

Modellierung und Projektion von Wintersturmschäden im Klimawandel

Thorsten Zeppenfeld, Matthias Schmidt

Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt

Einleitung

In Deutschland verursachen Winterstürme großflächige Waldschäden, entweder direkt durch Windwurf/-bruch oder indirekt als Wegbereiter für sekundäre Schädigungen wie z. B. Borkenkäferfraß. Ihr hohes Schadpotenzial erreichen Winterstürme aufgrund von hohen Windgeschwindigkeiten, die in einem großräumigen Gebiet auf die Wälder einwirken. Der Klimawandel ändert das Sturmgesehen und das damit einhergehende Schadensaufkommen. Auch wenn es im Bezug auf den Klimawandel bisher keine eindeutigen Indizien für eine Zunahme der Wintersturm-Intensität über Mittel-Europa gibt (MÖLTER et al. 2016, SENEVIRATNE et al. 2021), ist bereits das rezente Sturmgesehen Anlass genug, das Schadensrisikos mit in die Waldbauplanung einzubeziehen.

Das konkrete Schadaufkommen im Bestand bei einem Winter-Sturmereignis ist Resultat einer komplexen Wirkungskette. Ausschlaggebend sind Windböen, deren physikalische Energie den Baum brechen oder umwerfen. Die Stärke der Windböen ist von maßstabübergreifenden Faktoren abhängig. Druckunterschiede über dem Nord-Atlantik bestimmen die Energie, die der Wintersturm aufs Festland trägt. Die regionale Orographie differenziert exponierte und geschützte Lagen und lokale Unterschiede in der Oberflächenrauigkeit können zum Beispiel zu Turbulenzen führen.

Darüber hinaus führt der Klimawandel auch zu einer Veränderung der Wachstumsbedingungen und beeinflusst somit die Vulnerabilität der Bäume. Gleichzeitig ergibt sich aus den säkularen Schadflächen der vergangenen Jahre ein großer Beratungsbedarf was den Umbau hin zu einem klimastabilen Wald angeht, insbesondere hinsichtlich der Baumartenwahl. Bei solchen waldbaulichen Entscheidungen können klimasensitive Modelle helfen, indem sie auf breiter empirischer Basis räumlich explizite Sturmschadenswahrscheinlichkeiten standorts- und bestockungssensitiv quantifizieren.

Sturmschadensmodellierung

Ein etabliertes statistisches Modell zur Quantifizierung von Sturmschadenswahrscheinlichkeiten auf Einzelbaumbasis wurde von SCHMIDT et al. (2010) entwickelt. Das Modell zeichnet sich dadurch aus, dass es anhand einer aussergewöhnlich großen Datenbasis parametrisiert worden ist. Nach dem Wintersturmereignis Lothar 1999 wurden in Baden-Württemberg bei der Bundeswaldinventur (BWI II) auf einem verdichteten Probenahmernetz (2×2 km) zusätzlich zu den Standarderfassungen alle Einzelbaumschäden aufgenommen, die durch den Orkan Lothar verursacht worden waren. Dies resultierte in einem Datensatz, der mehr als 63000 Einzelbaumdaten enthält von denen mehr als % als geschädigt erfasst wurden. Die Beobachtungen waren gemäß des BWI Probenahmeverfahrens hierarchisch organisiert: die Aufnahmen fanden auf ein bis vier Traktecken (150×150 m) statt, die wiederum auf den Trakten des Probenahmernetzes angeordnet sind.

Die Sturmschadenswahrscheinlichkeit für einen Einzelbaum i wurde mittels einer logistischen Regression über ein Generalisiertes Additives Modell (GAM) beschrieben:

$$y_i \sim \text{Bernoulli}(p_i)$$

$$p_i = \frac{\exp(\eta_i)}{1 + \exp(\eta_i)} \quad (\text{logit link-Funktion})$$

$$\eta_i = \mathbf{x}_i^T \boldsymbol{\beta} + f(\text{east}_i, \text{north}_i)$$

Die Schadenswahrscheinlichkeit p_i wurde als Parameter einer Bernoulli Zufallsvariable mit einem Set an Kovariablen \mathbf{x}_i und den jeweiligen Regressionskoeffizienten $\boldsymbol{\beta}$ modelliert. Zu den Kovariablen zählten: Baumartgruppe, Baumhöhe als $\log(h)$ und Brusthöhendurchmesser als $\log(\text{bhd})$ in Interaktion mit der Baumartgruppe, Bodenwasserkategorie und vier verschiedene Summen aus jeweils zwei topographischen Indizes Topex.

Zu dem Zeitpunkt der Modellentwicklung standen SCHMIDT et al. (2010) keine geeigneten Informationen über die Böengeschwindigkeiten während des Sturmereignisses zur Verfügung. Dementsprechend konnte diese direkte Schadursache nicht explizit als Erklärgröße in das Modell aufgenommen werden. Stattdessen wurde ein räumlich strukturierter Effekt als Proxy für die Böengeschwindigkeit modelliert. Dazu wurde ein zwei-dimensionaler, isotropischer Glättungsterm über die Raumkoordinaten mit in das GAM aufgenommen: $f(\text{east}_i, \text{north}_i)$.

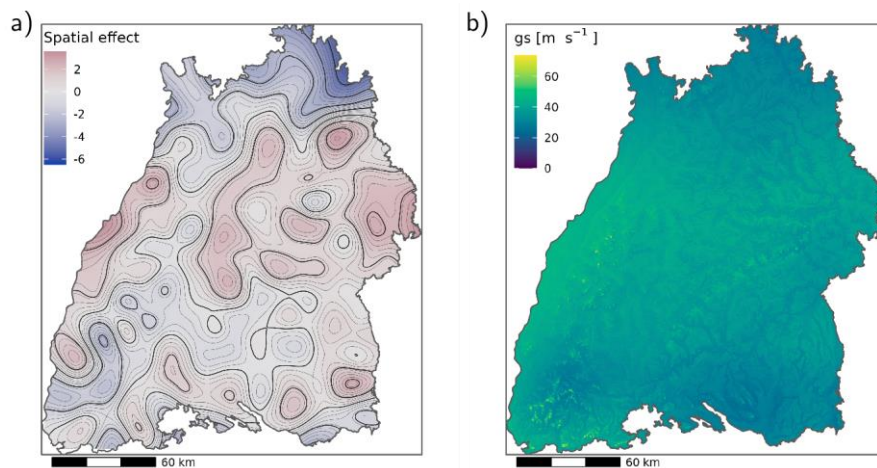


Abbildung 1: Räumlicher Vergleich zwischen dem a) räumlich strukturierten Effekt aus dem Sturmschadensmodell von Schmidt u. a. (2010) und b) der maximalen Böengeschwindigkeit (gs) in $m s^{-1}$ für das Sturmereignis 'Lothar' 1999 auf der Fläche Baden-Württembergs.

Diese Glättungsoberfläche bildet großräumige Schadenscluster mit Durchmessern bis zu 100 km sehr gut ab (Abbildung 1a). Allerdings ist nicht bekannt, was genau zu den räumlichen Mustern in der Glättungsoberfläche führt bzw. inwieweit auch andere, räumlich-korrelierte Größen über den Effekt erfasst werden. Zusätzlich war es in der Modellparametrisierung numerisch nicht möglich, gleichzeitig den Glättungsterm und die Gruppeneffekte auf Ebene eines Trakts j und einer Traktecke k plausibel abzuschätzen.

JUNG u. SCHINDLER (2019) haben für Deutschland maximale Böengeschwindigkeiten der 98 Wintertürme des Zeitraums 1989-2018 in einer räumlichen Auflösung von $25 \times 25 m$ modelliert. Somit steht jetzt die direkte Schadursache explizit als Prädiktor zur Verfügung und muß nicht mehr implizit durch den Proxy Glättungsoberfläche modelliert werden. Durch die feine Differenzierung der Böengeschwindigkeit (Abbildung 1b) kann die kleinräumige Heterogenität erfasst werden was mit der Glättungsoberfläche nicht der Fall war. Zudem ermöglicht dies nun einen vollparametrischen Modellansatz, in dem mittels eines Generalisierten Linearen Gemischten Modells (GLMM) zusätzlich zu den Effekten der kausalen Kovariablen, auch Gruppeneffekten auf Ebene der Trakt- und Traktecken (u und v) geschätzt werden können und somit die Abhängigkeiten der Beobachtungen berücksichtigt werden:

$$\eta_i = \mathbf{x}_i^T \boldsymbol{\beta} + u_i + v_i$$

$$u_j \sim \text{Normal}(0, \sigma_u^2)$$

$$v_{j,k} \sim \text{Normal}(0, \sigma_v^2)$$

Der Kovariablenvektor \mathbf{x}_i umfasst: Baumartgruppe, $\log(h)$ und $\log(bhd)$ in Interaktion mit Baumartgruppe, Bodenwasserkategorie, drei verschiedene Summen aus jeweils zwei topographischen Indizes Topex und die quadrierte maximale Böengeschwindigkeit (engl. gust speed) gs^2 . Die Böengeschwindigkeit gs geht im Quadrat in den Modelleffekt ein, da in der physikalischen Fluidodynamik der Strömungswiderstand proportional zur Strömungsgeschwindigkeit im Quadrat ist. Zwei der ursprünglich vier Topex Summen wiesen eine hohe Korrelation auf. Beide spannten einen weiten Winkel auf, leicht zu- bzw. abgewandt zur Hauptsturmrichtung. Diese wurden im Rahmen der erneuten Modellselektion durch eine Topex Summe ersetzt, die orthogonal zur Sturm-Windrichtung ausgerichtet ist.

Das Modell wurde mit dem Bayesianischen Ansatz formuliert und parametrisiert. Für die Koeffizienten der Kovariablen wurde eine schwach informierte Priori-Verteilung ($\text{Normal}(0, \sigma = 5)$) und für die Varianzen der Parameter auf Gruppenebene, σ_u^2 und σ_v^2 , wurde die Verteilung half Student-t(3,5) angenommen.

Anwendungen

Transekt durch Niedersachsen

Die Wirkweise des neuen Modellansatzes soll anhand einer Anwendung auf ein Transekt durch Niedersachsen veranschaulicht werden (Abbildung 2).

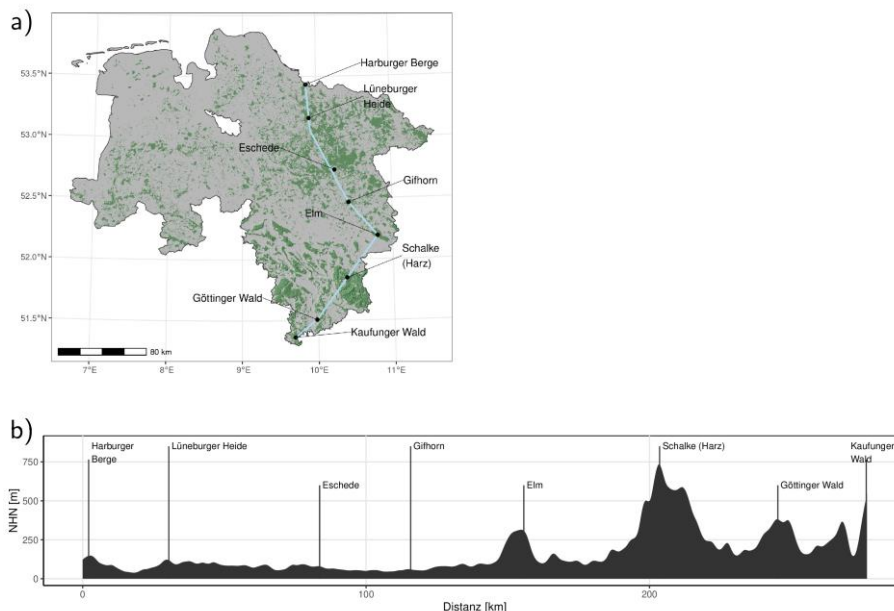


Abbildung 2: a) Lage und b) Höhenprofil des Transektes durch Niedersachsen

Hierbei soll ein Schwerpunkt auf die Projektionen vor dem Hintergrund des Klimawandels gelegt werden. Das Sturmschadensmodell umfasst zwei klimasensitive Bestandteile: die Böengeschwindigkeit und die Dendrometrie. Die Böengeschwindigkeiten sind von JUNG u. SCHINDLER (2021) für die Szenarien RCP 4.5 und RCP 8.5 auf Basis des EURO-CORDEX Klimamodellensembles bis 2099 projiziert worden.

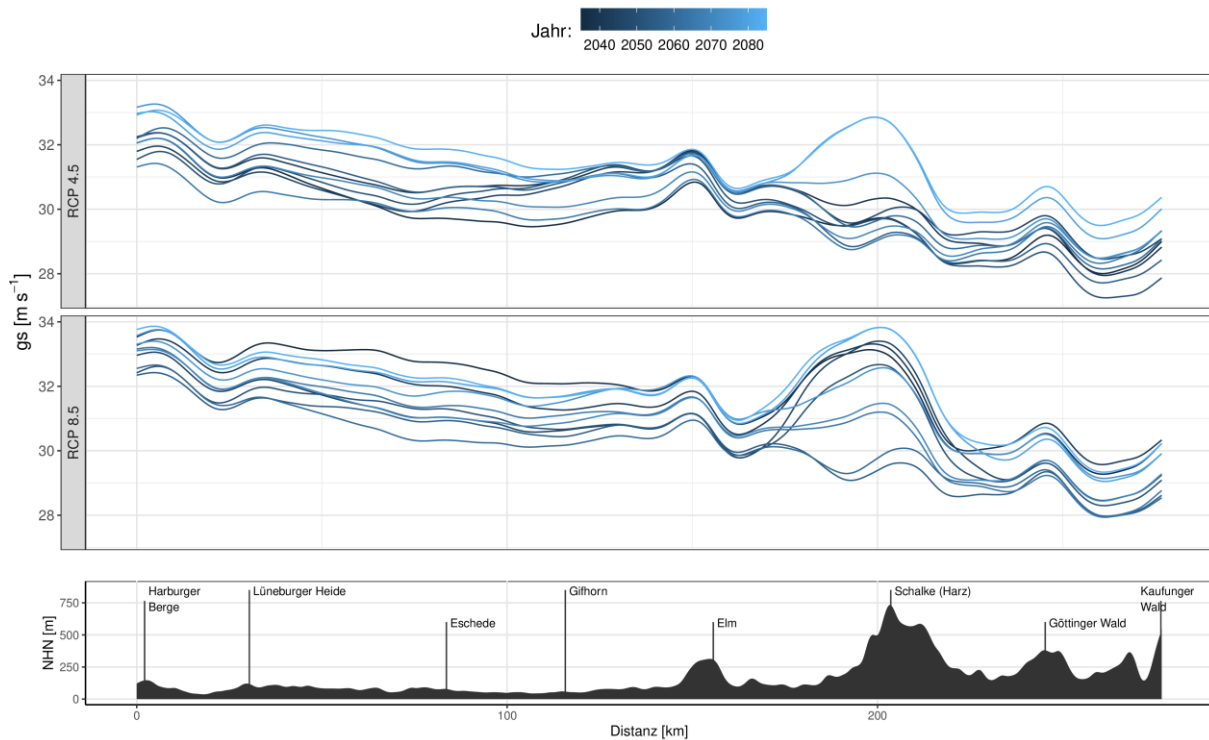


Abbildung 3: Maximale Böengeschwindigkeiten (gs) [$m s^{-1}$] nach JUNG u. SCHINDLER (2021) entlang des Transektes als gemittelte Projektionen aus den Klimäläufen des EURO-CORDEX Ensembles (Szenarien RCP 4.5 und RCP 8.5). Jede Linie stellt ein 30-jähriges Mittel aus dem Zeitraum 2020-2099 dar, wobei hellere Blautöne spätere Mittel anzeigen.

Betrachtet man diese Projektionen für den Transekt (Abbildung 3), so kann man für Niedersachsen eine geringe gerichtete Zunahme der maximalen Böengeschwindigkeiten bis zum Ende des Jahrhunderts erkennen. Diese Zunahme ist im Szenario RCP 4.5 über den ganzen Transektverlauf und im Szenario RCP 8.5 nur im Bereich des Harzes zu erkennen. Innerhalb eines Szenarios beträgt die Amplitude der 30-jährigen Mittel meist $2 m s^{-1}$ und maximal $4 m s^{-1}$ im Bereich des Harzes ("Schalke" bei Distanz 200 km). Auch im Vergleich der beiden Klimaszenarien unterscheiden sich die Böengeschwindigkeitsverläufe um bis zu $4 m s^{-1}$ mit den leicht höheren Werten in dem Szenario RCP 8.5.

Die dendrometrischen Größen Grundflächenmittelstamm D_g und dessen Höhe H_g wurden mittels klimasensitiver Standort-Leistungs-Modelle (SCHMIDT 2020, SCHICK 2022) und invertierter Höhen-Durchmesser Kurven (SCHMIDT 2009) berechnet. Hierbei lagen den Projektionen für die Periode 2020-2100 Temperatur- und Niederschlagsdaten aus sieben Läufen des ReKliEs-De Kernensembles (WARRACH-SAGI et al. 2018) RCP 8.5 zu Grunde.

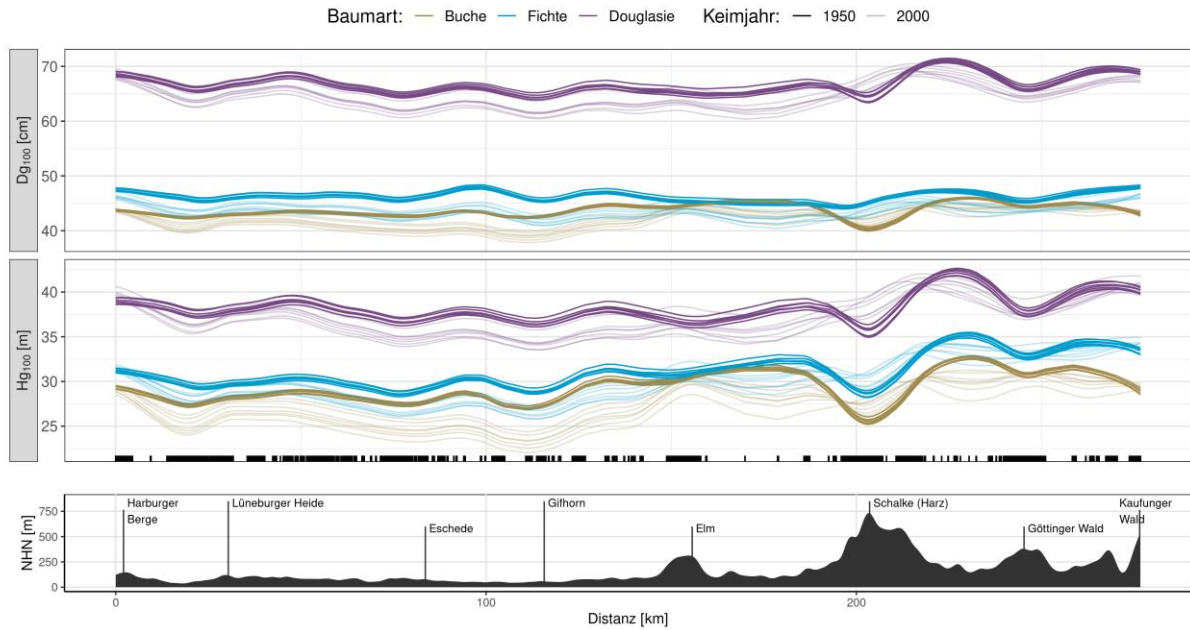


Abbildung 4: Durchmesser (Dg_{100}) und Höhe (Hg_{100}) des Grundflächenmittelstamms im Alter 100 entlang des Transektes. Dargestellt sind Modellbestände von Buche, Fichte und Douglasie mit dem Keimjahr 1950 bzw. Keimjahr 2000 (halbtransparent). Den einzelnen Linien liegen jeweils einer der sieben Klimamodellläufe des Ensembles ReKliEs-De (RCP 8.5) zu Grunde. Die Verläufe wurden mit einer Spline-Funktion geglättet. Markierungen entlang der x-Achse zeigen die bewaldeten Bereiche für die Schätzwerte vorlagen.

Über den ganzen Transektverlauf hinweg zeigt die Douglasie die mit Abstand höchsten Hg_{100} - und Dg_{100} -Werte im Alter 100, gefolgt von Fichte und Buche (Abbildung 4). Die Variabilität zwischen den verschiedenen Klimäläufen ist für die Modellbestände mit dem Keimjahr 1950 gering, da die Projektion erst ab 2020 auf den Klimaprojektionen basiert. Für die Bestände mit dem Keimjahr 2000 sieht man eine deutliche Aufspaltung (v. a. der Hg_{100}) aufgrund der Klimäläufe. Insgesamt liegen in den meisten Bereichen des Transektes die Wachstumsprojektionen der Bestände mit dem Keimjahr 1950 über denen, die 2000 begründet worden sind. Ausnahme bildet hier der Harz ("Schalke" bei Distanz 200 km).

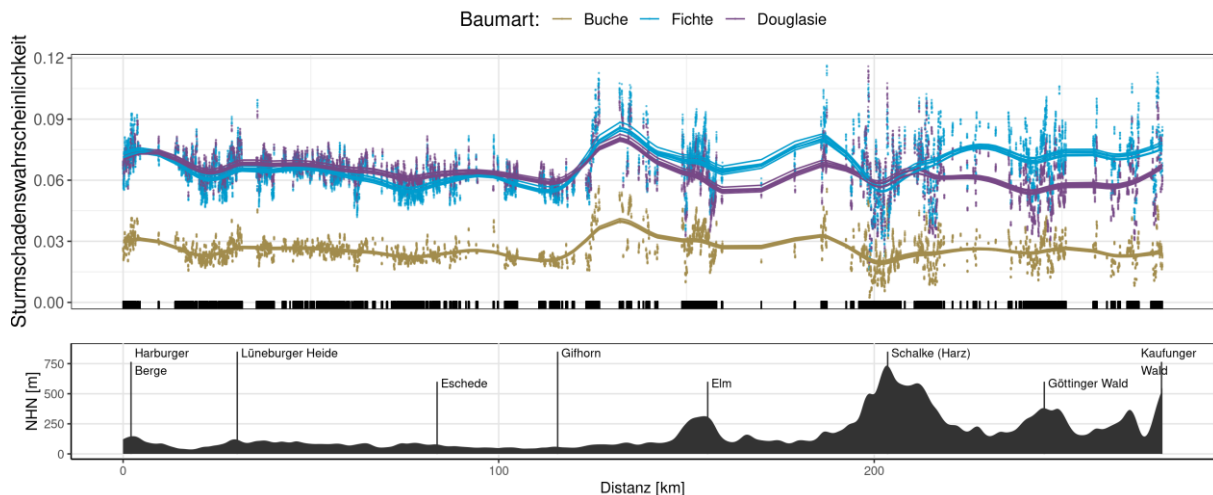


Abbildung 5: Sturmschadenswahrscheinlichkeiten entlang des Niedersachsen-Transektes für 100-jährige Modellbestände aus Douglasie, Fichte und Buche (Keimjahr 1950). Der Modellrechnung liegen maximale Böengeschwindigkeiten für ein 20-jähriges Winter-Sturmereignis in der Periode 2069-2099 (RCP 8.5) zu Grunde. Linien markieren den Verlauf einer Glättungsfunktion der unterlegten Punktschätzer.

Die Sturmschadenswahrscheinlichkeiten der beiden Nadelbaumarten Fichte und Douglasie liegen in der ersten Hälfte des Transektes (Tiefland) auf einem ähnlich hohen Niveau (Abbildung 5), das im Vergleich zur Buche mehr als doppelt so hoch ist. Bei gleicher Dendrometrie bzw. gleichen Dimensionen schätzt das Modell eine höhere Schadenswahrscheinlichkeit für die Fichte als für die Douglasie. Hier führt aber die größere Baumhöhe der Douglasie im Alter 100 dazu, dass sie eine leicht höhere Sturm-schadensgefährdung aufweist. Ab dem Bereich des nördlichen Harzvorlandes (*“Elm”* bei Dis-tanz 150 km) und der darauf folgenden Mittelgebirgsschwelle ändert sich dieses Muster und die Fichte zeigt die höchsten Sturmschadenswahrscheinlichkeiten. Im Bereich des Harz (*“Schalke”* bei Dis-tanz 200 km) ist ein lokales Minimum der Sturmgefährdung auszumachen, wenn man die Glättungs-funktion betrachtet. Einzelne Punktschätzer (v. a. von Fichte und Douglasie) weisen dahingegen recht hohe Werte auf, diese exponierten (Hoch-)Lagen sind aber flächenmäßig weniger stark vertreten als geschützte Hang- oder Tallagen.

Zusammenfassung

Die dargestellte neue Generation eines statistischen Sturmschadensmodells beinhaltet den Effekt der räumlich hoch-aufgelösten Information über die maximale Böengeschwindigkeit. Dadurch wird die direkte physikalische Schadenursache berücksichtigt und muss nicht mehr über einen Proxy wie die räumliche Glättungsfläche modelliert werden. Das verwendete Böenfeld kann das Sturmgesehe-nen der Zukunft unter Verwendung von Klimamodellläufen verschiedener Emissionsszenarien projizie-ren. Auf dem dargestellten Transekt durch Niedersachsen ist die Variabilität der Böengeschwindigkeit im Verlauf der Zeit und zwischen den Klimaszenarien mit $2 - 4 \text{ m s}^{-1}$ relativ gering. Die räumliche Heterogenität der Wirkgröße Böengeschwindigkeit fließt aber in die Projektion der Sturmschadensge-fährdung ein. Diese Heterogenität konnte mit der Glättungsfläche des Vorgängermodells nur sehr grob auf Landschaftsebene berücksichtigt werden.

Eine wesentliche Klimasensitivität gewinnt das Sturmschadensmodell durch die Kopplung mit Stand-ort-Leistungs-Modellen über die Projektion der baumartenspezifischen Dendrometrie. Die Änderung der Wachstumsverhältnisse in zukünftigen Klimaerwartungen ist dadurch nicht nur aus Sicht der er-tragskundlichen Leistung sondern auch aus der Perspektive der Sturmgefährdung quantifizierbar. Diese Projektionen sind ein wichtiger Bestandteil in der umfassenden multikriteriellen Baumartenbe-wertung und -wahl im Waldumbau unter Klimawandel.

Literatur

- JUNG, C.; SCHINDLER, D. (2019): Historical Winter Storm Atlas for Germany (GeWiSA). *Atmosphere* 10(7): 387.
- JUNG, C.; SCHINDLER, D. (2021): Does the winter storm-related wind gust intensity in Germany increase under warming climate? – A high-resolution assessment. *Weather and Climate Extremes* 33: 100360. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2021.100360>
- MÖLTER, T.; SCHINDLER, D.; ALBRECHT, A.T.; KOHNLE, U. (2016): Review on the Projections of Future Stor-miness over the North Atlantic European Region. *Atmosphere* 7(4): 60. <https://doi.org/10.3390/at-mos7040060>
- SCHICK, J. (2022): Neuparametrisierung standortsentiver Bonitätsfächer wichtiger Baumarten unter Be-rücksichtigung von konzeptionellen Verbesserungen und erweiterten Datengrundlagen. In: Deut-scher Verband Forstlicher Forschungsanstalten. Sektion Ertragskunde. Jahrestagung 12.-14. Sep-tember 2022, Rendsburg.

- SCHMIDT, M. (2020): Standortensitive und kalibrierbare Bonitätsfächer: Wachstumspotenziale wichtiger Baumarten unter Klimawandel. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 190(5/6): 136–160.
- SCHMIDT, M. (2009): Ein longitudinales Höhen-Durchmesser Modell für Fichte in Deutschland. In: Beiträge zur Jahrestagung 2009. DVFFA – Sektion Ertragskunde, Ascona.
- 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 of 1999 in southwestern Germany. *Canadian Journal of Forest Research* 40(8): 1636–1652. <https://doi.org/10.1139/X10-099>
- SENEVIRATNE, S.I.; ZHANG, X.; ADNAN, M.; BADI, W.; DEREZYNSKI, C.; DI LUCA, A.; GHOSH, S.; ISKANDAR, I.; KOSIN, J.; LEWIS, S.; OTTO, F.; PINTO, I.; SATOH, M.; VICENTE-SERRANO, S.M.; WEHNER, M.; ZHOU, B. (2021): Weather and Climate Extreme Events in a Changing Climate. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* Cambridge University Press, 1513–1766 <https://doi.org/10.1017/9781009157896.013>
- WARRACH-SAGI, K.; MOHR, V.; WULFMEYER, V. (2018): High Resolution WRF Simulations for Climate Change Studies in Germany. In: Nagel W.E., Kröner D.H., Resch M.M. (Hrsg.), *High Performance Computing in Science and Engineering ' 17*. Springer International Publishing, Cham, S. 431–440. https://doi.org/10.1007/978-3-319-68394-2_25