

Ein klimasensitives, autoregressives Modell zur Beschreibung der Einzelbaum-Mortalität

Sebastian Schoneberg, Jürgen Nagel und Matthias Schmidt
Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt, Abteilung Waldwachstum, Göttingen

Zusammenfassung

Der Beitrag beschreibt einen hierarchischen Modellansatz zur Prognose der risikobedingten Baum mortalität auf Einzelbaumebene. Die Besonderheit des Modellansatzes besteht darin, dass neben zwei Witterungsparametern Schätzungen für wichtige biotische und abiotische Risiken als Kovariablen verwendet werden. Der Vorteil dieses hierarchischen Vorgehens besteht darin, dass die in einem ersten Schritt zur Schätzung der unterschiedlichen Einzelrisiken verwendeten Teilmodelle auf Basis der optimalen jeweils verfügbaren Datengrundlagen entwickelt wurden. In den Einzelmodellen werden die Effekte verschiedener Kovariablen plausibel und mit hoher Sensitivität abgebildet. Die prognostizierten Einzelrisiken erlauben somit eine quantitative Einschätzung der Vulnerabilität der Baumarten als Funktion von Standort und waldbaulichem Handeln. Die Einzelrisiken umfassen eine Befallswahrscheinlichkeit durch rindenbrütende Borkenkäfer an Fichte, eine Kahlfraßwahrscheinlichkeit durch die Nonne (*Lymantria monacha* L.) an Kiefer und eine Sturmschadenswahrscheinlichkeit durch Winterstürme für die wichtigsten Wirtschaftsbaumarten. Für die Prognose von repräsentativen, bestockungs- und standortsensitiven Überlebenszeiten sind die abstrakten Risiken jedoch wenig geeignet. Zu diesem Zweck wird in einem zweiten Schritt ein Überlebenszeitmodell auf der Basis der Waldzustanderhebungen aus 6 norddeutschen Bundesländern entwickelt. Dabei erlaubt die verwendete Methodik eines zeitdiskreten logistischen Regressionsmodells die Abbildung von Effekten zeitveränderlicher Kovariablen. Durch diese Vorgehensweise können Effekte des projizierten Klimawandels und des Baumwachstums bzw. der zugehörigen dynamischen Parametervektoren direkt, d.h. hoch aufgelöst abgebildet werden.

Summary

A hierarchical model approach for risk influenced tree mortality, resolved on single tree level is investigated in this study. Here, time-varying covariates can be used. Realistic statements for the climate change and tree dimension are thereby possible. In the first step, data with high event numbers are used to model the influence of covariables on certain mortality types (Storm, *Ips typographus* L., *Lymantria monacha* L.). But these models are useless for representative statements. Therefore, in the second step, a representative data set is used, including first step risks as covariables. By this model approach stable statements for the tree mortality are realized.

Einleitung

Mortalität spielt bei der Waldentwicklung eine herausragende Rolle. Das Verständnis von Prozessen, die die Mortalität beeinflussen ist, daher aus ökologischer und ökonomischer Sicht sehr wichtig. Mortalität ist intensiv untersucht worden, insbesondere mit dem Fokus auf den Klimawandel (z. B. ARAÚJO und WILLIAMS, 2000; HANSEN et al., 2001; IVERSON und PRASAD, 2001; YANG et al., 2003; SEIDL et al., 2007, 2011; ALLEN et al., 2010; BLENNOW et al., 2010; HANEWINKEL et al., 2010, 2013; RIGLING et al., 2013; NOTHDURFT, 2013; NEUNER et al., 2015; DURSKY, 1997; HÜLSMANN et al., 2016).

Da die risikobedingte Mortalität an Bäumen ein selten auftretendes Ereignis (Event) ist, ist ihre Modellierung schwierig (STAUPENDAHL und ZUCCHINI, 2011; NOTHDURFT, 2013; NEUNER et al., 2015). Die Modellierung von Mortalität auf Grundlage von Datensätzen, bei denen viele Events zu erwarten sind, ist deutlich einfacher (OVERBECK und SCHMIDT, 2012; SCHMIDT et al., 2010), allerdings ist hier eine räumlich und zeitliche repräsentative Aussage schwierig. In dieser Studie sollen beide Ansätze kombiniert werden;

zunächst werden die Modelle auf Grundlage von Datensätzen entwickelt, an denen relativ viele Events aufgetreten sind. Hier ist das Abbilden der Effekte von Kovariablen gut möglich. In einem zweiten Schritt werden die im ersten Schritt geschätzten Risiken als Kovariablen für ein Modell auf Grundlage eines räumlich und zeitlich repräsentativen Datensatzes verwendet, hierdurch sind dann entsprechend repräsentative Beschreibungen möglich.

Durch den Klimawandel wird die Forstwirtschaft vor neue Herausforderungen gestellt. Forstliche Managementmaßnahmen müssen angepasst werden. Unter anderem kann die Baumdimension durch solche Maßnahmen beeinflusst werden. Ein Verständnis der Auswirkungen des Klimawandels und der Managementmaßnahmen auf die Stabilität der Wälder ist ein grundlegendes Kriterium für eine nachhaltige Anpassung der forstlichen Maßnahmen. Daher ist das Ziel dieser Studie die Entwicklung eines klimasensitiven Ereigniszeitmodells für die risikobedingte Baum mortalität, bei der die Baumdimension berücksichtigt wird. Viele Kovariablen, die einen potentiell erheblichen Einfluss auf die Baum mortalität haben, konnten nicht beobachtet werden, wie z. B. das räumliche und zeitliche Auftreten von Stürmen. Die Nicht-Berücksichtigung solcher Kovariablen im Modell kann dazu führen, dass auch andere Kovariablen nicht unverzerrt abgebildet werden können. Daher soll der Effekt solcher unbeobachteten Kovariablen durch die Modellierung der Kovarianzstruktur berücksichtigt werden.

Material und Methoden

Die wichtigste Datengrundlage stellen die Daten der Waldzustanderhebung (WZE) zwischen 1984 und 2015 der Bundesländer Hessen (HE), Niedersachsen (NI), Schleswig-Holstein (SH), Brandenburg (BB), Mecklenburg-Vorpommern (MV) und Sachsen-Anhalt (ST) dar. In einigen Regionen wurde die Inventur erst später etabliert. In ST, MV und BB hat die Inventur 1991 begonnen, in SH ist das Inventurdesign erst ab 1996 mit dem der anderen Bundesländer vergleichbar. Neben dem Kronenzustand wird dokumentiert, ob ein Baum seit der letzten Beobachtung gestorben ist. Der binäre Baumstatus (lebend/tot) stellt die Zielvariable dieser Arbeit dar. Eine Besonderheit der Inventur ist die hohe zeitliche Auflösung, häufig werden die Bäume jährlich untersucht. In dieser Studie werden die vier wichtigsten Baumartengruppen in Norddeutschland untersucht. Fichte (*Picea spec.*), Buche (*Fagus spec.*), Eiche (*Quercus spec.*) und Kiefer (*Pinus spec.*). Baumarten mit einem a priori ähnlichen Wachstums- und Mortalitätsverhalten werden zu Baumartengruppen zusammengefasst; Fichte: *Picea abies* (Karst.), *Picea sitchensis* (Bong.), Buche: *Fagus sylvatica* (L.), Eiche: *Quercus robur* (L.), *Quercus petraea* (Matt.), Kiefer: *Pinus sylvestris* (L.). Die Kiefer spielt in den trockenen Gebieten des Tieflands eine wichtige Rolle, während die Wälder in den Mittelgebirgen durch Buchen und Fichten geprägt sind.

Insgesamt stehen 728 786 Beobachtungen von 69 914 Bäumen zur Verfügung. Die Bäume stammen von 2 452 Probeflächen. Dabei besteht ein Plot aus vier Quadranten, an ausgehend von den Mittelpunkten der Quadranten werden jeweils zwischen 6 und 8 räumlich nächster Bäume untersucht.

Betrachtet man Abbildung 1, so erkennt man, dass der Anteil an Events aufgrund von abiotischen Ursachen für alle betrachteten Baumartengruppen deutlich durch die drei schweren Winterstürme „Vivian“, „Wiebke“ und „Kyrill“ beeinflusst werden. Das trockene Jahr 2003 hat offensichtlich kaum einen Einfluss auf den abiotischen Eventanteil. Der biotische Eventanteil steigt nach den schweren Winterstürmen und dem trockenen Jahr 2003 deutlich an. Auch räumlich unterscheiden sich die Eventanteile deutlich, in Hessen sind die höchsten Eventanteile beobachtet worden.

Kovariablen

Als Kovariablen stehen die Baumart, die Baumdimension, Klimavariablen sowie Bodeneigenschaften an den WZE-Probeflächen zur Verfügung. Die Baumdimension wird durch den Baumdurchmesser in 1.3 m

(BHD) und die Baumhöhe beschrieben. Diese beiden Kovariablen liegen allerdings nicht für jede WZE-Aufnahme vor. Weiterhin liegt für das gesamte Untersuchungsgebiet ein digitales Oberflächen Modell (DOM) vor, aus dem die Höhe über dem Meeresspiegel (HNN) an den WZE Probeflächen abgeleitet werden kann. Das DOM soll genutzt werden, um die Windexponiertheit eines Standortes zu beschreiben. Hierfür ist zusätzlich die Windrichtung wichtig. Die Windrichtung ist jedoch auf den WZE-Probeflächen nicht aufgenommen worden, sie liegt aber im Untersuchungsgebiet an Stationen des deutschen Wetterdienstes vor. Es liegen also nicht alle Kovariablen an den WZE-Probeflächen vor (Windrichtung) bzw. manche Kovariablen liegen nicht in der Auflösung vor, in der die Zielvariable vorliegt. Daher werden zunächst Modelle für die Kovariablen vorgestellt.

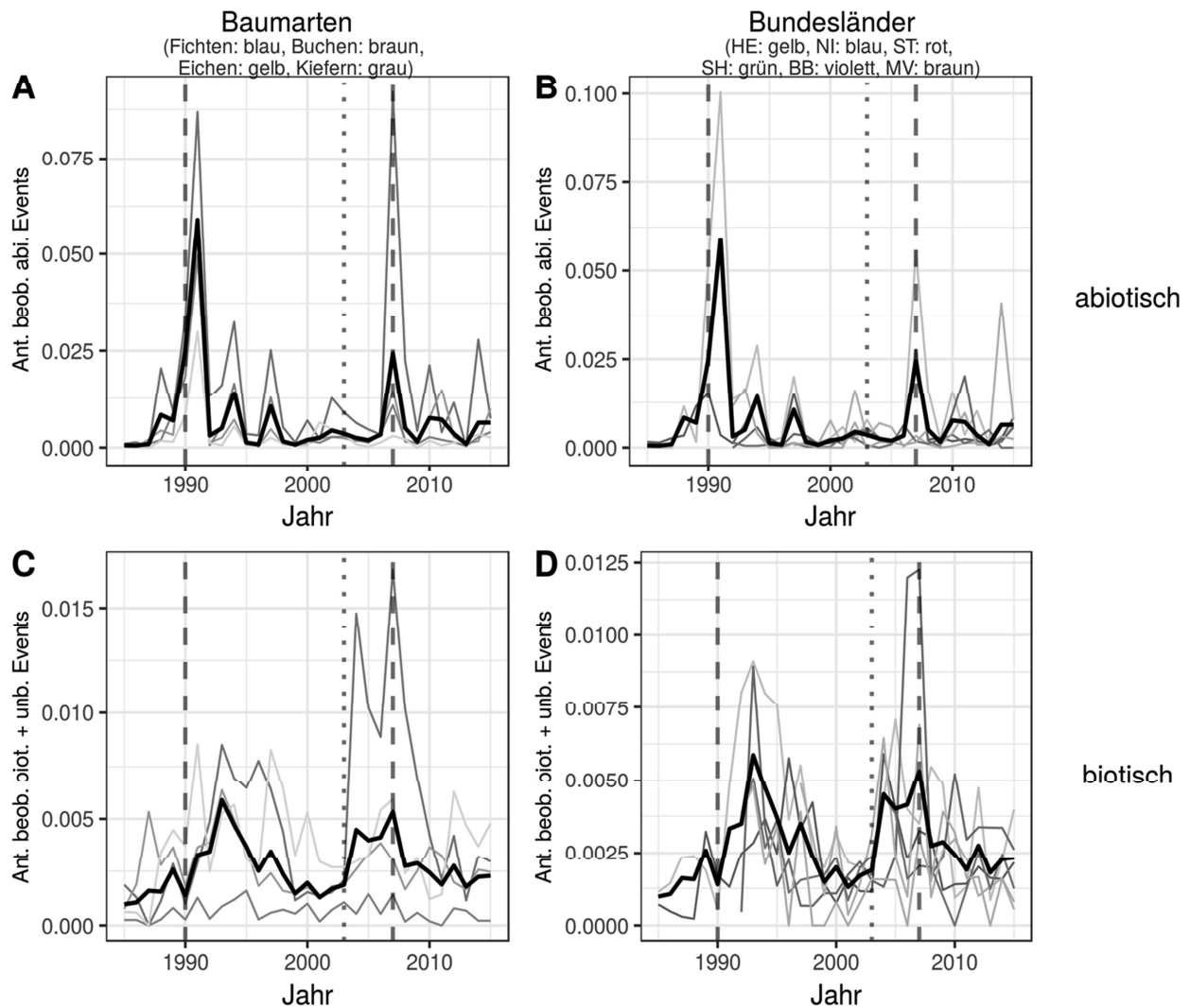


Abbildung 1 Die zeitliche Verteilung der beobachteten Events nach Baumarten (A und C) und Bundesländern (B und D). Es wird zwischen abiotischen (A und B) und biotischen (C und D) Events unterschieden. Events unbekannter Ursache werden zu den biotischen Events gezählt. Die schwarzen Linien stellen die mittleren Anteile dar. Zusätzlich sind in der Grafik die Jahre, in denen die schweren Winterstürme „Vivian“, „Wiebke“ und „Kyrill“ stattgefunden haben (gestrichelte Linien), sowie das Jahr 2003, welches sich durch eine extreme Trockenheit auszeichnet hat (gepunktete Linie), hervorgehoben.

Windrichtung

Die Windrichtung von Starkwindereignissen ist an Stationen vom deutschen Wetterdienst (DWD) erfasst worden. In der Abbildung 2 ist die räumliche Verteilung der Windrichtung sowie die Windrichtung in Abhängigkeit von der HNN dargestellt. Es ist zu erkennen, dass der Wind hauptsächlich aus Südwest kommt. Weiterhin erkennt man eine schwache räumliche Autokorrelation. Desweiteren erkennt man, dass der Wind ab einer Höhe von über 500 m etwas weiter aus dem Norden kommt.

Die Windrichtungen wurden basierend auf einer von-Mises-Verteilung

$$f(y | \mu, \kappa) = \frac{1}{2\pi I_0(\kappa)} \exp(\kappa \cos(y - \mu))$$

modelliert. Es wurde der Lokalisationsparameter durch ein strukturiertes additives Regressionsmodell

$$\mu = f_{HNN}(HNN) + f_{sp}(RW, HW)x'\beta$$

modelliert, wobei RW und HW die Koordinaten der DWD-Station bezeichnen.

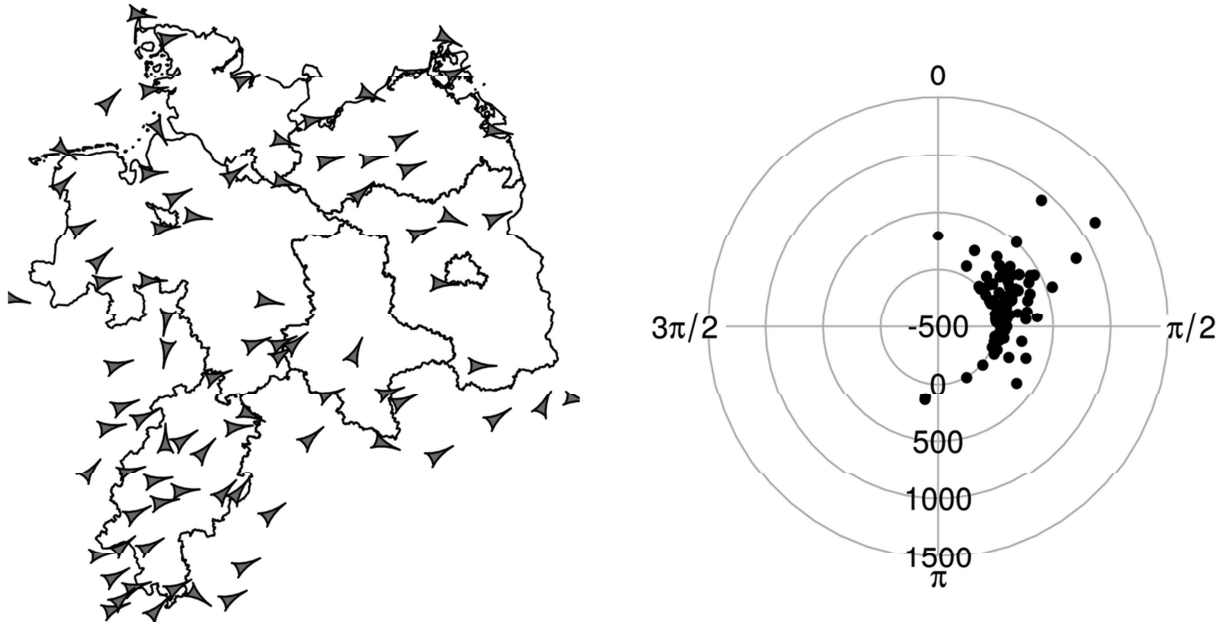


Abbildung 2: Mittlere Windrichtungen der einzelnen DWD-Stationen über den gesamten Untersuchungszeitraum (1984-2013). Links ist die räumliche Verteilung der Windrichtungen dargestellt. Rechts ist die Windrichtung in Abhängigkeit von der Höhe über dem Meeresspiegel dargestellt.

Baumdimension

Die Baumdimension wird in dieser Arbeit durch den BHD und die Baumhöhe beschrieben. Wie bereits beschrieben liegt die Baumdimension nicht für jede WZE-Beobachtung vor. Um den Einfluss der Baumdimension auf die risikobedingte Mortalität abbilden zu können, wird zunächst ein Modell benötigt, mit dem die Baumdimension für jede WZE-Aufnahme modelliert werden kann.

Überwiegend wurden mehr BHDs zu unterschiedlichen Zeitpunkten an den Bäumen gemessen. Da die Messung der Baumhöhe deutlich aufwendiger ist, liegen in der Regel nur zu einem Zeitpunkt auf einer Probefläche Baumhöhenmessungen vor. Hierdurch entsteht für den BHD eine räumlich geklusterte longitudinale Datenstruktur und für die Baumhöhe eine räumlich geklusterte Datenstruktur.

Für den BHD (in Abhängigkeit von dem Baumalter) wurde schließlich ein hierarchisches gemischtes nichtlineares Modell ausgewählt. Die Parameter wurden teilweise durch Zufallseffekte auf Probeflächen- und Bauebene modelliert. Für die Baumhöhe (in Abhängigkeit vom BHD) wurde ein nichtlineares gemischtes Modell. Die Parameter wurden teilweise auch hier durch Zufallseffekte auf Probeflächenebene modelliert. Die Modellselektion erfolgte auf der Grundlage des AICs.

Vormodellierte Risiken

An Datensätzen, an denen viele Events beobachtet worden sind und die Events durch ein bestimmtes Ereignis (zum Beispiel einen Sturm) beschrieben werden kann, wurde die Auftrittswahrscheinlichkeit der Events modelliert. Hierdurch erhält man abstrakte Risiken, in unterschiedlicher räumlicher und zeit-

licher Auflösung. Eine repräsentative Aussage (für das Untersuchungsgebiet für einen bestimmten Zeitraum) ist durch diese Risiken nicht möglich.

Sturmmodell Einzelbaum

- SCHMIDT et al. (2010) haben den Sturm Lothar untersucht, der in Südwestdeutschland 1999 schwere Schäden verursacht hat. In dem Modell wurden folgende Variablen berücksichtigt: Baumdimension, verschiedene Topexkombinationen (der Topex beschreibt die Exponiertheit eines Standortes), Bodeneigenschaften, Bestandesstruktur und ein räumlich strukturierter Fehler.
- Buchdrucker (*Ips typographus* L.) Bestand
- Es wurden Einschlagsdaten im hessischen, auch in ST und niedersächsischen Bergland untersucht. Als Kovariablen wurde die Entwicklungsstufe des Bestandes, verschiedene Witterungsparameter zur Temperatur- und Niederschlagssumme, die Fichtenanteil, biotische und abiotische Vorschädigungen sowie ein räumlich und zeitlich strukturierter Fehler berücksichtigt.
- Nonnen (*Lymantria monacha* L.) Bestand
- Es wurden Fraßkartierungen aus Brandenburg als Datengrundlage genutzt. Als Kovariablen wurde die Entwicklungsstufe des Bestandes, Witterungsparameter, die Bestandesdiversität sowie ein räumlich strukturierter Fehler berücksichtigt.

Ereigniszeitmodellierung

In der Ereigniszeitanalyse wird die Wahrscheinlichkeit, dass ein Event an einem bestimmten Zeitpunkt t noch nicht stattgefunden hat durch

$$S(t) = P(T > t)$$

modelliert. In dieser Arbeit ist die Wahrscheinlichkeit von Interesse, dass ein Baum ein bestimmtes Alter überlebt, wobei als Event die risikobedingte Mortalität berücksichtigt wird. $S(t)$ wird als Überlebensfunktion bezeichnet.

Eine Besonderheit dieser Studie ist, dass die Events nicht direkt beobachtet werden, sondern dass zu einem bestimmten Zeitpunkt ein Event stattgefunden hat. Es kann dann daraus geschlossen werden, dass das Event zwischen der letzten Beobachtung, wo noch kein Event an dem Baum beobachtet wurde und der aktuellen Beobachtung stattgefunden haben muss. Die Zeitpunkte, an denen die Events beobachtet wurden, sind entsprechend diskret verteilt. Daher wird eine zeitdiskrete Ereigniszeitanalyse durchgeführt. Hier wird die Wahrscheinlichkeit modelliert, dass ein Event in einem Intervall $[t-1, t)$ stattfindet, gegeben dass der Baum den Anfang der Periode erlebt hat. Hieraus kann dann $S(t)$ berechnet werden.

Ergebnisse

Als finales Modell hat sich schließlich folgendes Modell herausgestellt:

$$g(\pi) = Z\beta + f(\text{Alter})_{\text{Nadel}} + f(\text{Alter})_{\text{Laub}} + f(\text{HW}, \text{RW}) + f(\text{Jahr})$$

mit

$$Z = (1, SS, Ips, Nonne, TS, NS)$$

Es wurde ein Modell für alle Baumarten erstellt. Teilweise wurden Koeffizienten baumartenspezifisch modelliert. Neben den vormodellierten Risiken wurde die Temperatursumme (TS) und die Niederschlagssumme NS innerhalb der Vegetationsperiode des Vorjahres berücksichtigt. Weiterhin wurden räumlich und zeitlich strukturierte Fehler berücksichtigt ($f(x)$). Die Vorzeichen der Werte sind plausibel.

Ein Großteil der Variabilität wird durch die strukturierten Fehler erklärt, insbesondere in den Jahren, in denen die schweren Winterstürme stattgefunden haben. Von den kausal interpretierbaren Kovariablen haben die Temperatur, das vormodellierte Sturmrisiko sowie das vormodellierte Borkenkäferisiko einen großen Einfluss (vgl. Tabelle 1).

Tabelle 1: Produkt aus dem Interquartilsabstand der entsprechenden Variable und dem entsprechenden Regressionskoeffizient. Bzw. Interquartilsabstand des strukturierten Fehlers.

		Bu	Ei	Fi	Ki
Interzept		-7.5190	-7.4017	-6.5102	-6.9719
P(Sturmschaden)	0.2456	0.2069	0.1553	0.2233	0.1455
P(Käferschaden Fichte)				0.1931	
P(Käferschaden Kiefer)					0.0400
TS	0.2252	0.1998	0.1925	0.2323	0.1762
NS	-0.0521	-0.0507	-0.0486	-0.0586	-0.0484
f(Alter) Nadelbaumart	0.0317				
f(Alter) Laubbaumart	0.2112				
f(RW, HW)	0.6488				
f(RW, HW) 1990	2.3179				
f(RW, HW) 2007	1.9330				
f(Jahr)	0.5826				

Szenarien

Die im Folgenden dargestellten Szenarien werden exemplarisch für die Fichte dargestellt.

Effekte der Baumdimension

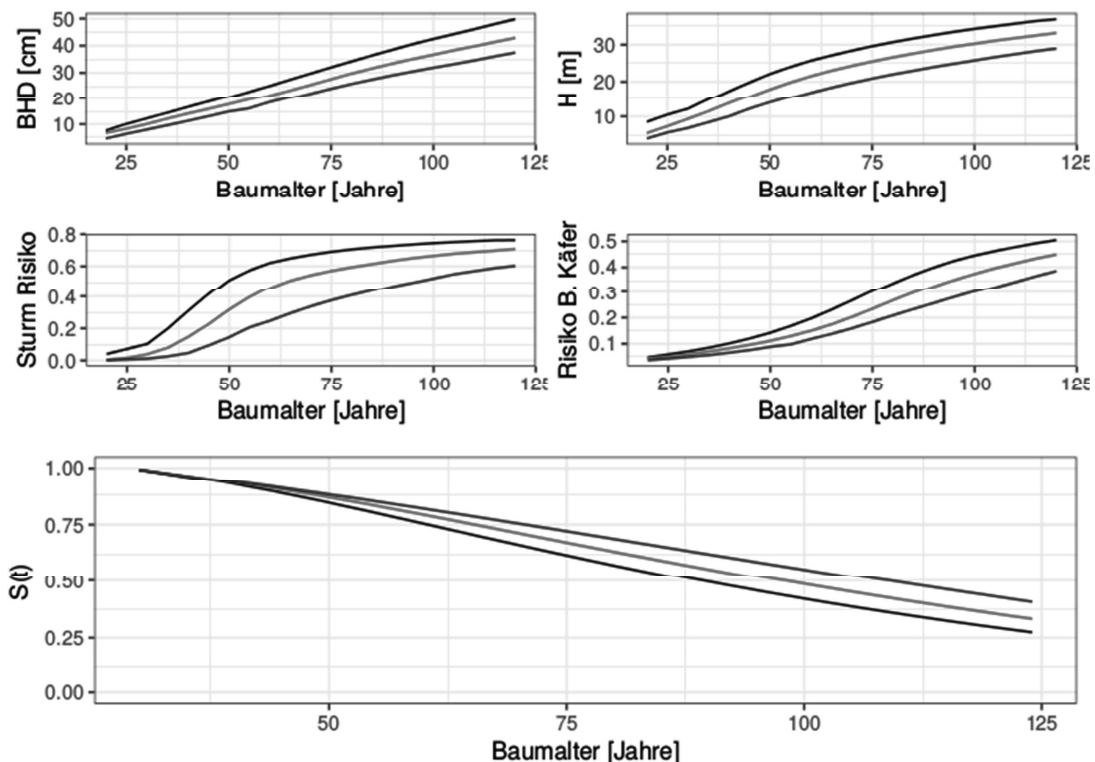


Abbildung 3: Oben: Die Baumdimensionentwicklung (H: Baumhöhe) der Fichte nach der ersten (schwarz), zweiten (rot) und dritten (blau) Ertragsklasse (Schober, 1987). Weiterhin ist dargestellt, wie sich die unterschiedlichen Dimensionseentwicklungen auf die vorgeschätzten Risiken (mitte) und schließlich auf die Überlebenswahrscheinlichkeit (unten) auswirken. Für die anderen Kovariablen wurden mittlere Werte angenommen

Die Baumdimension hat einen Einfluss auf die risikobedingte Mortalitätswahrscheinlichkeit von Bäumen. ist die Baumdimensionseentwicklung für den BHD und Baumhöhe der Fichte nach der ersten (schwarz), zweiten (rot) und dritten (blau) Ertragsklasse (SCHOBBER, 1987) dargestellt. Weiterhin ist dar-

gestellt, wie sich die unterschiedlichen Dimensionsentwicklungen auf die vorgeschätzten Risiken und schließlich auf die Überlebenswahrscheinlichkeit auswirken. Für die anderen Kovariablen wurden mittlere Werte angenommen.

Vergleich geschützter und ungeschützter Lagen

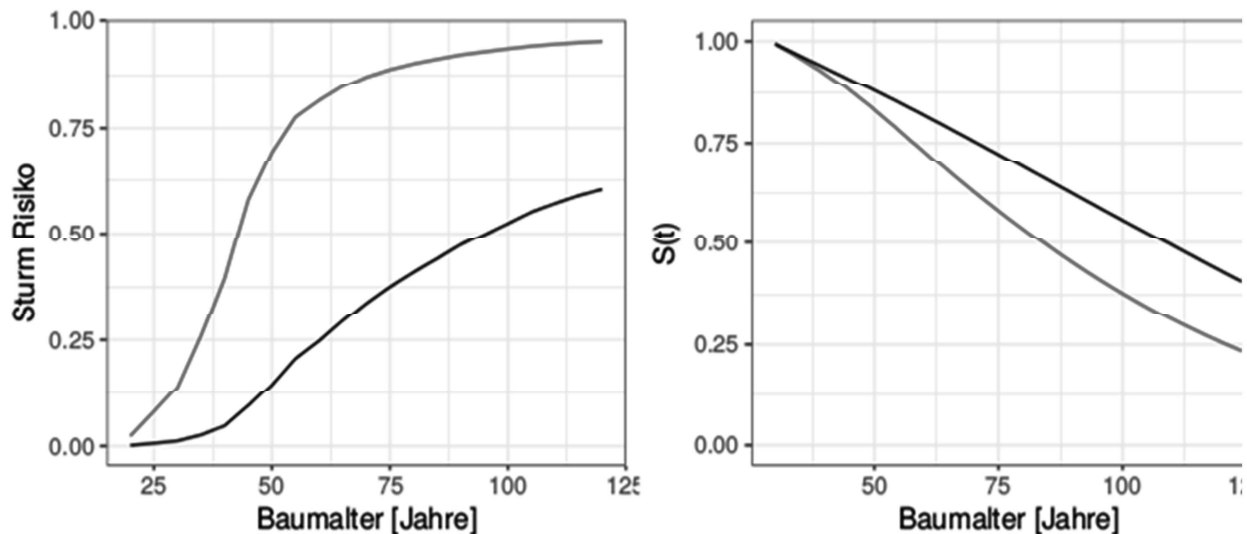


Abbildung 4: Der Einfluss des Topex auf das vorgeschätzte Sturmrisiko (links) und die Überlebenswahrscheinlichkeit (rechts). Schwarz: Geschützte Lage (Topex=10°), rot: Ungeschützte Lage (Topex=-10°). Für die anderen Kovariablen wurden mittlere Werte bzw. für die Baumdimension mittlere Dimensionsverläufe angenommen.

Ob ein Standort windgeschützt und windexponiert ist hat einen wichtigen Einfluss auf die Überlebenswahrscheinlichkeit von Bäumen. Die Windexponiertheit eines Standortes kann durch den Topex beschrieben werden, wobei geschützte Standorte durch einen positiven und exponierte Standorte durch einen negativen Topex charakterisiert werden. In der Abbildung 4 ist der Einfluss des Topex auf das vormodellierte Sturmrisiko und die Überlebenswahrscheinlichkeit dargestellt. Es werden eine geschützte Lage (Topex=10°) und eine ungeschützte Lage (Topex=-10°) verglichen. Diese Topexwerte stellen innerhalb des Datensatzes extreme Werte dar; etwa das 0.01- und 0.99-Quantil. Für die anderen Kovariablen wurden mittlere Werte bzw. für die Baumdimension mittlere Dimensionsverläufe angenommen.

Berücksichtigung des Klimawandels

Seit einigen Jahren wird eine Veränderung der Standorte durch den Klimawandel beobachtet. Die Veränderung der Standorte weist eine zeitliche Dynamik auf, so dass diese insbesondere bei der langfristigen forstlichen Planung, berücksichtigt werden muss. Der Klimawandel ist schwierig zu projizieren, da von verschiedenen Faktoren wie der Bevölkerungsentwicklung, dem technischen Fortschritt, der Klimapolitik etc. abhängt. Es gilt als relativ sicher, dass die Temperatur steigen wird. Es wird von einem globalen Temperaturanstieg zwischen 0.3 und 4.8 Kelvin bis 2100 ausgegangen (COLLINS et al., 2013). Der projizierte Temperaturanstieg unterscheidet sich in Abhängigkeit der Klimaszenarien. Hier werden unter anderem verschiedene gesellschaftliche Entwicklungen unterstellt. In Mitteleuropa könnte der Temperaturanstieg sogar noch höher sein (CHRISTENSEN et al., 2007). Andere Parameter, die direkt oder indirekt von der Temperatur abhängen, werden sich durch den Temperaturanstieg auch verändern. Es ist sehr schwierig Vorhersagen für solche Parameter zu machen. Einige Projektionen kommen zu dem Ergebnis, dass es zu einer Verschiebung der Niederschläge kommt; im Sommer werden die Niederschläge demnach abnehmen, hierdurch könnten vermehrt Sommertrockenheiten auftreten (COLLINS et al., 2013). Es wurden ein jährlicher Temperaturanstieg von 0.01 K und ein deutlicher Rückgang der Niederschläge innerhalb der Vegetationsperiode zeitdynamisch unterstellt (Abb. 5). Insbesondere biotische

Events werden durch den Klimawandel wahrscheinlicher. In der Abbildung 5 ist der Einfluss des Klimawandels auf das vormodellierte Borkenkäferisiko und die Überlebenswahrscheinlichkeit dargestellt.

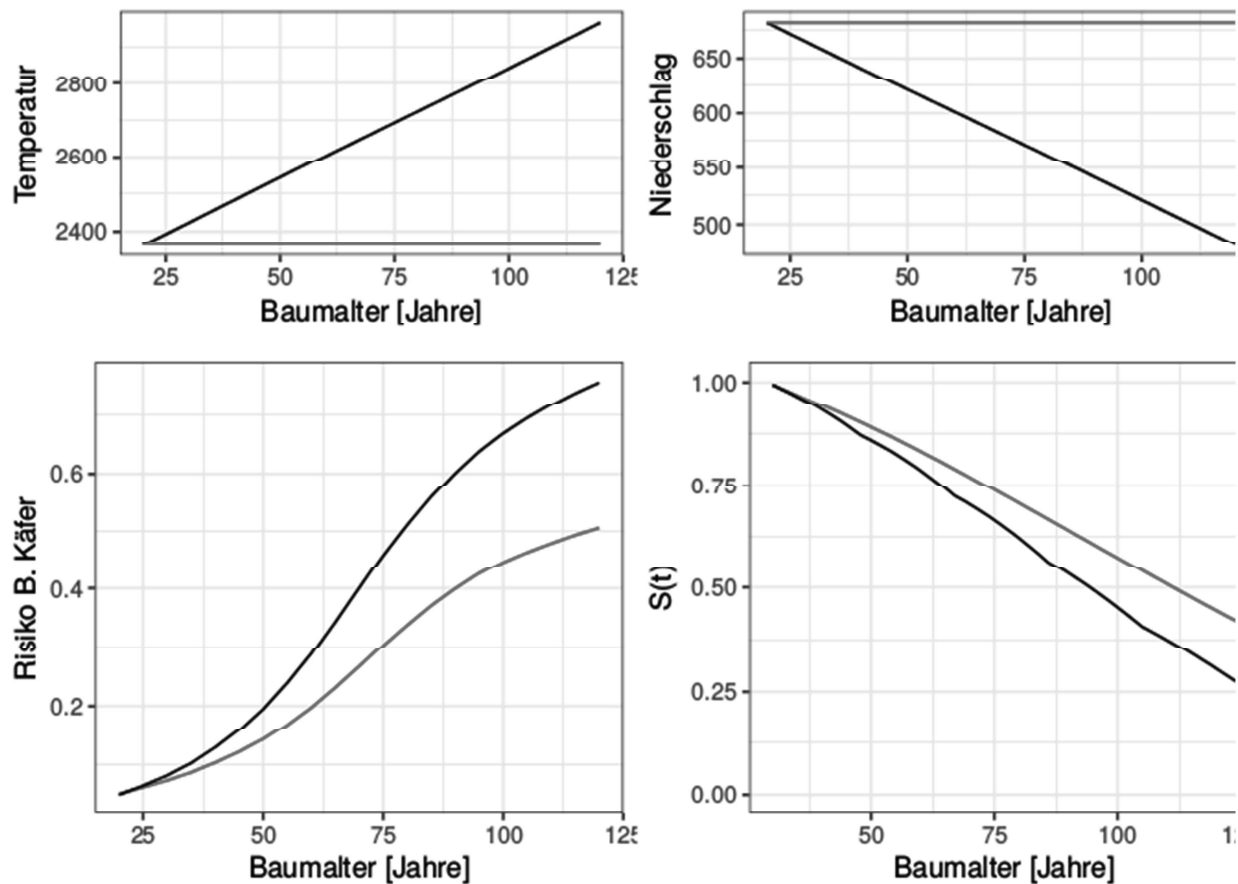


Abbildung 5: Der Einfluss eines projizierten Klimawandels auf die Überlebenswahrscheinlichkeit. Es wird ein jährlicher Temperaturanstieg von 0.01 K (oben links) und ein Rückgang der Niederschläge innerhalb der Vegetationsperiode (oben rechts) zeitdynamisch unterstellt. Weiterhin ist der Einfluss des projizierten Klimawandels auf das vormodellierte Borkenkäferisiko (unten links) und die Überlebenswahrscheinlichkeit (unten rechts) dargestellt.

Diskussion

In dem Ereigniszeitmodell, das in dieser Arbeit erstellt wurde, können zeitveränderliche Kovariablen abgebildet werden. Somit ist es grundsätzlich möglich, Wachstumsprozesse sowie eine Veränderung der Standorte durch den Klimawandel detailliert und somit realistisch abzubilden. Durch die strukturierten Fehler können die räumliche und zeitliche Autokorrelation, die durch die Effekte nicht beobachteter Kovariablen verursacht werden, berücksichtigt werden. Somit ist eine unverzerrte Modellierung der Effekte der beobachteten Kovariablen möglich. Die formulierten Ziele wurden somit erreicht.

Durch die zweistufige Modellierung ist es möglich eine Vielzahl von Faktoren auf die Mortalität abzubilden. Die Einzelrisiken fungieren dabei als 'synoptische' Kovariablen, die eine Vielzahl von Einzeleffekten subsumieren. Die zugrundeliegende Annahme dabei ist, dass es egal ist welcher Effekt zu einer Veränderung des jeweiligen Teilrisikos geführt hat.

In vorherigen Studien (z. B. STAUPENDAHL und ZUCCHINI, 2011; NOTHDURFT, 2013; NEUNER et al., 2015) traten immer wieder Probleme auf, risikobedingte Mortalität zu modellieren, bzw. es wurden wichtige Kovariablen, wie zum Beispiel Bodeneigenschaften, nicht berücksichtigt. Hierfür gib es zwei wichtige Gründe; zum einen liegen in vielen Studien, so wie in dieser, wichtige Kovariablen die einen Einfluss auf die Mortalität haben nicht vor. Zum anderen ist die Mortalität diskret, mit nur zwei Stufen verteilt. Die Modellierung einer solchen Zielvariable stellt eine große Herausforderung dar. Daher ist es

bemerkenswert, wie es in dieser Studie gelungen ist die Mortalität zu beschreiben, hierbei soll nochmal die zweistufige Modellierung gewürdigt werden.

Vergleicht man die Überlebenswahrscheinlichkeiten mit den Ergebnissen aus anderen Studien (STAU-PENDAHL und ZUCCHINI, 2011; NOTHDURFT, 2013; NEUNER et al., 2015), so liegen die Ergebnisse dieser Studie auf einem deutlich niedrigeren Niveau. In dieser Studie wurde das Einzelbaumrisiko modelliert, während in den zitierten Arbeiten das Bestandesrisiko modelliert wurde. Ein Ausfall eines Einzelbaumes ist jedoch in vielen Fällen nicht gleichzusetzen mit einem Ausfall auf Bestandesebene, da benachbarte Bäume weniger unter Konkurrenz leiden und entsprechend schneller wachsen. Somit werden einzeln ausfallende Einzelbäume insbesondere in jungen Beständen bereits nach wenigen Jahren kompensiert. Um das Einzelbaumrisiko auf das Bestandesrisiko zu übertragen, muss analysiert wie geclustert (in Raum und Zeit) die einzelnen Bäume ausfallen.

Das Modell ist eine wichtige Grundlage für eine an den Klimawandel angepasste nachhaltige Forstwirtschaft. Auf der Grundlage dieses Modells kann ein Entscheidungsunterstützungssystem für die forstliche Bestandesbehandlung (hinsichtlich Managementmaßnahmen und Baumartenwahl) entwickelt werden.

Literaturverzeichnis

- ALLEN, C. D.; MACALADY, A. K.; CHENCHOUNI, H.; BACHELET, D.; MCDOWELL, N.; VENNETIER, M.; KITZBERGER, T.; RIGLING, A.; BRESHEARS, D. D.; HOGG, E. H. T.; GONZALEZ, P.; FENSHAM, R.; ZHANG, Z.; CASTRO, J.; DEMIDOVA, N.; LIM, J.-H.; ALLARD, G.; RUNNING, S. W.; SEMERCI, A. und COBB, N.: A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest Ecology and Management*, 259(4), 660-684, 2010.
- ARAÚJO, M. B. und WILLIAMS, P. H.: Selecting areas for species persistence using occurrence data. *Biological Conservation*, 96, 331-345, 2000.
- BLENNOW, K.; ANDERSSON, M.; SALLNÄS, O. und OLOFSSON, E. Climate change and the probability of wind damage in two Swedish forests. *Forest Ecology and Management*, 259(4), 818-830, 2010.
- CHRISTENSEN, J. H.; HEWITSON, B.; BUSUIOC, A.; CHEN, A.; GAO, X.; HELD, R.; JONES, R.; KOLLI, R. K.; KWON, W. K.; LAPRISE, R.; MAGANA RUEDA, V.; MEARN, L.; MENENDEZ, C. G.; RÄISÄNEN, J.; RINKE, A.; SARR, A.; WHETTON, P.; ARMITT, R.; BENESTAD, R.; BENISTON, M.; BROMWICH, D.; CAYA, D.; COMISO, J.; DE ELIA, R. und DETHLO, K.: Regional climate projections, *Climate Change, 2007. The Physical Science Basis*, 2007.
- COLLINS, M.; KNUTTI, R.; ARBLASTER, J.; DUFRESNE, J.-L.; FICHEFET, T.; FRIEDLINGSTEIN, P.; GAO, X.; GUTOWSKI, W.; JOHNS, T.; KRINNER, G.; SHONGWE, M.; TEBALDI, C.; WEAVER, A. und WEHNER, M.: *Long-term Climate Change: Projections, Commitments and Irreversibility*. Cambridge University Press, Cambridge England; New York, 2013.
- DURSKY, J.: Modelling mortality in mixed norway spruce/beech stands. *Allgemeine Forst und Jagdzeitung*, 1(168), 131-134, 1997.
- HANEWINKEL, M.; CULLMANN, D. A.; SCHELHAAS, M.-J.; NABUURS, G.-J. und ZIMMERMANN, N. E. Climate change may cause severe loss in the economic value of European forest land. *Nature Climate Change*, 3(3), 203-207, 2007.
- HANEWINKEL, M.; HUMMEL, S. und CULLMANN, D. A.: Modelling and economic evaluation of forest biome shifts under climate change in Southwest Germany. *Forest Ecology and Management*, 259(4), 710-719, 2010.
- HANSEN, A. J.; NEILSON, R. P.; DALE, V. H.; FLATHER, C. H.; IVERSON, L. R.; CURRIE, D. J.; SHAFER, S.; COOK, R. und BARTLEIN, P. J.: Global Change in Forests: Responses of Species, Communities, and Biomes Interactions between climate change and land use are projected to cause large shifts in biodiversity. *BioScience*, 51(9), 765-779, 2001.
- HÜLSMANN, L.; BUGMANN, H. K. M.; COMMARMOT, B.; MEYER, P.; ZIMMERMANN, S. und BRANG, P.: Does one model fit all? Patterns of beech mortality in natural forests of three European regions. *Ecological Applications*, 26(8), 2465-2479, 2016.

- IVERSON, L. R. und PRASAD, A. M.: Potential Changes in Tree Species Richness and Forest Community Types following Climate Change. *Ecosystems*, 4(3), 186-199, 2001.
- NEUNER, S.; ALBRECHT, A.; CULLMANN, D.; ENGELS, F.; GRIESS, V. C.; HAHN, W. A.; HANEWINKEL, M.; HÄRTL, F.; KÖLLING, C.; STAUPENDAHL, K. und KNOKE, T.: Survival of Norway spruce remains higher in mixed stands under a dryer and warmer climate. *Global Change Biology*, 21(2), 935-946., 2015.
- NOTHDURFT, A.: Spatio-temporal prediction of tree mortality based on long-term sample plots, climate change scenarios and parametric frailty modeling. *Forest Ecology and Management*, 291, 43-54, 2013.
- OVERBECK, M. und SCHMIDT, M.: Modelling infestation risk of Norway spruce by *Ips typographus* (L.) in the Lower Saxon Harz Mountains (Germany). *Forest Ecology and Management*, 266, 115-125, 2012.
- RIGLING, A.; BIGLER, C.; EILMANN, B.; FELDMEYER-CHRISTE, E.; GIMMI, U.; GINZLER, C.; GRAF, U.; MAYER, P.; VACCHIANO, G.; WEBER, P.; WOHLGEMUTH, T.; ZWEIFEL, R. und DOBBERTIN, M.: Driving factors of a vegetation shift from Scots pine to pubescent oak in dry Alpine forests. *Global Change Biology*, 19(1), 229-240, 2013.
- SCHMIDT, M.; HANEWINKEL, M.; KÄNDLER, G.; KUBLIN, E. und KOHNLE, U.: 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, 2010.
- SCHOBER, R.: Ertragstabellen wichtiger Baumarten. J.D. Sauerländer's Verlag, Frankfurt a.M., 1987.
- SEIDL, R.; BAIER, P.; RAMMER, W.; SCHOPF, A. und LEXER, M. J.: Modelling tree mortality by bark beetle infestation in Norway spruce forests. *Ecological Modelling*, 206(34), 383-399, 2007.
- SEIDL, R.; FERNANDES, P. M.; FONSECA, T. F.; GILLET, F.; JÖNSSON, A. M.; MERGANIĆOVIĆ, K.; NETHERER, S.; ARPACI, A.; BONTEMPS, J.-D.; BUGMANN, H.; GONZÁLEZ-OLABARRIA, J. R.; LASCH, P.; MEREDIEU, C.; MOREIRA, F.; SCHELHAAS, M.-J. und MOHREN, F.: Modelling natural disturbances in forest ecosystems: a review. *Ecological Modelling*, 222(4), 903-924, 2011.
- STAUPENDAHL, K. und ZUCCHINI, W.: Schätzung von Überlebensfunktionen der Hauptbaumarten auf der Basis von Zeitreihendaten der Rheinland-Pfälzischen Waldzustandserhebung. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung*, 182(7/8), 129-145, 2011.
- YANG, Y.; TITUS, S. J. und HUANG, S.: Modeling individual tree mortality for white spruce in Alberta. *Ecological Modelling*, 163(3), 209-222, 2003.

Danksagung

Das Projekt RiskMan wurde im Rahmen des Waldklimafonds (FKZ 28WB401501) durch das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft und das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit gefördert.