

SCHRIFTENREIHE  
FREIBURGER FORSTLICHE FORSCHUNG

BAND 42

Axel Albrecht

**STURMSCHADENSANALYSEN  
LANGFRISTIGER  
WALDWACHSTUMSKUNDLICHER  
VERSUCHSFLÄCHENDATEN IN BADEN-  
WÜRTTEMBERG**

FORSTLICHE VERSUCHS- UND FORSCHUNGSANSTALT  
BADEN-WÜRTTEMBERG

**Bibliographische Information Der Deutschen Bibliothek**

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.dbb.de> abrufbar.

**Zitiervorschlag:**

**Albrecht, Axel (2009):** Sturmschadensanalysen langfristiger waldwachstumskundlicher Versuchsflächendaten in Baden-Württemberg  
Freiburg (Breisgau): Albert-Ludwigs-Universität und Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg, 2009  
(Schriftenreihe Freiburger Forstliche Forschung; Bd. 42)  
Zugl.: Freiburg (Breisgau), Univ., Diss., 2009

ISSN 1436-0586

ISBN 978-3-933548-43-6

**Die Herausgeber:**

Forstwissenschaftliche Fakultät der Universität Freiburg und  
Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg

**Redaktionskomitee**

Prof. Dr. J. Huss  
PD K. v. Wilpert

Prof. Dr. W. Konold

**Umschlaggestaltung:**

Bernhard Kunkler Design, Freiburg

**Druck:**

Eigenverlag der FVA, Freiburg

**Bestellung an:**

Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg  
Wonnhaldestraße 4  
79100 Freiburg  
Telefon: 0761/4018-0, Fax: 0761/4018-333  
e-Mail: [fva-bw@forst.bwl.de](mailto:fva-bw@forst.bwl.de)

Alle Rechte, insbesondere das Recht zur Vervielfältigung und Verbreitung sowie der Übersetzung vorbehalten.

Gedruckt auf 100% chlorfrei gebleichtem Papier.

# INHALTSVERZEICHNIS

<b>1</b>	<b>EINLEITUNG .....</b>	<b>1</b>
1.1	<b>BEDEUTUNG VON STURMSCHÄDEN .....</b>	<b>2</b>
1.2	<b>STAND DER STURMSCHADENSFORSCHUNG .....</b>	<b>7</b>
1.2.1	<i>Meteorologische Grundlagen (Mitteleuropa) .....</i>	<i>8</i>
1.2.2	<i>Risikofaktoren .....</i>	<i>9</i>
1.2.2.1	<i>Dendrometrische Größen .....</i>	<i>10</i>
1.2.2.2	<i>Waldränder .....</i>	<i>18</i>
1.2.2.3	<i>Geographische Verhältnisse .....</i>	<i>19</i>
1.2.2.4	<i>Boden und forstliche Standorte .....</i>	<i>20</i>
1.2.3	<i>Betriebswirtschaftliche Aspekte .....</i>	<i>21</i>
1.2.4	<i>Häufig angewendete Untersuchungsmethoden .....</i>	<i>22</i>
1.2.4.1	<i>Experimentelle Verfahren .....</i>	<i>23</i>
1.2.4.2	<i>Empirische Verfahren .....</i>	<i>25</i>
1.3	<b>ZIELSETZUNG UND FORSCHUNGSFRAGEN .....</b>	<b>28</b>
<b>2</b>	<b>MATERIAL UND METHODEN .....</b>	<b>31</b>
2.1	<b>DATENGRUNDLAGE VERSUCHSFLÄCHEN .....</b>	<b>31</b>
2.1.1	<i>Baumartenzusammensetzung .....</i>	<i>32</i>
2.1.2	<i>Lage .....</i>	<i>33</i>
2.1.3	<i>Aufbereitung .....</i>	<i>34</i>
2.1.4	<i>Erklärende Variablen .....</i>	<i>37</i>
2.2	<b>METHODEN .....</b>	<b>40</b>
2.2.1	<i>Deskriptive Statistik .....</i>	<i>40</i>
2.2.2	<i>Vorselektion der Prädiktoren (CART) .....</i>	<i>41</i>
2.2.3	<i>Statistische Modellierung .....</i>	<i>43</i>
2.2.3.1	<i>Test auf Multikollinearität .....</i>	<i>43</i>
2.2.3.2	<i>Verallgemeinerte lineare Regressionsmodelle .....</i>	<i>44</i>
2.2.3.3	<i>Regressionsmodelle mit zufälligen Effekten .....</i>	<i>45</i>
2.2.3.4	<i>Modellanpassung und -güte .....</i>	<i>46</i>
2.2.4	<i>Modellierungskonzept .....</i>	<i>47</i>
2.2.5	<i>Baumartenspezifität der Prädiktoren und Nullenreduktion .....</i>	<i>51</i>
2.2.6	<i>Evaluierung und Erweiterung des BWI-Modells für Schäden durch Sturm Lothar .....</i>	<i>52</i>
<b>3</b>	<b>ERGEBNISSE .....</b>	<b>56</b>

<b>3.1</b>	<b>DESKRIPTIVE STATISTIK.....</b>	<b>56</b>
3.1.1	<i>Antwortvariable und Zustand der Versuchsfächen .....</i>	<i>56</i>
3.1.2	<i>Univariate Auswertung.....</i>	<i>64</i>
<b>3.2</b>	<b>CART .....</b>	<b>69</b>
3.2.1	<i>Bestandesweise Regressionsbäume .....</i>	<i>70</i>
3.2.2	<i>Einzelbaumweise Klassifikationsbäume .....</i>	<i>72</i>
<b>3.3</b>	<b>EVALUIERUNG UND ERWEITERUNG DES BWI-MODELLS FÜR STURM LOTHAR... .....</b>	<b>77</b>
3.3.1	<i>Plausibilisierung .....</i>	<i>77</i>
3.3.2	<i>Modell-Erweiterung .....</i>	<i>80</i>
<b>3.4</b>	<b>STATISTISCHE MODELLIERUNG.....</b>	<b>84</b>
3.4.1	<i>Test auf Multikollinearität.....</i>	<i>84</i>
3.4.1.1	<i>Baumebene .....</i>	<i>84</i>
3.4.1.2	<i>Bestandesebene .....</i>	<i>87</i>
3.4.2	<i>Bestandesmodelle .....</i>	<i>88</i>
3.4.2.1	<i>Modelle zur Prognose des Auftretens von Schäden .....</i>	<i>88</i>
3.4.2.2	<i>Modelle zur Prognose des Auftretens von Total-Schäden.....</i>	<i>93</i>
3.4.2.3	<i>Modelle zur Prognose der Schadmenge von Schäden .....</i>	<i>96</i>
3.4.3	<i>Einzelbaummodell .....</i>	<i>101</i>
3.4.4	<i>Übersicht über die vier Modellierungsschritte.....</i>	<i>104</i>
<b>3.5</b>	<b>SONDERAUSWERTUNG DOUGLASIE .....</b>	<b>107</b>
<b>4</b>	<b>DISKUSSION.....</b>	<b>111</b>
<b>4.1</b>	<b>DISKUSSION VON MATERIAL UND METHODEN.....</b>	<b>111</b>
4.1.1	<i>Datengrundlage Versuchsfächen .....</i>	<i>111</i>
4.1.2	<i>CART.....</i>	<i>112</i>
4.1.3	<i>Evaluierung und Erweiterung des BWI-Modells.....</i>	<i>114</i>
4.1.4	<i>Statistische Modellierung .....</i>	<i>115</i>
<b>4.2</b>	<b>DISKUSSION DER ERGEBNISSE - BEANTWORTUNG DER FORSCHUNGSFRAGEN..... .....</b>	<b>118</b>
4.2.1	<i>Z1.1: Wie realistisch spiegelt das BWI-Modell (Schmidt et al. 2009) Schäden durch Sturm Lothar in den Versuchsfächen wider? Wie verlässlich sind die Versuchsfächendaten?.....</i>	<i>119</i>
4.2.2	<i>Z1.2: Lassen sich die Vorhersagen des BWI-Modells durch Modell- Erweiterungen verbessern?.....</i>	<i>120</i>
4.2.3	<i>Z1.3: Hat die waldbauliche Behandlung auf den Versuchsfächen großen Einfluss auf die Schäden durch Sturm Lothar?.....</i>	<i>121</i>

---

4.2.4	Z2.1: Wie verteilt sich die Vorhersagbarkeit von Sturmschäden der gesamten Versuchsfächendaten auf die Informationsebenen Einzelbaum und Bestand? .....	122
4.2.5	Z2.2: Liefern die Modelle der Versuchsfächendaten plausible allgemeine erklärende Faktoren? .....	123
4.2.6	Z2.3: Wie wirken Durchforstungen kurzfristig auf die Sturmstabilität? .....	129
4.2.7	Z2.4: Wie wirken sich Bestandespflege und Durchforstung langfristig auf Sturmstabilität aus? .....	133
4.2.8	Z2.5: Welche Aussagekraft hat der h/d-Wert als Indikator für Sturmschäden? ... ..	134
4.2.9	Z2.6: Wie stark ist das Sturmschadensrisiko durch forstliche Maßnahmen beeinflussbar? .....	136
<b>5</b>	<b>SCHLUSSFOLGERUNGEN .....</b>	<b>138</b>
5.1	SCHLUSSFOLGERUNGEN FÜR DIE STURMSCHADENSFORSCHUNG .....	138
5.2	SCHLUSSFOLGERUNGEN FÜR DIE WALDBAULICHE BEHANDLUNG .....	139
<b>6</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG .....</b>	<b>141</b>
<b>7</b>	<b>ENGLISH SUMMARY .....</b>	<b>145</b>
<b>8</b>	<b>DANKSAGUNG .....</b>	<b>149</b>
<b>9</b>	<b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>150</b>
<b>10</b>	<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS .....</b>	<b>165</b>
<b>11</b>	<b>ANHANG .....</b>	<b>169</b>

## 6 ZUSAMMENFASSUNG

Aufgrund der großen Bedeutung von Sturmschäden für die Waldbewirtschaftung wurde eine bislang noch nicht zur Analyse von Sturmschäden ausgewertete Datengrundlage, die langfristigen waldwachstumskundlichen Versuchsflächen in Baden-Württemberg, analysiert. Die zwei **Hauptziele** der vorliegenden Dissertation lauteten:

Evaluierung und Erweiterung des bestehenden BWI-Modells für Sturmschäden durch Sturm Lothar in Baden-Württemberg (Schmidt 2006, Schmidt et al. 2009) anhand waldwachstumskundlicher Versuchsflächendaten

Erstellen eines Erklärungs- und Prognosemodells für Sturmschäden anhand langfristiger Sturmschadensdaten waldwachstumskundlicher Versuchsflächen in Baden-Württemberg mit besonderer Berücksichtigung der Schadabhängigkeit von der waldbaulichen Behandlung.

Der **Datensatz** der langfristigen waldwachstumskundlichen Versuchsflächen beinhaltet ca. 900.000 Baumebeobachtungen zwischen ca. 1890 und 2007 mit Schwerpunkt auf der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts. In diesem Datensatz sind ca. 20.000 sturmgeschädigte Bäume enthalten, die vorwiegend auf die Stürme Wiebke (1990) und Lothar (1999) entfallen. Geringe Anteile traten jedoch auch bei den Stürmen 1967 und 1984 auf bzw. wurden zwischen diesen Großereignissen verzeichnet. Eine Differenzierung von Windwurf und Bruch ist nicht dokumentiert. Fichte (47%) und Douglasie (21%) stellen zusammen mit ca. zwei Dritteln den größten Baumartenanteil im gesamten Datensatz dar. Kiefer und Lärche sind zusammen mit ca. 12 %, Buche und Tanne mit je ca. 8 % vertreten. Geringe Anteile entfallen auf die Eiche (ca. 2%). Bis 40-jährige Douglasienbestände sind in den Versuchsflächendaten überrepräsentiert, und bis 60-jährige Buchenbestände sind deutlich unterrepräsentiert. Als Vergleichsgrundlage wurde die heutige Baumarten- und Altersklassenverteilung im gesamten baden-württembergischen Wald verwendet. Das standortkundliche Spektrum der Versuchsflächendaten ist durch einen niedrigeren Anteil labiler Standorte gekennzeichnet, was auf die avisierte lange Laufzeit der Versuche zurückzuführen ist. Insbesondere ist der Anteil wechselfeuchter Standorte mit ca. fünf Prozent nur halb so hoch wie im gesamten standortskartierten Wald in Baden-Württemberg. Die verfügbaren erklärenden Variablen beinhalten dendrometrische Kenngrößen von Einzelbäumen und Beständen, Informationen über die waldbaulichen Eingriffe, Daten zur Bestandesgeschichte, standortkundliche Parameter, geschätzte Böengeschwindigkeiten und Geländeparameter. Die Besonderheit des Datensatzes liegt in der gleichzeitigen Verfügbarkeit einzelbaumweiser und bestandesweiser dendrometrischer Größen sowie Informationen über die waldbaulichen Eingriffe.

Die **Auswertungsmethoden** gliedern sich in CART-Methoden (classification and regression trees, Entscheidungsbäume) und statistische Modellierung. Die CART-Methoden wurden aufgrund ihrer Robustheit gegenüber unerwünschten Korrelationen und fehlenden Werten für die Sichtung der umfangreichen Daten und für die Vorselektion der Prädiktoren verwendet. Sie wurden angewendet zur Analyse sowohl der bestandesweisen Sturmschadens-Anteile als auch der einzelbaumweisen Information Schaden ja/nein. Die statistische Modellierung stützt sich auf Verfahren der multiplen Regression in Verbindung mit einer Analyse der Restfehler („gemischte Modellierung“). Die gemischten Modelle

wurden eingesetzt, um der räumlichen Klumpung der Versuchsflächendaten Rechnung zu tragen.

Das **Vorgehen bei der statistischen Modellierung** kann folgendermaßen charakterisiert werden: Im Rahmen der Erweiterung des vorhandenen BWI-Modells für Schäden durch Sturm Lothar (Ziel 1) wurde getestet, ob Prädiktoren der Versuchsflächendaten, die bei der Entwicklung des BWI-Modells nicht zur Verfügung standen, weitere Beiträge zur Erklärung von Sturmschäden liefern. Im Rahmen der Erstellung des Erklärungs- und Prognosemodells anhand langfristiger Versuchsflächendaten (Ziel 2) wurde ein vierstufiges Modellierungskonzept eingesetzt. Im ersten Schritt wurde die allgemeine bestandesweise Auftretenswahrscheinlichkeit von Sturmschäden modelliert. Hierfür wurde Flächen, auf denen es zu Schäden kam, der Wert 1 (Schaden) zugewiesen, ungeschädigte Flächen erhielten den Wert 0 (kein Schaden). Im zweiten Schritt wurde dann für Bestände mit Schäden modelliert, ob es auf einer Fläche zu Totalausfall durch Sturmschäden kam. Totalausfall wurde hierbei definiert als Sturmschaden bedingt ausfallender Grundflächenanteile größer als 75 %. Diese beiden Modellierungsschritte wurden getrennt für sechs Baumartengruppen durchgeführt. In Modellierungsschritt 3 wurde schließlich auf den verbleibenden teilgeschädigten Flächen (Flächen mit Schäden aber ohne Totalausfall), die Schadmenge modelliert. Im vierten und letzten Schritt wurde die bestandesweise Schadmengenschätzung aus Schritt 3 verwendet und unter Zuhilfenahme von Einzelbauminformationen feiner auf die Einzelbäume aufgeteilt.

Die wesentlichen **Ergebnisse** bezüglich der Evaluierung des BWI-Modells anhand von Versuchsflächendaten für Sturm Lothar (*Ziel 1*) lieferten die Erkenntnis, dass die im Modell enthaltenen Effekte auch die Trends in den Versuchsflächendaten korrekt wiedergeben. Hierzu gehören insbesondere die Baumarten-, Baumhöhen-, h/d-Wert-bezogenen und Topographieeffekte (TOPEX-Index). Insgesamt überschätzte das BWI-Modell das Sturmrisiko auf den Versuchsflächen jedoch mäßig. Im Zuge der Modellerweiterung wurde festgestellt, dass insbesondere die eingriffsbasierten Variablen deutliche Modellverbesserungen erlauben. So sinken die Sturmschäden mit zunehmenden kumulierten Vornutzungen und abnehmender relativer Entnahmestärke des Voreingriffs. Während der erste Effekt auf eine langfristig stabilisierende Wirkung von Standraumerweiterungen durch Durchforstungen hinweist, bildet der zweite Effekt die vorübergehend labilisierende Wirkung der Durchforstungseingriffe selbst ab, durch die kurzfristig das stabilisierende Bestandesgefüge beeinträchtigt wird. Variablen mit standörtlicher Information oder Information auf Bestandesebene (z. B. Dichteparameter) trugen nicht zur Modellverbesserung bei.

Im Zuge der Erstellung des Erklärungs- und Prognosemodells für Sturmschäden anhand langfristiger Versuchsflächendaten (*Ziel 2*) zeigten sich folgende Ergebnisse:

- Die Baumarten- und Baumhöheneffekte haben auch für die Erklärung von Sturmschäden mehrerer Sturmereignisse den größten Einfluss.
- Der erhebliche Einfluss (ca. 20%) der waldbaulichen Eingriffe ließ sich vorwiegend durch die relative Entnahmestärke während der fünf bzw. zehn Jahre vor dem Sturmereignis quantifizieren.

- Die Wirkung des Durchforstungsquotienten im Modell weist insbesondere bei größeren Bestandeshöhen (Vorratspflege) auf labilisierende Einflüsse von Eingriffen ins Herrschende hin.
- Die einzelbaum- und bestandesweisen h/d-Werte lieferten widersprüchliche Ergebnisse. H/d-Werte werden generell als ungeeignet für die Beschreibung von Sturmschäden bzw. Windwurfschäden eingestuft. Eine Trennung von Bruch- und Wurfschäden war im Datenmaterial nicht dokumentiert und daher in der Analyse nicht abbildbar.
- Auch topographische Kenngrößen und modellierte Böengeschwindigkeiten lieferten widersprüchliche Ergebnisse. Die mangelnde Erklärungskraft der topographischen Größen wird auf die mangelnde Repräsentativität der Versuchsflächendaten zurückgeführt, die der Böendaten auf kleinräumige Verwirbelungen und Turbulenzen. Für die Analyse der im Wald tatsächlich Schaden verursachenden lokalen Windgeschwindigkeiten war die räumliche Auflösung des Datensatzes der Böengeschwindigkeiten (1km\*1km) vermutlich nicht ausreichend.
- Der gesamte Einfluss standortkundlicher Parameter wird als gering eingestuft. Der bekannte labilisierende Einfluss von wechselfeuchten Standorten wurde für die Fichte als signifikant bestätigt, hatte jedoch insgesamt geringen Einfluss. Darüber hinaus ist zu vermuten, dass Tonanteile, Flachgründigkeit und ev. auch Kalkvorkommen insbesondere für Douglasienbestände zusätzliche Labilisierungsfaktoren darstellen.
- Das Auftreten von Totalschäden (Ausfall größer als 75% der Grundfläche) ließ sich am besten anhand der Spitzhöhe der Bestände abbilden. Bei Douglasie und Fichte wurde zusätzlich jedoch eine Abhängigkeit von der waldbaulichen Behandlung beobachtet. Das Auftreten flächiger Schäden ist damit nicht ausschließlich durch hohe Böengeschwindigkeiten und Windexponiertheit verursacht.
- Die Sturmgefährdung der Douglasie erscheint auf der Grundlage der Versuchsflächendaten mindestens ebenso hoch wie die der Fichte. Die deutlich höheren Schadensanteile bei Douglasie im Vergleich mit denen der Fichte sind mutmaßlich auf standörtliche Verhältnisse zurückzuführen, so dass die Annahme generell höherer Sturmschadensdisposition für Douglasie verfrüht wäre.
- Einzelbaumdaten besitzen offensichtlich geringen Erklärungswert für das Sturmrisiko, sofern bestandesweise präzise Kenngrößen vorliegen.
- Die teilweise erheblichen Einflüsse der räumlichen Klumpung von Versuchsflächen (modelltechnisch abgebildet durch sog. zufällige Effekte) lassen vermuten, dass weitere Sturmschaden verursachende Effekte bislang nicht quantitativ-kausal erfasst werden konnten. Solche Effekte könnten beispielsweise aus den kleinräumigen Turbulenzen oder aus der Bodenwassersättigung resultieren.

Es ist denkbar, die Ergebnisse der Sturmschadensmodellierungen der langfristigen Versuchsflächendaten wahlweise auf der Bestandesebene oder der Einzelbaumebene weiter



zu verwenden. Einsatzbereiche könnten beispielsweise in betriebswirtschaftlichen Optimierungsberechnungen oder in der Integration in Waldwachstumssimulatoren liegen.

Als **Schlussfolgerungen** für die waldbauliche Behandlung sind aus Sicht der Sturmrisikominimierung gestaffelte Behandlungsprogramme sinnvoll. Geringe Bestandesdichten in der Jugend sollten die Ausprägung kräftiger Strukturwurzeln ermöglichen. In der zweiten Hälfte der Bestandesentwicklung sollte die Kollektivstabilität jedoch stärker berücksichtigt werden. Insbesondere Eingriffe ins Herrschende, wie z. B. im Zuge der baden-württembergischen Vorratspflege mit ‚Hieb auf den starken schlechten Stamm‘ sollten neu überdacht werden. Empfehlungen zur risikominimierenden Behandlung strukturreicher Wälder lassen sich auf der Grundlage der Versuchsflächendaten nicht ableiten, da nur wenige strukturreiche Flächen enthalten sind. Als zweite Schlussfolgerung erscheint für die Einschätzung der Sturmschadensrisiken allgemein eine Erweiterung der als labil eingestuften Standorte um das Spektrum sehr flachgründiger und schwer durchwurzelbarer Böden (z. B. tongeprägte Böden) nötig. Auf diesen labilen Standorten sollten die prinzipiell sehr sturmgefährdeten Baumarten Douglasie, Fichte und ggf. auch Tanne nicht als Hauptbaumarten ausgewählt werden. Produktionsziele, die mit reduzierten Bestandes- und Einzelbaumhöhen assoziiert sind, sollten hier Vorrang haben.

Aus der Anwendung der gemischten Modellierung und des Ansatzes der segmentierten Modellierung sind folgende Schlussfolgerungen für die Sturmschadensforschung abzuleiten: Die gemischte Modellierung diente vorwiegend der Berücksichtigung räumlicher Korrelationen in den Versuchsflächendaten. Der Verdacht auf solche Korrelationen bestätigte sich, und es ist davon auszugehen, dass bislang nicht verfügbare Prädiktoren auf der Ebene der Versuchsflächen weiteren Erklärungsbeitrag enthalten. Solche Prädiktoren könnten beispielsweise Böengeschwindigkeiten oder die Wassersättigung von Böden zum Zeitpunkt von Sturmereignissen beschreiben. Die segmentierte Modellierung erwies sich als wichtiger Ansatz für die korrekte Auswertung der Versuchsflächendaten. Insbesondere der hohe Anteil an Beobachtungen ohne Sturmschäden (Nullenüberschuss) zeigte sich als problematisch unter der Annahme einer Binomialverteilung. Die segmentierte Modellierung berücksichtigte diesen Nullenüberschuss durch modellertechnische Trennung der Beobachtungen ohne Schäden von denen mit Schäden.

Weitere Forschungsarbeiten werden als nötig beurteilt, die die standortsbezogene Labilität, die Windexponiertheit, die Windfelder und Böengeschwindigkeiten anhand von Sturmschadensdaten mehrerer Sturmereignisse mit größerer Flächenabdeckung als die Versuchsflächendaten untersuchen.

**Schlüsselwörter:** Sturmschaden, Winwurf, Baden-Württemberg, langfristige Daten, waldwachstumskundliche Versuchsflächen, gemischte Modelle, empirische Sturmschadensmodellierung, Entscheidungsbäume, Data Mining.

## 7 ENGLISH SUMMARY

Title: Forest storm damage analyses in Southwestern Germany using long-term experimental growth and yield plot data

Due to the severe impact of storm damage on forest management, this dissertation focuses on the analysis of storm damage based on data from long-term experimental growth and yield plots in Southwestern Germany. The two main **objectives** of this study are:

- Evaluation and extension of an existing storm damage model (Schmidt) using experimental plot data. The existing storm damage model had originally been developed based on systematic sample data of the National Forest Inventory (NFI) describing storm damage of the 1999 winter storm ‘Lothar’.
- Modeling storm damage based on the long-term experimental plot data containing several storm events, with special focus on the impact of silvicultural interventions on the severity of storm damage.

The **data** set of the long-term experimental growth and yield plots contain 900,000 observations between 1890 and 2007, primarily after 1950. It contains approximately 20,000 trees damaged predominantly by two storms in 1990 and 1999. Two additional storm events in 1967 and 1984 caused a small proportion of damage observations, and minor endemic damage was observed between these major storms. Windthrow and snap are not documented separately. Norway spruce (47%) and Douglas fir (21%) constitute two thirds of the data, Scots pine and larch species (European and Japanese larch) together amount to 12 %, and European beech and Silver fir each represent 8 %. Oak species (Sessile and Pedonculate oak) only represent a small proportion of the data (2 %). Special features of the data source are the availability of dendrometric single tree and stand data as well as precise documentation of the silvicultural interventions. Other available data describe the past dendrometric conditions of the stands, site characteristics, modeled wind gust speed and terrain parameters.

Data mining **methods** and statistical empirical modeling techniques were applied to the experimental plot data. The data mining techniques employed CART (classification and regression trees) algorithms and were especially chosen in order to pre-screen the vast data. Being able to accommodate correlated observations and missing values, these methods were used to pre-select potential predictor variables on the single-tree and the stand level independently. The applied statistical models were based on common generalized linear models, but were extended to take the spatial clustering of the experimental plots into account. Special variance components, the so-called random effects, were added to the conventional regression techniques, rendering them “mixed models”.

The modeling approaches of the two main objectives can be characterized as follows:

For the extension of the existing NFI-model for single storm damage data (1999 storm) additional potential predictor variables in the experimental plot data were tested, which had not been available with the original NFI data. Model improvement by those predictors was quantified.

A four-stage modeling concept was applied to model storm risk of the long-term experimental plot data. In the first stage, the stand-level general occurrence of storm damage was modeled (binary data). Therefore, stands that had experienced storm damage

were coded as damage events, and stands without damage were coded as non-events. In the second stage, total damage of stands was modeled, coding stands with storm-damaged basal area larger than 75% as events and stands with damage below 75% as non-events. These two modeling stages were performed for each of the six main tree species in the data set independently. The remaining plots with damage between 0.1 and 75% then proceeded to modeling stage 3. In this stage, the response variable was coded as the proportion of storm-damaged basal area. After these three stages of stand-level modeling, the fourth stage used the estimated stand-level storm damage of stage 3 as an offset, and distributed this estimate among the single trees in the stands, taking single tree information into consideration.

Comparing the experimental plot data with the conditions of all forests in Southwestern Germany it became apparent that young Douglas fir stands up to 40 years old are over-represented in the experimental plot data, whereas beech stands aged up to 60 years old are under-represented. A smaller proportion of the experimental plots is situated on waterlogged and shallow site conditions than when compared to the real total forest area. The rooting conditions of the experimental plots are thus proportionally less favorable to storm damage.

### **Results**

Evaluating the existing NFI-model for single storm event data showed good general correspondence between the modeled effects and the observed phenomena responsible for storm damage in the experimental plot data (only 1999 damage data). Especially the effects of tree species, tree height, height to diameter ratio (h/d ratio) and orography (TOPEX score) were well represented. In total, though, the NFI model overestimated storm risk for the experimental plots moderately.

Including two additional predictor variables that were only available in the experimental plot data improved model predictions to a medium extent. Cumulated harvesting volumes of selective thinnings, as the first variable, indicated that storm damage was lower when these volumes were higher. This effect can be interpreted as a long-term stabilization of thinnings. The second predictor describes the relative intensity of the last silvicultural intervention and showed positive impact on storm damage. Increasing intensity of that respective intervention thus also increased storm damage, which can be interpreted as an effect of temporary de-stabilization caused by thinning operations. Combined, the results of these two additional variables indicate a potential change in stand stability over time depending on the specific silvicultural regime applied.

Developing the modeling system for the long-term damage data yielded the following results:

- The effects of tree species and tree height have the largest impact on storm damage data, even if considering multiple damage events.
- The significant influence of silvicultural interventions (approximately 20%) can be quantified by the relative intensity of thinnings during the five, and sometimes up to ten years preceding the storm event.
- The effect of the thinning quotient (mean diameter of removed trees/mean diameter of all trees prior to thinning) suggests that interventions removing trees from the dominant classes significantly destabilize stands, especially during the

late stand developmental phases when the stands have reached considerable stand heights.

- The single tree and stand-specific h/d ratios had inconsistent effects. While the h/d ratio may be unsuitable for characterizing the dynamic phenomena involved in turnover, it is assumed that it indicates rather well the more static incident of stem snap. However, these two different forms of storm damage were not recorded separately in the data and could consequently not be differentiated.
- Orographic parameters and the modeled wind gust speed data also revealed contradictory results. Firstly, the lack of explanatory power of the orographic parameters can be explained by the clustered location of the experimental plots apparently showing too little variation in wind exposure and not enough systematic representation of terrain conditions. Secondly, small scale turbulences and velocities are not accounted for in the modeled wind gust speed data that were available at the resolution of 1000\*1000m. This resolution supposedly did not permit the consideration of local wind gust speed.
- The total impact of soil site conditions is moderate. On the one hand, the findings confirmed existing knowledge about waterlogged sites causing significantly more storm damage in Norway spruce stands. However, the overall effect was minor. On the other hand the findings indicate that soils rich in clay, sites with shallow rooting possibilities, and potentially also soils containing higher concentrations of calcium carbonate may be difficult growing conditions for Douglas fir with respect to storm stability.
- Storm damage classified as total damage of stands, as opposed to only partial damage, could be well explained by the stand dominant height. Additionally, silvicultural treatment had effect on the occurrence of total damage in Douglas fir and Norway spruce stands. The occurrence of catastrophic damage as total damage in the experimental plot data thus does not uniquely depend on characteristics of wind exposure or of the wind field of winter cyclones.
- The storm risk of Douglas fir appears to be at least as high as the risk of Norway spruce, based on experimental plot data. While the storm damage in Douglas fir stands even exceeded the damage encountered in Norway spruce stands, it should not be concluded that Douglas fir as a tree species is generally more prone to storm damage than Norway spruce. The reason is that the Douglas fir stands in the experimental plot data on average grow on sites that are in general considered more difficult for developing a deep root architecture and thus tend to develop less firm anchorage than on the Norway spruce sites.
- Single tree data apparently carry little information explaining storm risk, if precise stand level data are available.
- The considerable proportion of variance explained by the spatial clustering of the experimental plots (random effects) lead to the assumption that other effects causing storm damage have not yet been accounted for. Such effects may lay in local turbulences of storms or in the degree of water saturation of soils at the time of the storm event.

The modeling results based on the long-term damage data may optionally be applied on the stand or the single-tree levels enabling the consideration of storm risk as the most prominent natural risk in Central European forestry. Fields of application may be in forest growth simulation or economic optimization studies.

**Conclusions** firstly concern the silvicultural treatment. From the perspective of minimizing storm damage, two staged treatment regimes are desirable. Low stand density during the juvenile development should enable trees to develop deep structural roots at an early stage permitting firm anchorage. During the second developmental phase when stands reach higher stand heights, implying higher general risk of storm damage, successively increasing crown closure should be attained because the sustaining of neighboring trees is a key effect of collective stability. Interventions removing trees from the dominant class should be minimized during this phase. Additionally, the classification of forest sites bearing unstable growing conditions for trees should be reviewed. Especially including sites with shallow soils and difficult rooting possibilities (i. e. soils rich in clay) in the classification of sites susceptible to storm damage could provide more information for the long-term forest management decisions and thus increase the support of forest planning. Especially the coniferous tree species Norway spruce and Douglas fir, and possibly also Silver fir, which are known to be very vulnerable tree species, should be avoided as main tree species on these sites. Also on these more critical sites, silvicultural regimes associated with reduced tree and stand heights should be favored.

Secondly, the following conclusions can be drawn for storm damage research: the mixed modeling techniques were primarily chosen in order to analyze correlations due to the spatial clustering of the experimental plots. Such clustering effects were indeed found, and it can be argued that currently unavailable predictor variables contain additional explanatory power on the hierarchical level of the experimental plot clusters. Potential additional predictors might describe the local gust speeds or the water saturation of the soils at the time of the storm events. The segmented, four-stage modelling approach appeared advantageous for the storm damage data structure of the experimental plots. Especially accounting for the large proportion of observations without damage ('zero inflation') would not have been possible without this segmented approach.

Based on the experience in this study, a need for the following future studies in empirical storm damage research can be deduced: based on a more vast data source representing larger areas of the region's forests, the site factors and orographic parameters associated with storm damage should be more reliably quantified. New efforts also have to be made in order to integrate wind gust speed data into storm risk analyses.

**Keywords:** storm damage, windthrow, Germany, long-term data, mixed models, empirical modeling, decision trees, data mining