Winterstürme über Deutschlands Wäldern 1981–2018

Professur für Umweltmeteorologie, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg,
Werthmannstraße 10, D-79085 Freiburg

(Mit 6 Abbildungen)

Dirk Schindler*) und Christopher Jung

(Angenommen Januar 2020)
DOI-Nummer: 10.23765/afjz0002047

SCHLAGWÖRTER – KEY WORDS

Sturmgefährdung; Böengeschwindigkeit; Sturmfeldfaktor; Naturgefahr; Maschinelles Lernen.

Storm hazard; gust speed; storm field factor; natural hazard; machine learning.

1. EINLEITUNG

Stürme sind ein wichtiger Bestandteil der natürlichen Störungsdynamik von Waldökosystemen (Wohlgemuth et al., 2019). In den vergangenen Jahrzehnten haben sie etwa 53 % der gesamten Schadholzmenge verursacht, die in europäischen Wäldern angefallen ist (Schelhaas et al., 2003). Ihre raumzeitliche Dynamik und Ausdehnung variiert allerdings stark in Abhängigkeit von geographischer Lage und Jahreszeit (Quine und Gardiner, 2007; Jung et al., 2017). In Mitteleuropa wird das jahreszeitlich differenzierte Auftreten von Sturmereignissen meistens zwei Zeiträumen zugeordnet. Während in den Monaten Mai bis September ganz überwiegend lokale Stürme (Gewitterstürme, Tornados) mit einer typischen räumlichen Ausdehnung von 2 bis 50 km auftreten (Kunz, 2007; Kunz et al., 2009; Pilorz et al., 2016), ziehen im Zeitraum Oktober bis März großräumige Sturmsysteme mit einer räumlichen Ausdehnung von bis zu mehr als 1000 km über Europa (Donat et al., 2010; Gregow et al., 2017; Jung et al., 2017).

Gardiner et al. (2010) zufolge traten 90 % der Stürme, die im Zeitraum 1950–2010 die größten Schäden in Europas Wäldern verursacht haben, in den Monaten Oktober bis März auf. Aufgrund des Zeitpunktes ihres Auftretens werden diese Stürme als Winterstürme bezeichnet. Seit dem Jahr 1981 wurde Deutschland von über 140 schadenverursachenden Winterstürmen heimgesucht, die einen Gesamtschaden von rund 37.3 Mrd. US-Dollar verursachten und 300 Todesopfer forderten (Munich RE, 2019).

Eine der wichtigsten Kenngrößen für die retrospektive Analyse des durch Winterstürme entstandenen Schadens ist die raumzeitliche Variabilität der maximalen Geschwindigkeit von Böen. Treten während Wintersturmereignissen Sturm- und Orkanböen auf, ist mit Schäden in Waldökosystemen (Hanewinkel et al., 2010; Schmidt et al., 2010; Schindler et al., 2012; Albrecht et al., 2019), an Gebäuden (Heneka et al., 2006; Hang und Li, 2010), an Wasserstraßen (Liu et al., 2019), an Windenergieanlagen (Ciang et al., 2008; Jung et al., 2017) und mit deutlichen Einschränkungen des Luftverkehrs (Manasseh und Middleton, 1999; Knoop et al., 2019) zu rechnen.

Die Ansätze zur Modellierung der Böengeschwindigkeit können in physikalisch-mechanistische (Donat et al., 2010; Gregow et al., 2017) und statistisch-empirische (Etienne et al., 2010; Jung und Schindler, 2016; Jung et al., 2016; Schindler et al., 2016) Ansätze unterschieden werden. Mit mechanistischen Modellen wird versucht, die wichtigsten physikalischen Prozesse abzubilden, die die raumzeitliche Variabilität von Böenfeldern determinieren. Die größten Herausforderungen bei der Anwendung dieser Modellkategorie sind die möglichst umfassende Kenntnis der sehr großen Anzahl von Anfangs- und Randbedingungen sowie die Kontrolle der damit verbundenen umfangreichen Initialisierung und Parametrisierung für bestimmte Datensätze. Im Gegensatz dazu basiert die statistisch-empirische Modellierung auf Böengeschwindigkeitswerten, die nahe der Erdoberfläche, i. d. R. in der Standardhöhe von 10 m über Grund, in meteorologischen Messnetzen messtechnisch erhoben werden.

Obwohl statistische Ansätze nicht immer einen Einblick in die physikalischen Zusammenhänge der Böendynamik geben, können sie zur hochaufgelösten Modellierung der raumzeitlichen Variabilität der Böengeschwindigkeit genutzt werden. So wurde beispielsweise das 98 Perzentil täglicher Böengeschwindigkeitszeitreihen für die Schweiz auf einem 50 m × 50 m Raster kalkuliert (Etienne et al., 2010). Wiederkehrperioden extremer Böengeschwindigkeit wurden in Deutschland auf einem 1000 m × 1000 m Raster berechnet (Augter und Roos, 2011). Jung und Schindler (2016) modellierten die statistische Verteilung von Böengeschwindigkeitswerten auf einem 50 m × 50 m Raster in Baden-Württemberg.

Alle bisher erwähnten Studien befassten sich entweder mit den statistischen Eigenschaften von Böengeschwindigkeitsverteilungen oder mit einzelnen schadenverursachenden Wintersturmereignissen. Da die Zugbahn von Winterstürmen wie z. B. Vivian im Jahr 1990 (Schüepp et al., 1994), Lothar im Jahr 1999 (Mayer und Schindler, 2002) oder Kyrill im Jahr 2007 (Fink et

*) Korrespondierender Autor: Prof. Dr. Dirk Schindler. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Environmental Meteorology, Werthmannstraße 10, D-79085 Freiburg.
E-Mail: dirk.schindler@meteo.uni-freiburg.de

al., 2007) grundsätzlich einzigartig sind, besteht die Notwendigkeit, möglichst viele Böengeschwindigkeitsfelder verbunden mit einzelnen Wintersturmereignissen zu kombinieren, um damit so viele Winterstürme wie möglich in der Analyse zu berücksichtigen. Durch die Berücksichtigung einer Vielzahl von Wintersturmereignissen können statistische Aussagen über die raumzeitliche Variabilität der die Sturmgefährdung widerspiegelnden Böengeschwindigkeitswerte getroffen werden. Es werden dann nicht nur Aussagen über zentrale Tendenzen (z. B. Mittelwert oder Median) der Böengeschwindigkeit während Stürmen möglich, sondern auch Aussagen über die Abweichung der sturmspezifischen Böengeschwindigkeit von diesen zentralen Tendenzen. Eine verbesserte Quantifizierung von statistischen Eigenschaften der Böengeschwindigkeit während Winterstürmen ist notwendig, da Klimaprojektionen bis zum Jahr 2100 weitgehend übereinstimmend Veränderungen des Wintersturmgeschehens über Europa andeuten (MÖLTER et al., 2016).

Einen Schritt hin zur statistischen Beschreibung von rezenten bodennahen Böengeschwindigkeitsfeldern verbunden mit schadenverursachenden Winterstürmen haben JUNG und SCHINDLER (2019) vollzogen. Auf der Grundlage von 98 Winterstürmen, die im Zeitraum 1981–2018 über Mitteleuropa zogen, haben sie einen Atlas für rezente Winterstürme in Deutschland (GeWiSA) erstellt. GeWiSA liegt in einer Auflösung von 25 m × 25 m für das gesamte Bundesgebiet vor. Er bildet quantitative Informationen (1) zum Median der wintersturmgebundenen Böengeschwindigkeit und (2) zu wintersturmspezifischen Böengeschwindigkeitsfeldern über Deutschland ab.

Auf der Grundlage von den in GeWiSA enthaltenen Informationen ist das Ziel dieser Arbeit die Quantifizierung von statistischen Eigenschaften der wintersturmgebundenen Böengeschwindigkeit auf der Waldfläche Deutschlands im Zeitraum 1981–2018, um daraus Erkenntnisse zur gegenwärtigen Wintersturmgefährdung der Wälder zu gewinnen.

MATERIAL UND METHODEN

2.1 Ausgewählte Winterstürme

Zur Erstellung von GeWiSA wurden 98 schadenverursachende Winterstürme ausgewählt (JUNG und SCHINDLER, 2019). Die Auswahl der Winterstürme erfolgte anhand der inflationsbereinigten Gesamtschäden, die durch den NatCatSERVICE von Munich Re seit dem Jahr 1981 dokumentiert werden (MUNICH RE, 2019). Da in einzelnen Jahren mehrere schadenverursachende Winterstürme auftraten, wurde für die Erstellung von GeWiSA eine maximale Anzahl von fünf Winterstürmen pro Jahr mit Gesamtschäden in der Höhe von mindestens 3.0 Mill. US-Dollar ausgewählt.

Die Stürme, die im Untersuchungszeitraum in Europa die höchsten Gesamtschäden verursachten, waren die Orkane Kyrill im Jahr 2007 (5.1 Mrd. US-Dollar), Lothar im Jahr 1999 (2.2 Mrd. US-Dollar) und Friederike im Jahr 2018 (1.9 Mrd. US-Dollar). Mit mehreren katastrophalen Winterstürmen, die in kurzen Abständen über weite Teile Europas zogen, war 1990 ein besonderes Jahr. Die Stürme Daria, Vivian und Wiebke verursachten in den ersten drei Monaten dieses Jahres jeweils Gesamtschäden in der Höhe von 1.8 Mrd. US-Dollar.

2.2 Böengeschwindigkeitsdaten

Unter Böen versteht man die kurzzeitigen Schwankungen des Betrags und der Richtung des horizontalen Windvektors (DURST, 1960). Erreicht die Windgeschwindigkeit für eine Dauer von 3 s anhaltend Werte zwischen 18 m/s und 24 m/s spricht man von Sturmböen. Orkanböen erreichen anhaltend über 3 s Geschwindigkeitswerte von mindestens 33 m/s (DWD, 2019). Für die Analyse der Böengeschwindigkeit wurden zunächst 414 für den Zeitraum 1981-2018 verfügbare Zeitreihen der maximalen täglichen Böengeschwindigkeit (*GS*) des Deutschen Wetterdienstes (DWD) auf ihre Verwendbarkeit zur Modellentwicklung geprüft.

Die *GS*-Zeitreihen werden vom DWD über die Webseite des Climate Data Center (CDC) zur Verfügung

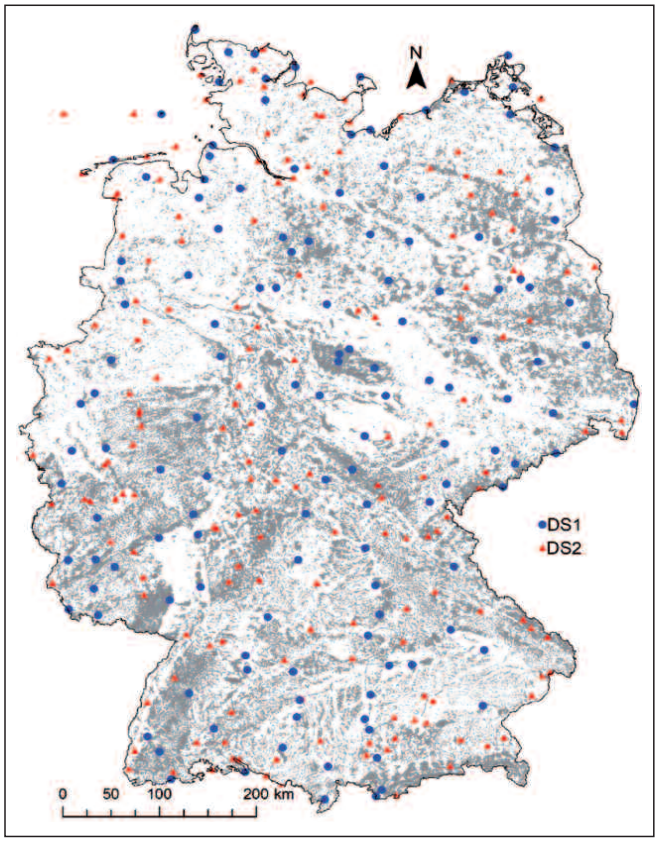

Abb. 1

Wälder in Deutschland (graue Fläche) und Lage von 307 Messstationen des Deutschen Wetterdienstes (DWD), deren Böengeschwindigkeitszeitreihen für die Erstellung des Atlas für rezente Winterstürme in Deutschland (GeWiSA) verwendet wurden. Der für die Erstellung von GeWiSA verwendete Datensatz wurde in einen Parametrisierungsdatensatz (DS1) und einen Testdatensatz (DS2) aufgeteilt.

Forests in Germany (grey areas) and location of 307 measuring stations of the German Meteorological Service (DWD), whose gust speed time series were used for the preparation of the atlas for historical winter storms in Germany (GeWiSA). The data used to produce GeWiSA was divided into a parameterization dataset (DS1) and a test dataset (DS2).

gestellt (CDC, 2019). Basierend auf ihrer Vollständigkeit (*DA*) wurden die *GS*-Zeitreihen in einen Parametrisierungsdatensatz (DS1) und einen Testdatensatz (DS2) aufgeteilt (*Abbildung 1*). In DS1 wurden 135 fast vollständige *GS*-Zeitreihen mit $DA > 90\,\%$ zusammengefasst. Zur Modellüberprüfung wurden 172 *GS*-Zeitreihen mit $25\,\% \leq DA \leq 90\,\%$ DS2 zugeordnet. Zeitreihen mit $DA < 25\,\%$, wurden in der Analyse nicht weiterverwendet.

Im Messzeitraum veränderten sich an einigen Stationen infolge von Verlegungen der Messstationen, Änderungen in der Messhöhe und/oder Messgerätewechseln statistische Eigenschaften der *GS*-Zeitreihen. Um die Homogenität in und zwischen den *GS*-Zeitreihen herzustellen, wurde jede *GS*-Zeitreihe einer Bruchpunktanalyse unterzogen und gegebenenfalls durch eine Quantilsanpassung korrigiert (Wang, 2008a,b; Wan et al., 2010; Jung und Schindler, 2016).

Die Waldflächen wurden für diese Untersuchung aus dem CORINE Land Cover Datensatz 2018 abgeleitet (CLC, 2019).

2.3 Modellierung des Medians der Böengeschwindigkeit

Die Modellierung des Medians der gemessenen Böengeschwindigkeit ($\widetilde{GS}$) wurde auf der Grundlage der 98 ausgewählten Winterstürme mit dem LSBoost-Algorithmus (Friedman, 2001) durchgeführt. Das verwendete LSBoost-Modell besteht aus $M = 100$ Regressionsbäumen, d. h. aus Entscheidungsbäumen mit binären Regelausdrücken. Es zielt darauf ab, den mittleren quadratischen Fehler zwischen dem modellierten Median der Böengeschwindigkeit ($\widetilde{GS}_{mod}$) und $\widetilde{GS}$ zu minimieren. Der Algorithmus beginnt mit der Berechnung des Medians von $\widetilde{GS}$ aller in DS1 zusammengefassten Stationen $\langle\widetilde{GS}\rangle$. Im Anschluss daran werden die Regressionsbäume $B_1, \ldots, B_m$ in gewichteter Weise kombiniert, um die Modellgüte zu verbessern. Die einzelnen Regressionsbäume sind eine Funktion der ausgewählten Prädiktoren (*PV*):

$$\widetilde{GS}_{mod}(PV) = \langle\widetilde{GS}\rangle(PV) + v \sum_{m=1}^{M} p_m B_m(PV) \qquad (1)$$

Dabei ist p_m das Gewicht für das Modell m und $v = 0.1$ ist die Lernrate des Modells. Das LSBoost-Modell wurde mit dem Software-Produkt Matlab der Firma Mathworks (Natick, Massachusetts, USA) erstellt.

Die räumlich hochaufgelöste (25 m × 25 m) Modellierung von *GS* wurde in Abhängigkeit der Prädiktoren geographische Länge, geographische Breite, Messhöhe von *GS*, relative Geländehöhe, topographische Exposition und Rauigkeitslänge durchgeführt, von denen aus früheren Untersuchungen (Jung und Schindler, 2016; Schindler et al., 2016) bekannt ist, dass sie einen Einfluss auf die raumzeitliche Variabilität von *GS* haben. Jung und Schindler (2019) haben dazu eine umfangreiche Prädiktorenselektion durchgeführt, bei der sie aus 3400 Kombinationen von 37 Prädiktoren diejenigen Kombinationen ausgewählt haben, die zu den besten Modellergebnissen geführt haben.

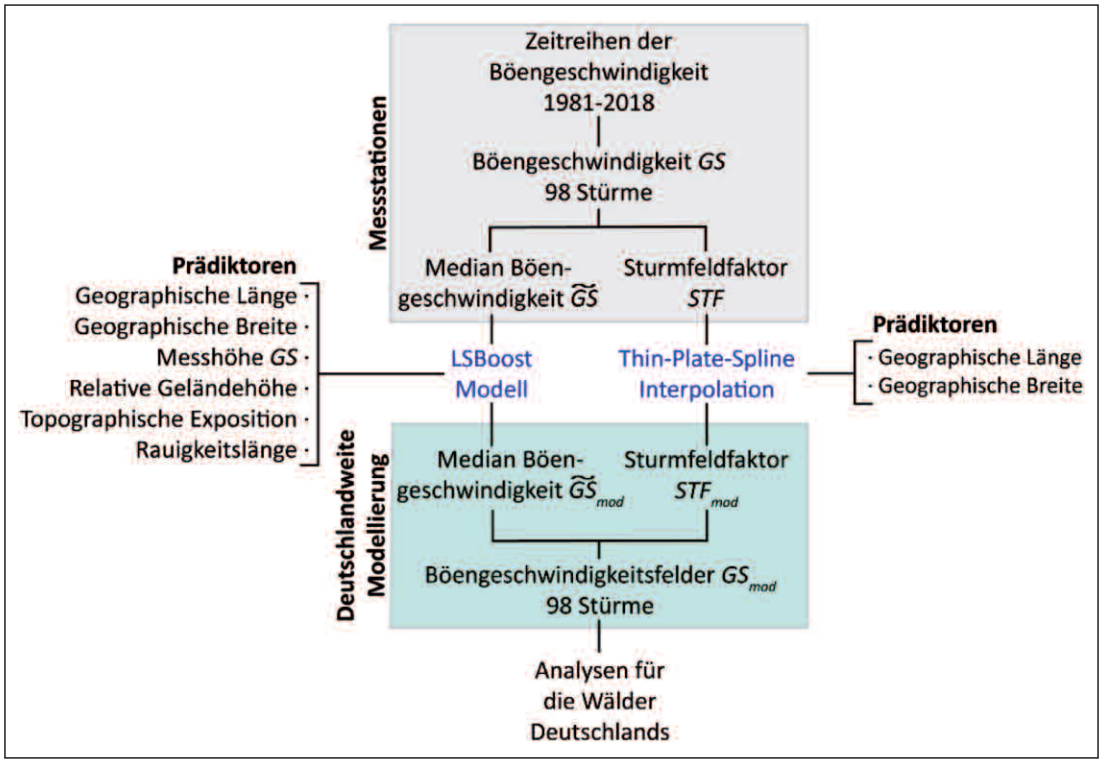

Abb. 2

Arbeitsschritte zur Erstellung des Atlas für rezente Winterstürme in Deutschland (GeWiSA).
Workflow for the preparation of Germany's historical winter storm atlas (GeWiSA).

Zu den ausgewählten Prädiktoren von *GS* gehört die Höhe, in der *GS* gemessen wurde. Sie weicht an 53 % der verwendeten DWD-Stationen von der Standardmesshöhe 10 m über Grund ab. Um dem großräumigen Muster von sturmspezifischen *GS*-Feldern Rechnung zu tragen, wurden die geographische Länge und Breite verwendet. Die Wirkung des Reliefs auf *GS* wurde durch die relative Geländehöhe (JUNG und SCHINDLER, 2018) und die topographische Exposition (WILSON, 1984) berücksichtigt. Die reliefbezogenen Prädiktoren wurden auf der Grundlage des digitalen Geländemodells EU-DEM v.1 (CLMS, 2019a), das eine Auflösung von 25 m × 25 m aufweist, berechnet. Der Einfluss der Oberflächenrauigkeit auf *GS* wurde landnutzungsabhängig durch die Rauigkeitslänge abgeschätzt (JUNG, 2016). Die Einbindung der Rauigkeitslänge in die *GS*-Modellierung erfolgte auf der Grundlage der Europäischen Siedlungskarte ESM 2012 R (CLMS, 2019b).

2.4 Berechnung des Sturmfeldfaktors

Da jeder Wintersturm einmalige Eigenschaften aufweist, wurde für alle Messstationen zusätzlich zu $\widetilde{GS}$ der Sturmfeldfaktor (*STF*) berechnet. Er beschreibt das Verhältnis zwischen der sturmspezifischen Böengeschwindigkeit *GS* und $\widetilde{GS}$ (JUNG und SCHINDLER, 2019):

$$STF = \frac{GS}{\widetilde{GS}} \tag{2}$$

Die anschließende Abbildung von *STF* im gesamten Untersuchungsgebiet erfolgte durch eine Thin-Plate-Spline-Interpolation (WOOD, 2003). Dafür wurden die geographische Länge und Breite als Prädiktoren verwendet. Auf der Grundlage von $GS = STF \cdot \widetilde{GS}$ wurden dann flächig 98 sturmspezifische Böengeschwindigkeitsfelder berechnet.

Eine Zusammenfassung aller Arbeitsschritte, die zur Erstellung von GeWiSA durchgeführt wurden, ist in der *Abbildung 2* dargestellt. Aus den *GS*-Zeitreihen, die der DWD über die CDC-Webseite zur Verfügung stellt, wurde *GS* verbunden mit 98 Winterstürmen extrahiert. Daraus wurden stationsspezifisch $\widetilde{GS}$ und *STF* berechnet. Durch die Anwendung des LSBoost-Ansatzes wurde $\widetilde{GS}$ im gesamten Untersuchungsgebiet auf einem 25 m × 25 m Raster modelliert ($\widetilde{GS}_{mod}$). Auf dem gleichen Raster wurde *STF* durch eine Thin-Plate-Spline-Interpolation abgebildet (STF_{mod}). Mit dem Produkt von $\widetilde{GS}_{mod}$ und STF_{mod} wurden abschließend für die ausgewählten Sturmereignisse *GS*-Felder abgeschätzt (GS_{mod}). Mit den auf diese Weise erstellten GS_{mod}-Feldern werden statistische Untersuchungen zur raumzeitlichen Variabilität der Böengeschwindigkeit auf der Waldfläche Deutschlands möglich.

3. ERGEBNISSE

3.1 Median der wintersturmgebundenen Böengeschwindigkeit

Auf der Waldfläche Deutschlands schwankt $\widetilde{GS}_{mod}$ überwiegend im Bereich von 19 m/s bis 26 m/s. Damit muss auf dem größten Teil der Waldfläche von einem regelmäßigen Auftreten von Sturmböen ausgegangen werden. Die höchsten $\widetilde{GS}_{mod}$-Werte (> 26 m/s) wurden

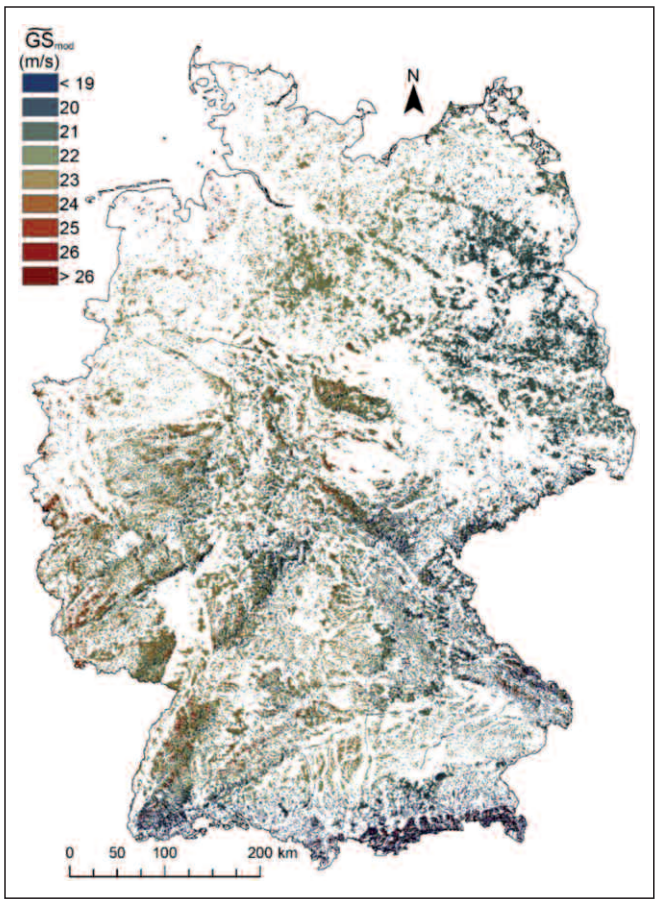

Abb. 3

Median der modellierten, an Winterstürme gebundenen Böengeschwindigkeit ($\widetilde{GS}_{mod}$) für die Waldfläche Deutschlands im Zeitraum 1981–2018.

Median of modelled gust speed related to winter storms ($\widetilde{GS}_{mod}$) over German forests in the period 1981–2018.

für die küstennahen Bereiche im Norden Deutschlands, für die Höhenlagen der Mittelgebirge und der Alpen berechnet (*Abbildung 3*). Standorte, an denen im Binnenland besonders häufig hohe wintersturmgebundene *GS*-Werte auftreten, sind exponierte Berggipfel wie z. B. der Brocken im Harz. Dort beträgt $\widetilde{GS}_{mod}$ mehr als 45 m/s. Auf dem höchsten Gipfel des Schwarzwaldes, dem Feldberg, ist $\widetilde{GS}_{mod}$ größer als 39 m/s.

Durch die zunehmende Entfernung zur Küste, die zunehmende Komplexität des Reliefs und die größer werdende Oberflächenrauigkeit, besteht von Nordwest nach Südost eine großräumige Tendenz zur Abnahme von $\widetilde{GS}_{mod}$. Geringere $\widetilde{GS}_{mod}$-Werte (< 22 m/s) als in Küstennähe finden sich beispielsweise in großen Teilen Brandenburgs und Sachsens. Die absolut geringsten $\widetilde{GS}_{mod}$-Werte (< 19 m/s) des gesamten Untersuchungsgebietes kommen in bewaldeten, tiefeingeschnittenen Mittelgebirgstälern und in Tälern des Alpenvorlandes vor.

3.2 Wintersturmgefährdete Waldgebiete

Zur Einschätzung der Gefährdung von Wäldern durch wintersturmgebundene Böen auf der Ebene der Bundes-

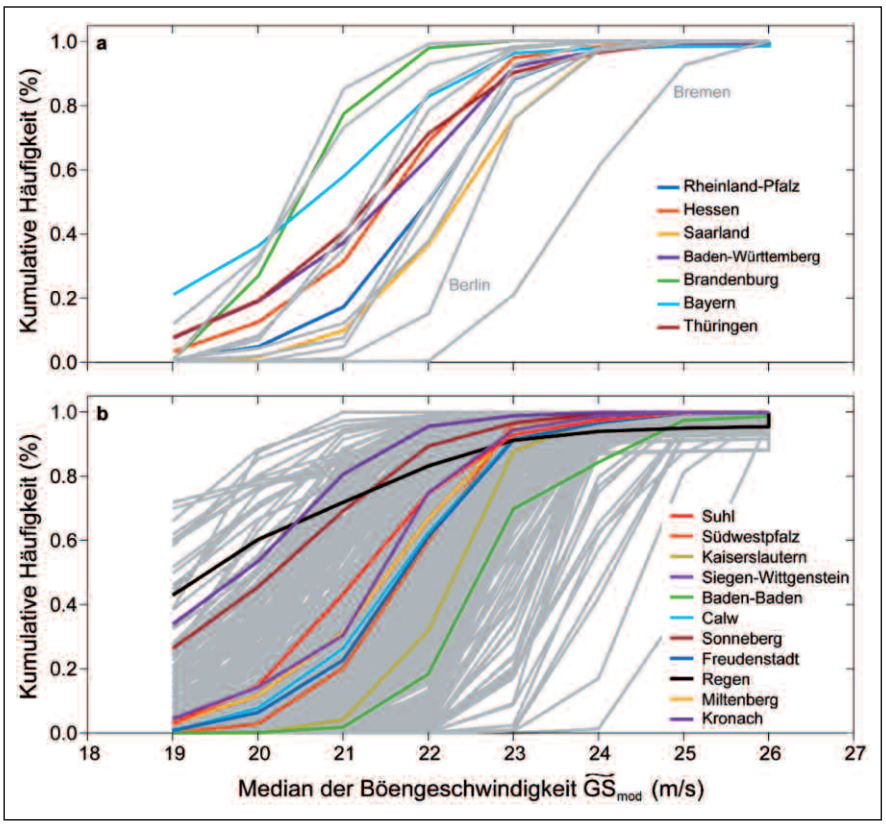

Abb. 4

a) Bundesland- und (b) land- bzw. stadtkreisspezifische kumulative Häufigkeit des Medians der Böengeschwindigkeit verbunden mit schadenverursachenden Winterstürmen ($\widetilde{GS}_{mod}$) im Zeitraum 1981–2018. Farblich gekennzeichnet sind Bundesländer mit einer Bewaldung von mehr als 30 % ihrer Fläche und Land- und Stadtkreise mit einer Bewaldung von mehr als 60 % ihrer Fläche.

Cumulative frequency of the median gust speed associated with potentially destructive winter storms ($\widetilde{GS}_{mod}$) in the period 1981–2018 (a) on the federal state level and (b) on the level of rural and urban districts. Colour-coded states are states with a forest cover of more than 30 % of their area and rural and urban districts with a forest cover of more than 60 % of their area.

länder und der Land- und Stadtkreise ist in *Abbildung 4* die kumulative Häufigkeit von $\widetilde{GS}_{mod}$ dargestellt. Sie beschreibt den Waldflächenanteil, über dem $\widetilde{GS}_{mod}$ Werte bis zu 26 m/s annimmt. In den meisten Bundesländern, Land- und Stadtkreisen schwankt $\widetilde{GS}_{mod}$ in dem engen Bereich zwischen 19 m/s und 26 m/s. Je länger die kumulative Häufigkeit von $\widetilde{GS}_{mod}$ bei ansteigenden $\widetilde{GS}_{mod}$-Werten niedrig bleibt, desto sturmgefährdeter kann das jeweilige Bundesland oder der jeweilige Land- bzw. Stadtkreis angesehen werden.

Die sieben Bundesländer mit einem Waldflächenanteil von mehr als 30 % sind in der *Abbildung 4a* farblich gekennzeichnet. In Brandenburg steigt die kumulative Häufigkeit bei den niedrigsten $\widetilde{GS}_{mod}$-Werten sehr steil an. Im Gegensatz dazu nimmt die kumulative Häufigkeit im Saarland erst bei höheren $\widetilde{GS}_{mod}$-Werten deutlich zu. Damit wird die Waldfläche des Saarlandes als sturmgefährdeter beurteilt als die Waldfläche Brandenburgs. Die größte Sturmgefährdung besteht bei dieser Art der Interpretation für die Wälder in Bremen.

In der *Abbildung 4b* wird die Interpretation des Verlaufs der kumulativen Häufigkeit von $\widetilde{GS}_{mod}$ in Abhängigkeit von $\widetilde{GS}_{mod}$ auf die Sturmgefährdung von Wäldern in den Landkreisen übertragen. Elf Landkreise mit einem Waldflächenanteil von mehr als 60 % sind ebenfalls farblich gekennzeichnet. Demnach sind beispielweise die zentralen Tendenzen der Sturmgefährdung von Wäldern im Landkreis Regen geringer einzuschätzen als in den Landkreisen Südwestpfalz, Kaiserslautern und Baden-Baden.

In der *Abbildung 5* ist die Häufigkeit des Auftretens von Winterstürmen mit Orkanböen auf 10 %, 25 %, 50 % und 90 % der Waldfläche in den Land- und Stadtkreisen dargestellt. Demnach zogen im Untersuchungszeitraum in 55 Land- und Stadtkreisen acht und mehr Winterstürme mit Orkanböen über 10 % der jeweiligen Waldfläche. Diese Land- und Stadtkreise gruppieren sich vornehmlich an den Küsten der Nord- und Ostsee, am Niederrhein in der Kölner Bucht, in Baden-Württemberg und Bayern. Werden Landkreise berücksichtigt, in denen über 50 % der jeweiligen Waldfläche Winterstürmen mit Orkanböen ausgesetzt waren, dann reduziert sich deren Anzahl auf neun. Nur in den Landkreisen Flensburg, Mülheim an der Ruhr und Oberhausen wur-

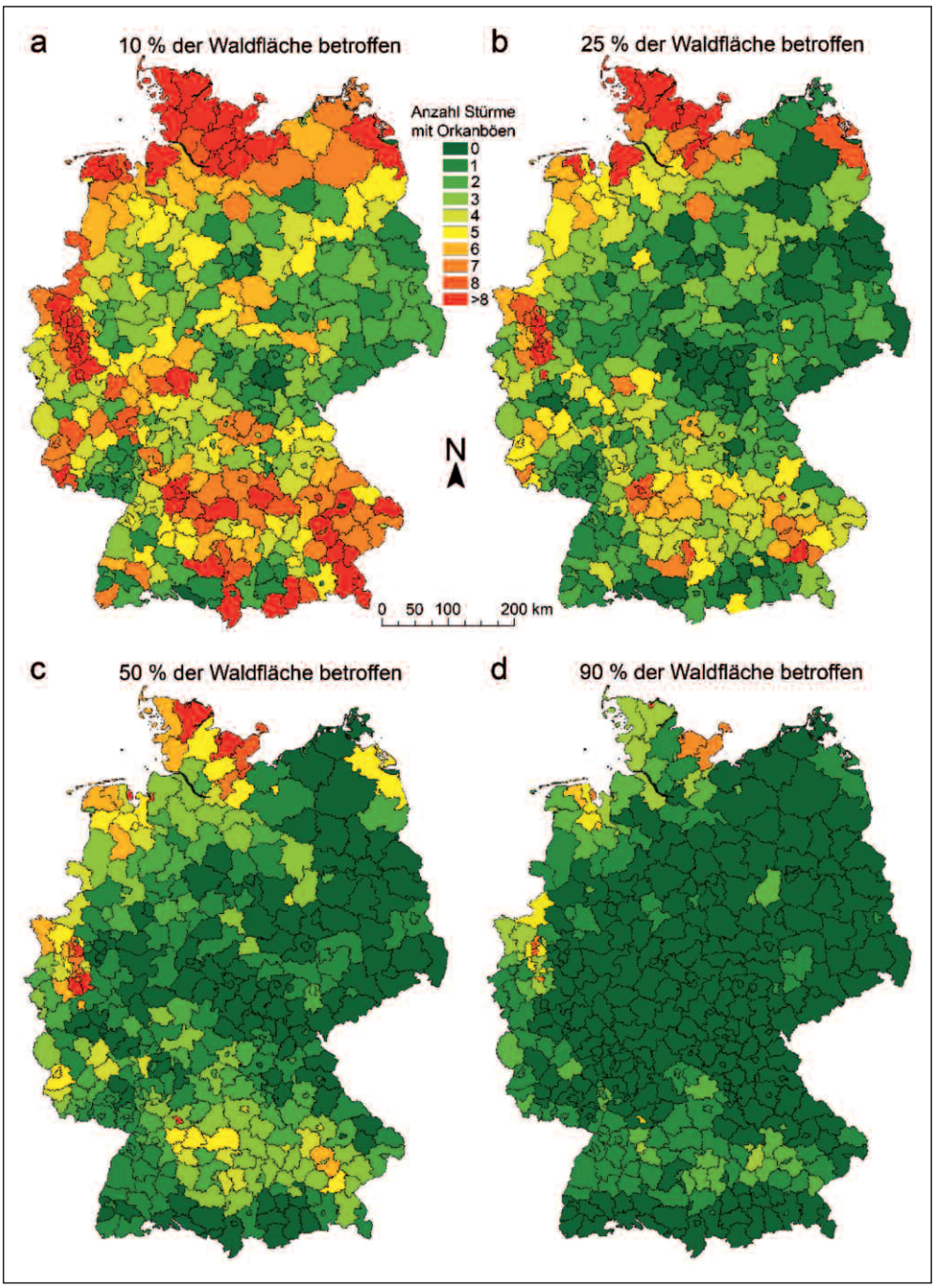

Abb. 5

Anzahl von Winterstürmen mit Orkanböen auf (a) 10 %, (b) 25 %, (c) 50 % und (d) 90 % der Waldfläche in den Land- und Stadtkreisen Deutschlands im Zeitraum 1981–2018.

Number of winter storms with hurricane-force wind speed which in the period 1981–2018 hit (a) 10 %, (b) 25 %, (c) 50 % and (d) 90 % of the forest area in rural and urban districts of Germany.

den 90 % der Waldfläche von mindestens sieben Winterstürmen mit Orkanböen heimgesucht. In Teilen Baden-Württembergs und Bayerns wurden 50 % der Waldfläche mehrerer benachbarter Land- und Stadtkreise von mindestens zwei bis zu acht (Stadtkreis Heilbronn) Winterstürmen mit Orkanböen erfasst.

Ein Beispiel für ein spezifisches Muster von STF_{mod}, das in gleicher Weise im Atlas für rezente Winterstürme für alle 98 untersuchten Stürme flächendeckend vorliegt, ist in der *Abbildung 6* dargestellt. Das bodennahe GS_{mod}-Feld verbunden mit dem Orkan Lothar, der am 26. Dezember 1999 über weite Teile Süddeutschlands zog, verursachte eine Schadholzmenge von 30 Mill. Efm, was zu dieser Zeit dem dreifachen Holzeinschlag in Baden-Württemberg entsprach (KOHNLE et al., 2003; HARTEBRODT, 2004). In großen Teilen des Nord- und Südschwarzwaldes sowie in östlichen Teilen Baden-Württembergs weist STF_{mod} Werte von bis zu 2.2 auf. Das bedeutet, dass GS_{mod} verbunden mit dem Orkan Lothar dort mehr als doppelt so hoch war wie $\widehat{GS}_{mod}$.

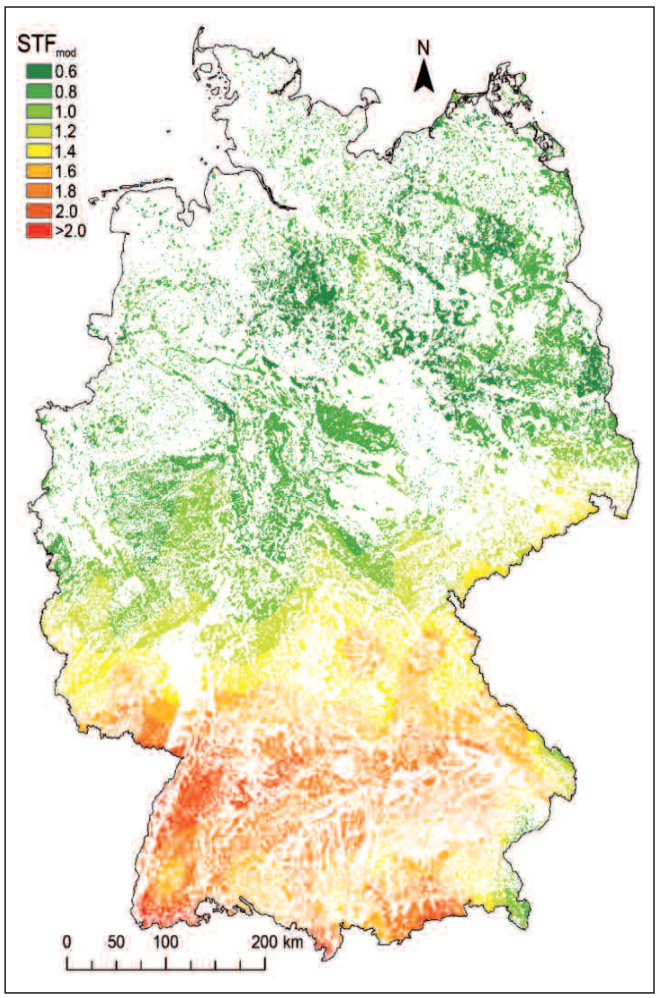

Abb. 6

Räumliches Muster des modellierten Sturmfeldfaktors (STF_{mod}) verbunden mit dem Orkan Lothar, der am 26. Dezember 1999 über Süddeutschland gezogen ist.

Spatial pattern of the modelled storm field factor (STF_{mod}) associated with winter storm Lothar, which hit southern Germany on 26 December 1999.

4. DISKUSSION

Die präsentierten Ergebnisse zeigen, dass es durch die GeWiSA zugrundeliegende Methodik möglich ist, Böengeschwindigkeitsfelder räumlich hochaufgelöst über Deutschland in GS_{mod} und $\widetilde{GS}_{mod}$ zu trennen. Während $\widetilde{GS}_{mod}$ räumlich explizit Auskunft über die Sturmgefährdung von Wäldern durch zentrale Tendenzen des räumlichen Böengeschwindigkeitsmusters gibt, ermöglicht STF_{mod} die räumlich explizite Einschätzung der mit einzelnen rezenten Wintersturmereignissen verbundenen Gefährdung von Wäldern. Schäden in der Folge einzelner Wintersturmereignisse können damit einer Sturmintensität, dem Sturmfeldfaktor, zugeordnet werden.

Die hohen $\widetilde{GS}_{mod}$-Werte im Norden Deutschlands lassen sich durch die Zugbahnen der in die Untersuchung einbezogenen Winterstürme, das wenig ausgeprägte Relief in Küstennähe und durch die vergleichsweise geringe Oberflächenrauigkeit in diesem Teil Deutschlands erklären (JUNG und SCHINDLER, 2019). Durch die zunehmende Entfernung zur Küste, die zunehmende Komplexität des Reliefs und die größer werdende Oberflächenrauigkeit, besteht von Nordwest nach Südost eine großräumige Tendenz zur Abnahme von $\widetilde{GS}_{mod}$. Ungeachtet dessen muss über allen Waldgebieten in Deutschland mit dem wiederkehrenden Auftreten von Stürmen mit hohen Böengeschwindigkeitswerten gerechnet werden. Zur Minimierung von Sturmschäden sollten Wälder deswegen mindestens Windlasten verbunden mit $\widetilde{GS}$ standhalten können. Da $\widetilde{GS}_{mod}$ über den meisten Waldgebieten in einem engen Bereich schwankt (19 m/s bis 26 m/s), kommt STF_{mod} gegenüber $\widetilde{GS}_{mod}$ allerdings eine sehr große Bedeutung zu, da die raumzeitlichen Wintersturmeigenschaften immer einzigartig ausgeprägt sind. Die mit GeWiSA simulierten *STF*-Werte deuten an, dass Wälder in Deutschland Orkanen bis zum 2.2-Fachen von $\widetilde{GS}_{mod}$ (Orkan Lothar) ausgesetzt sein können.

Durch den für GeWiSA gewählten probabilistischen Modellierungsansatz wird die einzelfallbasierte Analyse von Wintersturmereignissen aufgehoben. Zudem werden räumlich hochaufgelöste, ereignisunabhängige Aussagen über die Sturmgefährdung von Wäldern möglich, was letztlich zu einem besseren Risikomanagement führen kann, weil nun eine Referenz für den Wertebereich der Sturmgefährdung vorliegt, auf deren Grundlage geklärt werden kann, ob Maßnahmen zur Stabilisierung von Wäldern gegenüber Stürmen ergriffen werden müssen bzw. ergriffen werden können. Basierend auf GeWiSA können in weiteren Untersuchungen Baum- und Bestandeseigenschaften identifiziert werden (SCHMIDT et al., 2010), durch deren Steuerung eine Reduktion des zukünftigen Sturmschadensrisikos herbeigeführt werden kann. Das Wissen über die zu steuernden Baum- und Bestandeseigenschaften ermöglicht dann die Entwicklung eines Managementinstrumentes, mit dessen Unterstützung räumlich hochaufgelöst Strategien entwickelt werden können, die die ökonomischen (YOUSEFPOUR und HANEWINKEL, 2016) und naturschutzfachlich-ökologischen (MEYER, 2013) Konsequenzen von Sturmschäden unter sich ändernden klimatischen Bedingungen minimieren und die Entscheidungsfindung unter Sturmschadensrisiko verbessern können.

5. ZUSAMMENFASSUNG

Winterstürme haben aufgrund ihrer großräumigen Ausdehnung und der Eigenschaften ihrer bodennahen Strömungsfelder in den vergangenen Jahrzehnten die größten Schadholzmengen in den europäischen Wäldern verursacht. Das Gefährdungspotenzial der Wälder durch Winterstürme ist verbunden mit dem Auftreten von extremen Böengeschwindigkeitswerten. Deshalb wurde auf der Grundlage von Langzeitmessungen (1981–2018) der Böengeschwindigkeit ein räumlich hochaufgelöster (25 m × 25 m) Wintersturmatlas für Deutschland (GeWiSA) erstellt. Der Atlas bildet die raumzeitliche Ausprägung der maximalen Böengeschwindigkeit von 98 schadenverursachenden Winterstürmen seit dem Jahr 1981 ab. Die Erstellung des Atlas erfolgte in einem zweistufigen Verfahren. Im ersten Schritt wurde der Median der Böengeschwindigkeit aller untersuchten Winterstürme flächendeckend simuliert. Dafür wurden Eigenschaf-

ten der Orographie und der Oberflächenrauigkeit als Prädiktorvariablen verwendet. Im zweiten Schritt wurde für alle Winterstürme ein Sturmfeldfaktor berechnet, der die individuelle räumliche Sturmcharakteristik abbildet. Dabei wurde festgestellt, dass der Orkan Lothar (26. Dezember 1999) mit einem Sturmfeldfaktor von größer 2.0 der extremste Wintersturm war. In der Gesamtschau macht GeWiSA deutlich, dass im Untersuchungszeitraum kein typischer, wiederkehrender Wintersturm auftrat. Alle in die Analyse einbezogenen Wintersturmereignisse haben eine ihnen eigene Charakteristik, wodurch sich die allgemeine Abschätzung der Sturmgefährdung von Wäldern nicht auf einzelne Stürme zurückführen lässt. Der probabilistische Modellierungsansatz, der für die Erstellung von GeWiSA gewählt wurde, ermöglicht die Ergänzung der einzelfallbasierten Analyse von Wintersturmereignissen durch ereignisunabhängige Informationen über die Sturmgefährdung von Wäldern, was letztlich zu einem besseren Management von Wäldern hinsichtlich von Naturgefahren führen kann. Die probabilistische Struktur von GeWiSA ermöglicht außerdem die Entwicklung von Wintersturmszenarien unter dem Einfluss des derzeit ablaufenden Klimawandels.

6. SUMMARY

Title of the paper: *Winter storms over Germany's forests 1982–2018.*

In recent decades, winter storms have caused the largest amount of damaged wood in European forests due to their large-scale extent and the characteristics of their near-surface gust fields. The hazard of forests from winter storms is associated with the occurrence of high-impact gust speed. Therefore, a high-resolution (25 m × 25 m) winter storm atlas for Germany (GeWiSA) was prepared on the basis of long-term measurements of gust speed (1981–2018). The atlas summarises the spatial and temporal characteristics of the maximum gust speed of 98 destructive winter storms since 1981. It was produced in a two-stage procedure. In the first step, the median gust speed of all winter storms was simulated for entire Germany. Properties of the orography and the surface roughness were used as predictor variables. In the second step, a storm field factor, which represents the spatial characteristics of individual storms, was calculated for all winter storms. It was found that high-impact storm Lothar (26 December 1999) was the most extreme winter storm with a storm field factor greater than 2.0. GeWiSA illustrates that no typical, recurring winter storm occurred in the study period. All winter storm events had their own characteristics. Thus, the general assessment of the storm hazard of forests cannot be traced back to individual storm events. The probabilistic modelling approach chosen for the preparation of GeWiSA allows to supplement the case-by-case analysis of winter storm events with event-independent information on the storm hazard of forests, which can ultimately lead to better management against natural disturbances. The probabilistic structure of GeWiSA also allows the development of winter storm scenarios under the influence of current climate change.

7. RÉSUMÉ

Titre de l'article: *Tempêtes hivernales sur les forêts d'Allemagne 1981–2018.*

En raison de leur étendue sur de grandes surfaces et de leurs capacités à produire des tornades proches du sol au cours des dernières décennies, des tempêtes hivernales ont causé les plus grandes pertes en bois. Le danger potentiel qui menace les forêts face aux tempêtes hivernales, est associé à l'apparition de vitesses extrêmes de rafales de vent. Sur la base de mesures de vitesses de rafales de vent prises à long terme (1981–2018), un atlas des tempêtes hivernales d'Allemagne (GeWiSA) a été ainsi été réalisé. L'atlas représente la spécificité spatio-temporelle de la vitesse maximale des rafales de vent de 98 tempêtes hivernales qui ont causé des dégâts depuis l'année 1981. La réalisation de l'atlas résulta d'un travail à deux niveaux. Dans un premier temps, la moyenne de la vitesse des rafales de vent de toutes les tempêtes hivernales étudiées a été simulée à l'échelle du pays. Pour cela, les propriétés de l'orographie et de la rugosité de surface ont été utilisées comme variables de prédiction. Dans un deuxième temps un facteur de champ de tempête a été calculé pour toutes les tempêtes hivernales. Ce facteur traduit la caractéristique de la tempête de manière individuelle et spatiale. En conséquence il a été établi que l'ouragan Lothaire (26 décembre 1999) était la tempête hivernale la plus extrême, avec un facteur de plus de 2. Dans l'aperçu d'ensemble, l'atlas met en lumière que, durant la période de recherche, aucune tempête hivernale ne s'est produite de manière typique et répétitive. Tous les événements de tempêtes hivernales concernés dans l'analyse ont une caractéristique identique, à savoir que l'évaluation générale du risque de tempêtes des forêts ne peut être attribuée à des tempêtes individuelles. L'approche de modélisation probabiliste, choisie pour élaborer GeWiSA, permet de compléter l'analyse de chaque cas des tempêtes hivernales par des informations dépendantes de l'événement sur le risque de tempêtes en forêts, ce qui peut finalement conduire à une meilleure gestion des forêts du point de vue des risques naturels. La structure probabiliste de GeWiSA permet également de développer des scénarios de tempêtes hivernales dans le cadre actuel du changement climatique.

8. DANKSAGUNG

Die vorliegende Arbeit wurde durch das vom Waldklimafonds geförderte Verbundprojekt MiStriKli finanziert (Förderkennzeichen: 28W-K-4-166-01).

9. LITERATUR

ALBRECHT, A., C. JUNG und D. SCHINDLER (2019): Improving empirical storm damage models by coupling with high-resolution gust speed data. Agricultural and Forest Meteorology **268**, S. 23–31.

AUGTER, G. und M. ROOS (2011): Berechnung von Sturmintensitäten für Deutschland. Berichte des Deutschen Wetterdienstes; Deutscher Wetterdienst: Offenbach am Main, Germany, Nr. 236.

CDC (2019): CDC – Climate Data Center des Deutschen Wetterdienstes. https://cdc.dwd.de/portal/ (letzter Zugriff am 28. Mai 2019).

CIANG, C. C., J.-R. LEE und H.-J. BANG (2008): Structural health monitoring for a wind turbine system: a review of damage detection methods. Measurement Science and Technology **19**, 122001.

CLMS (2019a): Copernicus Land Monitoring Service, EU-DEM. https://land.copernicus.eu/imagery-in-situ/eu-dem (letzter Zugriff am 28. Mai 2019).

CLMS (2019b): Copernicus Land Monitoring Service, European Settlement map. https://land.copernicus.eu/pan-european/GHSL (letzter Zugriff am 28. Mai 2019).

CLC (2019): CORINE Land Cover. https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover (letzter Zugriff am 28. Mai 2019).

DONAT, M. G., G. C. LECKEBUSCH, J. G. PINTO und U. ULBRICH (2010): Examination of wind storms over Central Europe with respect to circulation weather types and NAO phases. International Journal of Climatology **30**, S. 1289–1300.

DURST, C. S. (1960): Wind speeds over short periods of time. Meteorological Magazine **89**, S. 181–186.

DWD (2019): Deutscher Wetterdienst – Warnkriterien. https://www.dwd.de/DE/wetter/warnungen_aktuell/kriterien/warnkriterien.html (letzter Zugriff am 16. August 2019).

ETIENNE, C., A. LEHMANN, S. GOYETTE, J. I. LOPEZ-MORENO und M. BENISTON (2010): Spatial predictions of extreme wind speeds over Switzerland using generalized additive models. Journal of Applied Meteorology and Climatology **49**, S. 1956–1970.

FINK, A. H., T. BRÜCHER, V. ERMERT, A. KRÜGER und J. G. PINTO (2009): The European storm Kyrill 2007: synoptic evolution, meteorological impacts and some considerations with respect to climate change. Natural Hazards and Earth System Sciences **9**, S. 405–423.

FRIEDMAN, J. (2001): Greedy function approximation: A gradient boosting machine. Annals of Statistics **29**, S. 1189–1232.

GARDINER, B., K. BLENNOW, J.-M. CARNUS, P. FLEISCHER, F. INGEMARSON, G. LANDMANN, M. LINDNER, M. MARZANO, B. NICOLL, C. ORAZIO, J.-L. PEYRON, M.-P. Reviron, M.-J. SCHELHAAS, A. SCHUCK, M. SPIELMANN und T. USBECK (2010): Destructive storms in European forests: Past and forthcoming impacts. Final report to European Commission – DG Environment, European Forest Institute.

GREGOW, H., A. LAAKSONEN und M. E. ALPER (2017): Increasing large scale windstorm damage in Western, Central and Northern European forests, 1951–2010. Scientific Reports **7**, 46397.

HANEWINKEL, M., S. HUMMEL und A. ALBRECHT (2010): Assessing natural hazards in forestry for risk management: a review. European Journal of Forest Research **130**, S. 329–351.

HANG, J. und Y. LI (2010): Ventilation strategy and air change rates in idealized high-rise compact urban areas. Building and Environment **45**, S. 2754–2767.

HARTEBRODT, C. (2004) The impact of storm damage on small-scale forest enterprises in the southwest of Germany. Small-scale Forest Economics, Management and Policy **3**, 203–222.

HENEKA, P., T. HOFHERR, B. RUCK und C. KOTTMEIER (2006): Winter storm risk of residential structures – Model development and application to the German state of Baden-Württemberg. Natural Hazards and Earth System Sciences **6**, S. 721–733.

JUNG, C. (2016): High Spatial Resolution Simulation of Annual Wind Energy Yield Using Near-Surface Wind Speed Time Series. Energies **9**, 344.

JUNG, C. und D. SCHINDLER (2016): Modelling monthly near-surface maximum daily gust speed distributions in Southwest Germany. International Journal of Climatology **36**, S. 4058–4070.

JUNG, C. und D. SCHINDLER (2018): Sensitivity analysis of the system of wind speed distributions. Energy Conversion and Management **177**, S. 376–384.

JUNG, C. und D. SCHINDLER (2019): Historical Winter Storm Atlas for Germany (GeWiSA). Atmosphere **10**, 387.

JUNG, C., D. SCHINDLER, A. ALBRECHT und A. BUCHHOLZ (2016): The Role of Highly-Resolved Gust Speed in Simulations of Storm Damage in Forests at the Landscape Scale: A Case Study from Southwest Germany. Atmosphere **7**, 7.

JUNG, C., D. SCHINDLER, A. BUCHHOLZ und J. LAIBLE (2017): Global Gust Climate Evaluation and Its Influence on Wind Turbines. Energies **10**, 1474.

KNOOP, H., F. AMENT und B. MARONGA (2019): A generic gust definition and detection method based on wavelet-analysis. Advances in Science and Research **16**, S. 143–148.

KOHNLE, U., S. GAUCKLER, F. J. RISSE und S. STAHL (2003): Orkan Lothar im Spiegel von Betriebsinventur und Einschlagsbuchführung: Auswirkungen auf einen Forstbezirk im Randbereich des Sturms. Allgemeine Forstzeitschrift – Der Wald **58**, S. 1203–1207.

KUNZ, M. (2007): The skill of convective parameters and indices to predict isolated and severe thunderstorms. Natural Hazards and Earth System Sciences **7**, S. 327–342.

KUNZ, M., J. SANDER und C. H. KOTTMEIER (2009): Recent trends of thunderstorm and hailstorm frequency and their relation to atmospheric characteristics in southwest Germany. International Journal of Climatology **29**, S. 2283–2297.

LIU, L., Y. WEN, Y. LIANG, F. ZHANG und T. YANG (2019): Extreme Weather Impacts on Inland Waterways Transport of Yangtze River. Atmosphere **10**, 133.

MANASSEH, R. und J. H. MIDDLETON (1999): The surface wind gust regime and aircraft operations at Sydney Airport. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics **79**, S. 269–288.

MAYER, H. und D. SCHINDLER (2002): Forstmeteorologische Grundlagen zur Auslösung von Sturmschäden im Wald in Zusammenhang mit dem Orkan „Lothar“. Allgemeine Forst- und Jagdzeitung **173**, S. 200–208.

MEYER, P. (2013): Biodiversität im Wald. Allgemeine Forstzeitschrift – Der Wald **17**, S. 24–25.

MÖLTER, T., D. SCHINDLER, A. ALBRECHT und U. KOHNLE (2016): Review on the projections of future storminess over the North Atlantic European Region. Atmosphere **7**, 60.

MUNICH RE (2019): NatCatSERVICE. https://natcatservice.munichre.com/ (letzter Zugriff am 16. August 2019).

PILORZ, W., I. LASKOWSKI, E. ŁUPIKASZA und M. TASZAREK (2016): Wind Shear and the Strength of Severe Convective Phenomena – Preliminary Results from Poland in 2011–2015. Climate **4**, 51.

QUINE, C. P. und B. A. GARDINER (2007): Understanding how the interaction of wind and trees results in windthrow, stem breakage, and canopy gap formation. *In:* JOHNSON, E. A., K. MIYANISHI (Hrsg.): Plant disturbance ecology. The process and the response. Elsevier Amsterdam, Niederlande.

SCHELHAAS, M.-J., G.-J. NABUURS und A. SCHUCK (2003): Natural disturbances in the European forests in the 19th and 20th centuries. Global Change Biology **9**, S. 1620–1633.

SCHINDLER, D., K. GREBHAN, A. ALBRECHT, J. SCHÖNBORN und U. KOHNLE (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**, S. 57–69.

SCHINDLER, D., C. JUNG und A. BUCHHOLZ (2016): Using highly resolved maximum gust speed as predictor for forest storm damage caused by the high-impact winter storm Lothar in Southwest Germany. Atmospheric Science Letters **17**, S. 462–469.

SCHMIDT, M., M. HANEWINKEL, G. KÄNDLER, E. KUBLIN und U. KOHNLE (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 **40**, S. 1636–1652.

SCHÜEPP, M., H. H. SCHIESSER, H. HUNTRIESER, H. U. SCHERRER und H. SCHMIDTKE (1994): The winterstorm "Vivian" of 27 February 1990: About the meteorological development, wind forces and damage situation in the forests of Switzerland. Theoretical and Applied Climatology **49**, S. 183–200.

WAN, H., X. WANG und V. R. SWAIL (2010): Homogenization and trend analysis of Canadian near-surface wind speeds. Journal of Climate **23**, S. 1209–1225.

WANG, X. L. (2008a): Accounting for autocorrelation in detecting mean-shifts in climate data series using the penalized maximal t or F test. Journal of Applied Meteorology and Climatology **47**, S. 2423–2444.

WANG, X. L. (2008b): Penalized maximal F-test for detecting undocumented mean shifts without trend-change. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology **25**, S. 368–384.

WILSON, J. D. (1984): Determining a topex score. Scottish Forestry **38**, S. 251–256.

WOHLGEMUTH, T., M. HANEWINKEL und R. SEIDL (2019): Windstörungen. *In:* WOHLGEMUTH, T., A. JENTSCH und R. SEIDL (Hrsg.); Störungsökologie. Hauptverlag Bern, Schweiz.

WOOD, S. N. (2003): Thin-plate regression splines. Journal of the Royal Statistical Society: Series B **65**, S. 95–114.

YOUSEFPOUR, R. und M. HANEWINKEL (2016): Climate change and decision-making under uncertainty. Current Forestry Reports **2**, S. 143–149.

Genmarkeranalysen zur Schätzung des adaptiven Potentials von ausgewählten Vorkommen von *Gingko biloba* L. in Deutschland

Georg-August-Universität Göttingen, Fakultät für Forstwissenschaften und Waldökologie,
Abteilung Forstgenetik und Forstpflanzenzüchtung, Büsgenweg 2, 37077 Göttingen, Deutschland

(Mit 2 Abbildungen und 4 Tabellen)

LUDGER LEINEMANN*), WOLF JOHANNES HOFFMANN und OLIVER GAILING

(Angenommen Februar 2020)

DOI-Nummer: 10.23765/afjz0002048

SCHLAGWÖRTER – KEY WORDS

Ginkgo biloba; SSR-Genmarker; genetische Variation.

Ginkgo biloba, SSR markers, genetic variation.

1. EINLEITUNG

Aufgrund aktueller Klimaprognosen kann angenommen werden, dass sich das Ökosystem Wald bedingt durch die Erderwärmung verändern wird. Möglicherweise wird die gegenwärtige Dominanz der Rot-Buche (*Fagus sylvatica* L.) in Mitteleuropa zugunsten von Eichenmischwaldtypen abnehmen (MKULNV, 2015). Zweifel an einer ausreichenden Anpassungsfähigkeit unserer heimischen Waldbaumarten motivieren die Suche nach Alternativen. Darunter befinden sich neben relativ gut bekannten Arten wie Küstentanne oder Robinie auch die Hopfenbuche oder der Tulpenbaum (DE AVILA und ALBRECHT, 2018). Zu den wenig erforschten Exoten gehört *Gingko biloba* L. Im Exotenwald Weinheim wurden bereits mehrere Versuche mit dem ursprünglich aus China stammenden *Ginkgo biloba* L. durchgeführt, um Erkenntnisse zur forstwirtschaftlichen Anbauwürdigkeit zu erhalten (HANISCH et al., 1997). Danach wächst Ginkgo am besten im vollen Licht. In der Wuchsleistung liegt die Baumart eher etwa bei der Buche zweiter Ertragsklasse nach SCHOBER (1995). Waldwachstumskundliche Untersuchungen in Virginia zeigten, dass ein 35-jähriger Bestand eine durchschnittliche Höhe von 11,9 m aufweist (SCHÜTT et al., 1995).

Die bis zu 3300 Jahre alt werdenden Ginkgobäume können sich bis zu einem Alter von etwa 200 Jahren gesund entwickeln. Auch in hohem Alter werden Baumhöhen von 40 m selten überschritten (EBERT, 2001). Das Holz ist dem von Nadelbäumen ähnlich (HOFFMANN, 2018), ist harzfrei und weist eine feine Textur auf. Die Rohdichte variiert je nach Herkunft zwischen 0,3 und

*) Korrespondierender Autor: PD Dr. LUDGER LEINEMANN. Georg-August-Universität, Abt. Forstgenetik und Forstpflanzenzüchtung, Büsgenweg 2, D-37077 Göttingen.
E-Mail: lleinem@gwdg.de