J For Res* 13: 348–356.
- GALINSKI W (1989) A windthrow-risk estimation for coniferous forests. *Forestry* 62: 139–146.
- GARDINER B, MARSHALL B, ACHIM A, BELCHER R, WOOD CJ (2005) The stability of different silvicultural systems: a wind-tunnel investigation. *Forestry* 78: 471–484.

- GARDINER BA, STACEY GR, BELCHER RE, WOOD CJ (1997) Field and wind tunnel assessments of the implications of respacing and thinning for tree stability. *Forestry* 70: 233–252.
- HANEWINKEL M, ZHOU W, SCHILL C (2004) A neural network approach to identify forest stands susceptible to wind damage. *For Ecol Manage* 196: 227–243.
- HANEWINKEL M, BREIDENBACH J, NEEFF T, KUBLIN E (2008) 77 years of natural disturbances in a mountain forest area – the influence of storm, snow and insect damage analysed with a long-term time-series. *Rev Can Rech For* 38: 2249–2261.
- HANEWINKEL M, HUMMEL S, ALBRECHT A (2011) Assessing natural hazards in forestry for risk management: a review. *Eur J Forest Res* 130: 329–351.
- HANEWINKEL M, KUHN T, BUGMANN H, LANZA, BRANG P (2014) Vulnerability of uneven-aged forests to storm damage. *Forestry* 87: 525–534.
- HASENAUER H, MONSERUD RA (1996) A crown ratio model for Austrian forests. *For Ecol Manage* 188: 49–60.
- HAUTALA H, VANHA-MAJAMAA I (2006) Immediate tree uprooting after retention-felling in a coniferous boreal forest in Fennoscandia. *Rev can rech for* 36: 3167–3172.
- JALKANEN A, MATTILA U (2000) Logistic regression models for wind and snow damage in northern Finland based on the National Forest Inventory data. *For Ecol Manage* 135: 315–330.
- KAMIMURA K, GARDINER B, KATO A, HIROSHIMA T, SHIRAIISHI 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: 429–445.
- KELLOMÄKI S, PELTOLA H (1998) Silvicultural strategies for predicting damage to forests from wind, fire and snow. Joensuu: Univ Joensuu, Research Notes 73. 151 p.
- KÖNIG A (1995) Sturmgefährdung von Beständen im Altersklassenwald: ein Erklärungs- und Prognosemodell. Frankfurt a.M.: Sauerländer. 194 p.
- KUHR M (1999) Grobwurzelarchitektur in Abhängigkeit von Baumart, Alter, Standort und sozialer Stellung. Göttingen: Georg-August-Univ Göttingen, Dissertation. 178 p.
- LOHMANDER P, HELLES F (1987) Windthrow probability as a function of stand characteristics and shelter. *Scand J For Res* 2: 227–238.
- LOHOU F, LOPEZ A, DRUELHET A, BRUNET Y, IRVINE MR ET AL (2003) The Venfor Project: Response of a homogeneous forest canopy to wind stress through the analysis of accelerometer measurements. In: Ruck B, Kottmeier C, Mattheck C, Quine C, Wilhelm G, editors. Wind effect on trees. Karlsruhe: Univ Karlsruhe. pp. 109–116.
- MACCURREN R (1991) Spacing an option for reducing storm damage. *Scott Forestry* 45: 285–297.
- MASON WL (2002) Are irregular stands more windfirm? *Forestry* 75: 347–355.
- MAYER P, BRANG P, DOBBERTIN M, HALLENBARTER D, RENAUD JP ET AL (2005) Forest storm damage is more frequent on acidic soils. *Ann For Sci* 62: 303–311.
- MENG SX, HUANG S, LIEFFERS VJ, NUNIFU T, YANG Y (2008) Wind speed and crown class influence the height-diameter relationship of lodgepole pine: Nonlinear mixed effects modeling. *For Ecol Manage*: 570–577.
- MITCHELL S, HAILEMARIAM T, KULIS Y (2001) Empirical modeling of cutblock edge windthrow risk on Vancouver Island, Canada, using stand level information. *For Ecol Manage* 154: 117–130.
- MOORE JR, MITCHELL SJ, MAGUIRE DA, QUINE C (2003) Wind damage in alternative silvicultural systems. In: Ruck B, Kottmeier C, Mattheck C, Quine C, Wilhelm G, editors. Wind effects on trees. Karlsruhe: Univ Karlsruhe, Laboratory for Building and Environmental Aerodynamics. pp. 191–198.
- MORSE AP, BRUNET Y, DEVALANCE M, GAMBOA-MARRUFO M, IRVINE MR ET AL (2003) The Venfor Project: The role of forest edges in the patterns of turbulence development – findings from a field experiment, wind tunnel experiment and a large eddy simulation model experiment. In: Ruck B, Kottmeier C, Mattheck C, Quine C, Wilhelm G, editors. Wind effects on trees. Karlsruhe: Univ Karlsruhe, Laboratory for Building and Environmental Aerodynamics. pp. 33–38.
- MÜLLER F (2002) Modellierung von Sturm-, Schnee- und Rotfäulerisiko in Fichtenbeständen auf Einzelbauebene. In: Freising: Techn Univ München, Lehrstuhl Waldwachstumskunde, Dissertation. 175 p.
- NICOLL B, EASTON E, MILNER A, WALKER C, COUTTS MP (1995) Wind stability factors in tree selection: distribution of biomass within root systems of Sitka spruce clones. In: Coutts MP, Grace J, editors. Wind and trees. Cambridge: Cambridge Univ Press. pp. 276–292.
- NIELSEN CCN (1990) Einflüsse von Pflanzabstand und Stammzahlhaltung auf Wurzelform, Wurzelbiomasse, Verankerung sowie auf Biomassenverteilung im Hinblick auf die Sturmfestigkeit der Fichte. Frankfurt a. M.: Sauerländer. 279 p.
- NIELSEN CCN (1995) Recommendations for stabilisation of Norway spruce stands based on ecological surveys. In: Coutts MP, Grace J, editors. Wind and trees. Cambridge: Cambridge Univ Press. pp. 424–435.
- NYKÄNEN ML, PELTOLA H, QUINE C, KELLOMÄKI S, BROADGATE M (1997) Factors affecting snow damage of trees with particular reference to European conditions. *Silva Fenn* 31: 193–213.
- PÄÄTALO ML (2000) Risk of snow damage in unmanaged and managed stands of Scots pine, Norway spruce and birch. *Scand J For Res*: 530–541.
- PELTOLA H, KELLOMÄKI S (1993) A mechanistic model for calculating windthrow and stem breakage of Scots pine at stand edge. *Silva Fenn* 27: 99–111.
- PELTOLA H, NYKÄNEN ML, KELLOMÄKI S (1997) Model computations on the critical combination of snow loading and wind speed for snow damage of Scots pine, Norway spruce and birch sp. at stand edge. *For Ecol Manage* 95: 229–241.
- PELTOLA H, KELLOMÄKI S, VÄISÄNEN H, IKONEN VP (1999) A mechanistic model for assessing the risk of wind and snow damage to single trees and stands of Scots pine, Norway spruce, and birch. *Rev Can Rech For* 29: 647–661.
- PETERSON CJ (2000) Catastrophic wind damage to North American forests and the potential impact of climate change. *Sci Total Environ* 262: 287–311.
- PETTY JA, WORREL R (1981) Stability of coniferous tree stems in relation to damage by snow. *Forestry* 54: 115–128.
- QUINE C (1995) Assessing the risk of wind damage to forests: practice and pitfalls. In: Coutts MP, Grace J, editors. Wind and trees. Cambridge: Cambridge Univ Press. pp. 379–403.
- ROESSLER G (2007) Nahm Kyrill Rücksicht auf die Durchforstungsstärke? *Forstzeitung* 118 (11): 24–25.
- SAIDANI N (2004) Erkennung von Sturmschäden im Wald auf der Basis kleinmasstäbiger Luftbilder und Entwicklung eines Modells zur Abschätzung der Sturmgefährdung der Wälder auf der Basis von räumlichen Daten. Freiburg i.Br.: Univ Freiburg, Dissertation. 187 p.
- SCHELHAAS MJ, NABUURS GJ, SCHUCK A (2003) Natural disturbances in the European forests in the 19<sup>th</sup> and 20<sup>th</sup> centuries. *Glob Chang Biol* 9: 1620–1633.
- SCHINDLER D, GREBHAN K, ALBRECHT A, SCHÖNBORN J (2009) Modelling the wind damage probability in forests in Southwestern Germany for the 1999 winter storm “Lothar”. *Int J Biometeorol* 53: 543–554.
- SCHINDLER D, GREBHAN K, ALBRECHT A, KOHNLE U, MAYER H (2012) GIS-based estimation of the winter storm damage probability in forests: A case study from Baden-Württemberg (Southwest Germany). *Int J Biometeorol* 56: 57–69.

- SCHMID-HAAS P, BACHOFEN H (1991) Die Sturmgefährdung von Einzelbäumen und Beständen. *Schweiz Z Forstwes* 142: 477–504.
- SCHMIDT M, HANEWINKEL M, KÄNDLER G, KUBLIN E, KOHNLE U (2010) An inventory-based approach for modeling single tree storm damage – experiences with the winter storm 1999 in southwestern Germany. *Rev Can Rech For* 40: 1636–1652.
- SCHMOECKEL J (2005) Orographischer Einfluss auf die Strömung abgeleitet aus Sturmschäden im Schwarzwald während des Orkans «Lothar». Karlsruhe: Univ Karlsruhe, Fakultät Physik, Dissertation 134 p.
- SCHMOECKEL 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* 2: 1–9.
- SCHÜTZ JP, GÖTZ M, SCHMID W, MANDALLAZ D (2006) Vulnerability of spruce (*Picea abies*) and beech (*Fagus sylvatica*) forest stands to storms and consequences for silviculture. *Eur J Forest Res* 125: 291–302.
- SCOTT RE, MITCHELL SJ (2005) Empirical modelling of windthrow risk in partially harvested stands using tree, neighbourhood, and stand attributes. *For Ecol Manage* 218: 193–209.
- SEIDL R, SCHELHAAS MJ, RAMMER W, VERKERK PJ (2014) Increasing forest disturbances in Europe and their impact on carbon storage. *Nature Clim Change* 4: 930–930.
- SLODICAK M, NOVAK J (2006) Silvicultural measures to increase the mechanical stability of pure secondary Norway spruce stands before conversion. *For Ecol Manage* 224: 252–257.
- STADELMANN G, BUGMANN H, WERMELINGER B, BIGLER C (2014) Spatial interactions between storm damage and subsequent infestations by the European spruce bark beetle. *For Ecol Manage* 318: 167–174.
- STOCKER T, QIN D, PLATTNER GK, TIGNOR M, ALLEN SK, EDITORS (2013) *Climate Change 2013: The physical science basis. Summary for policy makers. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge: Cambridge Univ Press. 37 p.
- STOKES A, FITTER A, COUTTS MP (1995) Responses of young trees to wind: effects on root growth. In: Coutts MP, Grace J, editors. *Wind and trees.* Cambridge: Cambridge Univ Press. pp. 264–275.
- TELEWSKI F (1995) Wind-induced physiological and developmental responses in trees. In: Coutts MP, Grace J, editors. *Wind and trees.* Cambridge: Cambridge Univ Press. pp. 237–263.
- USBECK T, WOHLGEMUTH T, DOBBERTIN M, PFISTER C, BÜRGI A ET AL (2010) Increasing storm damage to forests in Switzerland from 1858 to 2007. *Agric For Meteorol* 150: 47–55.
- VALINGER E, FRIDMAN J (1997) Modeling probability of snow and wind damage in Scots pine stands using tree characteristics. *For Ecol Manage* 97: 215–222.
- WAGNER C (1923) *Die Grundlagen der räumlichen Ordnung im Walde.* Tübingen: H. Lauppische Buchhandlung, 4 ed. 387 p.
- WEISKITTEL A, KENEFIC L, SEYMOUR RS, PHILLIPS L (2009) Long term effects of precommercial thinning on the stem dimension, form and branch characteristics of red spruce and balsam fir crop trees in Maine, USA. *Scand J For Res* 43: 397–409.
- WILSON JS (2004) Vulnerability to wind damage in managed landscapes of the coastal Pacific Northwest. *For Ecol Manage* 191: 341–351.

## Est-il possible de réduire les dommages provoqués par les tempêtes sur les forêts? Une analyse des facteurs aggravants

Cet article se penche sur les facteurs les plus importants pouvant influencer les dommages provoqués par les tempêtes sur les forêts, et sur les moyens de minimiser ces chablis. Parmi ces facteurs, on distingue ceux qui se rapportent aux arbres (essence, taille, élancement ...), ceux qui sont liés au terrain (vitesse du vent, état du sol ...) ainsi que le type d'exploitation forestière et la structure des peuplements. On découvre après analyse d'un grand nombre d'études se basant aussi bien sur des modèles empiriques que mécanistiques, que les conifères, et surtout les épicéas, sont plus vulnérables que les feuillus. De nombreuses études soulignent l'impact significatif de la taille des arbres sur leur sensibilité aux dommages, tandis qu'elles sont partagées sur l'influence de leur élancement. L'exploitation forestière, notamment la période et l'intensité des interventions, joue également un rôle sur l'ampleur des dommages attendus, de même que l'humidité des sols et l'exposition par rapport à la direction principale du vent. Les forêts jardinées semblent, selon les études existantes effectuées en Suisse, moins sensibles aux tempêtes, mais il n'est pas possible de démontrer définitivement l'avantage d'une diversité d'âge des arbres par rapport aux peuplements d'âge identique, en raison de l'absence de données suffisantes à l'heure actuelle. Après discussion de l'importance des différentes variables, l'article aborde les mesures envisageables pour réduire les dommages, surtout en ce qui concerne le choix des essences, la limitation de la taille maximale des peuplements ainsi que l'éclaircissage intensif.

## Can windthrow damage be minimized? An analysis of predictors

The paper deals with different influencing factors that determine storm damage to forests and the question how this damage can be minimized. The influence factors include tree-related parameters like species, tree height and h/d-relation, terrain-related parameters (encompassing wind speed and soil condition), and type of forest management as well as stand structure. The analysis of a multitude of studies including empirical as well as mechanistic models reveals that coniferous species, especially Norway spruce, show a higher vulnerability towards storm damage than broadleaves. Many investigations point at a significant influence of tree height on storm damage probability, while the h/d-value does not have the same importance. Besides that, the influence of management operations, stand structure and surrounding forest stands as well as the vulnerability of selection forests (“plenter forest”) are analysed. Silvicultural treatment, mostly timing and intensity of the interventions, plays a role for determining damage severity, as well as soil water content (waterlogged soils) and exposure towards the main wind direction. Plenter forests appeared not to be very vulnerable to storm damage in the existing investigations in Switzerland, however, due to the lack of sufficient data, a general superiority of these uneven-aged forests compared to even-aged ones cannot be proved at the moment. Based on a discussion on the importance of the different parameters, measures to reduce storm damage to forests are discussed. Hereby mainly the choice of tree species, the limitation of the dominant height of forest stands as well as early and intensive thinning are investigated.