

Analyse und Projektion der Sturmschadenempfindlichkeit von Wäldern
Analysis and Projection of Forests Vulnerability against Winterstorms

Projekt (EH – 3 I)

Bearbeiter:
Matthias Schmidt

Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt

Göttingen, Juni 2014

Endbericht
Analyse und Projektion der Sturmschadenempfindlichkeit von Wäldern
Projekt (EH – 3 I)
Förderkennzeichen 2813HS004

Auftraggeber:
Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft
Rochusstraße 1
53123 Bonn

Projektträger:
Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE)
Deichmanns Aue 29
53179 Bonn
Ansprechpartner: Frau Ulrike Neumann

Zuwendungsempfänger/Auftragnehmer:
Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (NW-FVA)
Grätzelstraße 2
37083 Göttingen

Laufzeit und Berichtszeitraum: 01.12.2013-30.06.2014

Zusammenarbeit mit anderen Stellen:
Thünen-Institut für Waldökosysteme
Alfred-Möller-Str. 1
16225 Eberswalde

Bearbeiter:
Matthias Schmidt

Göttingen, 30.06.2014

Inhaltsverzeichnis

1	Ziele und Aufgabenstellung	1
1.1	Einleitung	1
1.2	Gesamtkonzeption einer Prognose der Sturmschadenempfindlichkeit von Wäldern	1
2	Material und Methoden	4
2.1	Methodik der Initialisierung potenzieller Bestockungen	4
2.2	Methodik der Prognose potenzieller Vulnerabilitäten gegenüber Winterstürmen	8
2.3	Hochrechnung von Waldflächen	13
3	Ergebnisse	14
3.1	Initialisierung potenzieller Bestockungen	14
3.2	Prognose potenzieller Vulnerabilitäten gegenüber Winterstürmen	22
3.3	Waldflächenverteilungen nach Stufen potenzieller Vulnerabilität	28
3.4	Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse	33
3.5	Ausblick	33
4	Zusammenfassung	35
5	Abstract	35
6	Appendix (Weiterentwicklung des Sturmschadenmodells)	37
7	Literatur	41

1 Ziele und Aufgabenstellung

1.1 Einleitung

Sturmschäden und die häufig durch sie ausgelösten Borkenkäferkalamitäten sind seit jeher die bedeutendsten Risikofaktoren für die Forstwirtschaft. Sie verursachen durch Holzentwertung, erhöhte Erntekosten und Hiebsunreifeverluste sowie die bei hohen Kalamitätsnutzungen entstehenden Holzmarktstörungen erhebliche wirtschaftliche Schäden (SCHELHAAS et al. 2003). Im Zusammenhang mit der Klimaerwärmung wird mit einem steigenden Sturmrisiko bzw. einer erhöhten Frequenz schwerer Winterstürme in West- und Mitteleuropa gerechnet. Selbst bei Annahme einer gleich bleibenden Intensität besteht seitens der Praxis eine steigende Nachfrage nach Entscheidungshilfen, um das Risikopotenzial durch Stürme als einen weiteren Aspekt standortgerechten Waldbaus besser berücksichtigen zu können. Vor diesem Hintergrund erfolgt im Rahmen des Projektes die Prognose einer potenziellen Vulnerabilität des Waldes in Deutschland gegenüber Winterstürmen.

1.2 Gesamtkonzeption einer Prognose der Sturmschadenempfindlichkeit von Wäldern

Grundsätzlich sind unterschiedliche Arten von (prognostizierten) Vulnerabilitäten zu unterscheiden, die als entscheidungsrelevante Informationen für verschiedene Bereiche der forstlichen Planung dienen können. Die Vulnerabilität der aktuellen Bestockung liefert die Grundlage, um das zeitliche und räumliche Muster der Ernte (räumliche Ordnung) aktuell hiebsreifer Bestände zu optimieren. Die Einschätzung auf der Grundlage mittelfristiger waldbaulicher Szenariosimulationen würde es ermöglichen, diese Optimierung auch für erst zukünftig hiebsreife Bestände durchzuführen. Neben dieser wichtigen Entscheidungshilfe für die mittelfristige Forstplanung hat die Prognose einer potenziellen Vulnerabilität unabhängig von der aktuellen Bestockung große praktische Bedeutung für die langfristige Waldbauplanung. Eine potenzielle Vulnerabilität auf der Basis von standardisierten Indikatorbeständen ermöglicht die Bewertung von forstlichen Standorten unter Berücksichtigung von baumartenspezifischen Produktionszielen. Sie liefert die Grundlage für die Optimierung der langfristigen Waldbauplanung und hier vor allem der standortgerechten Baumartenwahl. Die Bewertung der Standorte erlaubt es somit, die räumliche Verteilung der Baumarten bzw. Waldentwicklungstypen nicht nur nach Leistungskriterien sondern auch unter Berücksichtigung des Wintersturmriskos zu optimieren.

Neben der Baumartenwahl lassen sich weitere waldbauliche Steuergrößen wie Zielstärken sowie Durchforstungsintervalle, -stärken und -arten risikosensitiv optimieren. Somit wird der Waldbau auf standörtlicher Grundlage um eine weitere Dimension (Wintersturmrisko) erweitert.

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung werden potenzielle Vulnerabilitäten für die Baumarten Eiche, Buche, Fichte, Douglasie und Kiefer für unterschiedliche Zielstärken geschätzt. Als Stichprobe zur Ableitung relevanter Standortparameter, die die potenzielle Sturmschadenempfindlichkeit direkt oder indirekt beeinflussen, werden alle Wald-Traktecken der Bundeswaldinventur (BWI) 2 verwendet. Die potenzielle Vulnerabilität wird direkt beeinflusst, wenn Standortparameter – wie die Geländeexponiertheit – als Kovariablen des verwendeten Sturmschadenmodells (Kapitel 2.2) wirken. Die Vulnerabilität wird indirekt beeinflusst, wenn Standortparameter Effekte auf die Leistung der Baumarten bzw. auf die Baumhöhe bei Erreichen der Zielstärke haben, da sowohl der BHD als auch die Baumhöhe als Kovariablen im Sturmschadenmodell wirken (Kapitel 2.2). Die Traktecken der BWI werden hier somit lediglich dafür verwendet, relevante Standortparameter flächenrepräsentativ für den Wald in Deutschland abzuleiten. Die Bestockungsinformationen der BWI 2 werden für die Prognose einer potenziellen Vulnerabilität nicht benötigt. Aktuelle Bestockungen sowie ihre Fortschreibung mit einem Waldwachstumssimulator würden die Einschätzung der Vulnerabilität der aktuellen bzw. einer zukünftigen Bestockung ermöglichen, die nicht Gegenstand der vorliegenden Untersuchung ist.

Die Verwendung der Traktecken der Bundeswaldinventur als Datenbasis zur Erfassung relevanter Standortparameter für den Wald in Deutschland weist eine Reihe von Vorteilen auf:

- Der Waldentscheid, d.h. die Überprüfung ob an einer Traktecke Wald vorliegt, erfolgt anhand aktueller Luftbilder bzw. in nicht-eindeutigen Fällen mittels terrestrischer Inventur.
- Für die Traktecken der BWI liegt eine Vielzahl von Eigenschaften u.a. aus der sogenannten Traktvorklärung, wie z.B. die Eigentumsart oder die Eigentumsgrößenklassen vor, die für stratifizierte Auswertungen der prognostizierten Vulnerabilitäten genutzt werden können.
- Die prognostizierten potenziellen Vulnerabilitäten können mittelfristig mit den Ergebnissen der BWI 3 verschnitten werden, um beispielsweise die aktuellen Vorräte differenzierter unter Risikoaspekten auswerten zu können.
- Die prognostizierten potenziellen Vulnerabilitäten könnten in Holzaufkommensprognosen auf der Grundlage der BWI 3 dazu verwendet werden, die zu definierenden waldbaulichen Steuergrößen wie Zielstärken und Durchforstungsintensitäten differenziert bzgl. dieses Risikofaktors anzupassen.

Für die Einschätzung einer potenziellen Vulnerabilität des Waldes in Deutschland gegenüber Winterstürmen werden Parameter potenzieller, nicht der realen, Bestockungen an den Wald-Traktecken der Bundeswaldinventur benötigt. Dabei geht die Struktur der Bestände vereinfacht über eine definierte Zielstärke (BHD) und eine korrespondierende generierte Baumhöhe von standorttypischen Modellbäumen als Prädiktor in das Sturmschadenmodell ein. Zur Abschätzung des Effektes der Baumdimension in Wechselwirkung mit der Baumart wird einheitlich ein sehr breiter Wertebereich des BHD untersucht. Somit werden auch BHD-Werte außerhalb des Bereiches typischer Zielstärken der Baumarten verwendet. Der hier gewählte Wertebereich umfasst für alle berücksichtigten Baumarten das Intervall 20 – 75 cm mit einer Schrittweite von 5 cm. Die Analyse kann somit für sehr unterschiedliche Normbestockungen erfolgen, wobei bestimmte Bestockungen bzw. Baumarten jederzeit aufgrund weiterer Risiken, wie etwa Trockenstress, von Vergleichen ausgeschlossen werden können.

Neben Informationen zur potenziellen Bestockung werden Indices zur Beschreibung der Geländeexponiertheit auf definierten Himmelsrichtungen in Relation zu hypothetischen Hauptwindrichtungen für die Initialisierung des Sturmschadenmodells benötigt (Kapitel 2.2), die auf der Grundlage eines digitalen Geländemodells berechnet werden. Darüber hinaus werden die potenziellen Vulnerabilitäten durch die Wintersturmintensität d.h. vor allem die Windgeschwindigkeit bestimmt. In der vorliegenden Untersuchung wird diese Intensität über eine Proxyvariable gesteuert (Kapitel 2.2), wobei für eine möglichst hohe Trennschärfe zwischen den Standorten ein Wintersturm in 'Orkanstärke' unterstellt wird. Anstelle meteorologischer Parameter werden dabei abstrakte Intensitäten, wie die 'Intensität des Orkans Lothar im Bereich Offenburg' verwendet (Kapitel 2.2).

An die Ableitung von Kovariablen zur Beschreibung potenzieller Bestockungen, der Geländeexponiertheit sowie der Wahl einer Wintersturmintensität schließt sich die eigentliche Prognose verschiedener potenzieller Vulnerabilitäten für die Wald-Traktecken der BWI 2 an (Abb. 1). Diese bilden dann die Grundlage für Hochrechnungen von Waldflächenverteilungen differenziert nach Vulnerabilitätsstufen, die gegebenenfalls nach weiteren Traktecken-Eigenschaften stratifiziert werden können (Abb. 1).

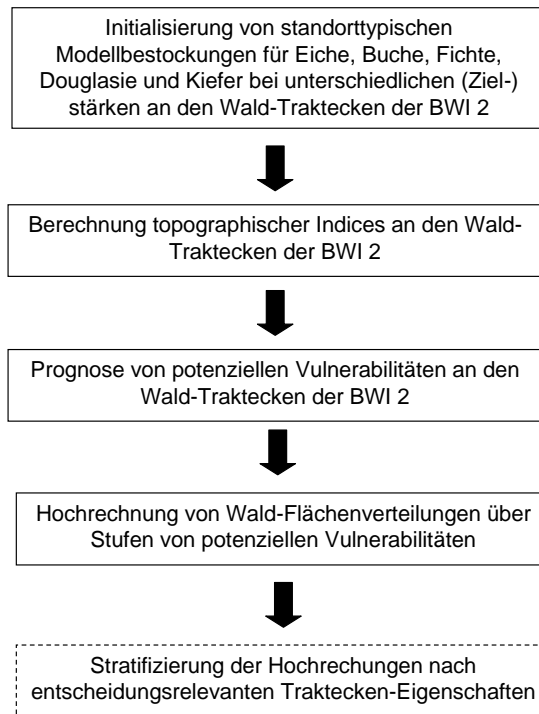


Abbildung 1: Ablaufdiagramm der Gesamtkonzeption zur Prognose potenzieller Vulnerabilitäten des Waldes in Deutschland durch Winterstürme.

2 Material und Methoden

Der Methodenteil wird in die Beschreibung der Ansätze zur Prognose potenzieller Bestockungen (Kapitel 2.1), der eigentlichen Vulnerabilitätsprognose (Kapitel 2.2) sowie der Flächenhochrechnung (Kapitel 2.3) untergliedert.

2.1 Methodik der Initialisierung potenzieller Bestockungen

Für eine möglichst realitätsnahe Prognose potenzieller Vulnerabilitäten ist eine standortsensitive Modellierung der Baumhöhe notwendig, da die Baumhöhe einen starken Modelleffekt auf die Schätzungen aufweist (Kapitel 2.2). Zu diesem Zweck war es erforderlich, in einem ersten Schritt die Hilfsvariable 'Alter bei Erreichen der Zielstärke' in Abhängigkeit von den Standortseigenschaften zu prognostizieren. Für die standortsensitive Schätzung des Alters bei Zielstärke wurden innerhalb des Projektes baumartenspezifische verallgemeinerte additive Regressionsmodelle (gam) unter Verwendung der R-library *mgcv* (WOOD 2006, 2011) entwickelt (Gl. 1):

$$\log\{E(\text{Alt_Zst}_{kti})\} = f_1(\text{BHD}_{kti}) + f_2(\text{HNN}_k) + f_3(\text{Rechtswert}_k, \text{Hochwert}_k) \quad [1]$$

$$\text{Alt_Zst}_{kti} \sim \text{Gamma}(\exp(\eta_{kti}))$$

mit:

- $E(\text{Alt_Zst}_{kti})$: Erwartungswert des Alters von Baum i in Traktecke k zum Zeitpunkt t [J]
- BHD_{kti} : BHD von Baum i in Traktecke k zum Zeitpunkt t [cm]
- HNN_k : Seehöhe des Mittelpunktes von Traktecke k [m]
- RW_k, HW_k : Rechts- und Hochwert des Mittelpunktes von Traktecke k im Gauß-Krüger-Koordinatensystem (3.-ter Meridian)
- f_1, f_2 : Eindimensionale glättende Regressionssplines zur Erfassung nicht-linearer Effekte metrischer Kovariablen
- f_3 : Zweidimensionaler glättender Regressionsspline zur Erfassung räumlicher Autokorrelation bzw. großräumiger regionaler Unterschiede

Die Datengrundlage des Modells sind alle Bäume mit Höhenmessungen der Bundeswaldinventuren 1 und 2. Zur Beschreibung regionaler Unterschiede wird die geographische Lage als Proxy-Variable in Form von Gauß-Krüger-Koordinaten verwendet. Ihr Effekt auf das Alter bei Zielstärke wird über einen 2-dimensionalen penalisierten Regressionsspline (f_3) quantifiziert (Gl. 1). Höhengradienten, die u.a. auf Temperatur- und Niederschlagsgradienten zurückzuführen sind, werden vereinfacht über die Proxy-Variable Seehöhe mit Hilfe eines 1-dimensionalen penalisierten Regressionsspline (f_2) beschrieben bzw. subsummiert (Gl. 1). Auf die Verwendung kausaler Standortvariablen wie Temperatur- und Niederschlagssummen, die nutzbare Feldkapazität oder die Nährstoffversorgung wird hier verzichtet, da keine Prognose der Auswirkungen zukünftiger Leistungsänderungen erfolgt und somit die Effekte von Klimaänderungen vernachlässigt werden können. Weiterhin liegen deutschlandweit nur ungenaue Informationen bzgl. relevanter Bodenparameter aus kleinmaßstäbigen Karten flächendeckend für alle Traktecken vor. Baumartenspezifische Modelle wurden für Eiche, Buche, Fichte, Douglasie und Kiefer parametrisiert (Tab. 1).

Tabelle 1: Statistische Kennwerte der verallgemeinerten additiven Regressionsmodelle zur Schätzung des Alters bei (Ziel-)stärke für Eiche, Buche, Fichte, Douglasie und Kiefer (Gl. 1).

Baumart	R-sq.(adj)	Anzahl Beobachtungen	Standard-Fehler [J]
Eiche	0,669	27927	16,1
Buche	0,617	52373	23,5
Fichte	0,620	127718	19,7
Douglasie	0,742	5866	11,1
Kiefer	0,619	55448	21,6

Auf der Basis der definierten Zielstärke (BHD), des zugehörigen Alters, der Standortparameter Temperatursumme in der Vegetationszeit, des Ariditätsindex sowie weiterer Baum- und Trakteckenvariablen wurde anschließend die Baumhöhe bei Zielstärke standortsensitiv eingeschätzt, die in Kombination mit der Zielstärke als Prädiktor in das Modell zur Sturmschadensprognose eingeht. Die Schätzungen erfolgen jeweils für alle Wald-Traktecken der BWI 2 unabhängig vom aktuellen Vorkommen der Baumart.

Zur Schätzung der Baumhöhe wurde ein longitudinales Höhen-Durchmesser-Modell (SCHMIDT 2010) verwendet (Gl. 2), das für Eiche, Buche, Fichte, Douglasie und Kiefer parametrisiert ist. Das Modell ist auf einer sehr umfangreichen Datenbasis, die u.a. die Bundeswaldinventuren 1 und 2 mit einschließt, entwickelt worden und erlaubt deutschlandweit Baumhöhenschätzungen, die sensitiv gegenüber der Temperatursumme in der Vegetationszeit und dem Ariditätsindex nach DE MARTONNE (1926) sind:

$$\ln(E(H_{kti})) = \widehat{p}_{1a} + p_{2a} (1 - e^{-\widehat{p}_{3a} \text{Alter}_{kti}})^{\widehat{p}_{4a}} + f_{2a}(d_rel_{kti}) + f_{3a}(KJ_{ki}) + f_{4a}(\text{Tempsum}_k) + f_{5a}(\text{Arid}_k) + f_{6a}(\text{RW}_k, \text{HW}_k) - p_{0b} x_{kti} - p_{1b} \text{Alter}_{kti} x_{kti} - p_{2b} \text{HNN}_k x_{kti} \quad [2]$$

mit:

$E(H_{kti})$: Erwartungswert der Baumhöhe von Baum i in Bestand k zum Zeitpunkt t mit $H_{kti} \sim N(\exp(\eta_{kti}), \sigma^2)$

Alter_{kti} : Alter von Baum i in Bestand k zum Zeitpunkt t [J]

d_rel_{kti} : Relativer BHD: Verhältnis des BHD von Baum i in Bestand k zum Zeitpunkt t in Relation zum zugehörigen Grundflächenmittelstamm

KJ_{ki} : Keimjahr von Baum i in Bestand k

- $Tempsum_k$: Mittlere Temperatursumme in der Vegetationszeit in Bestand k im Zeitraum 1961-1990 [$^{\circ}\text{C}$]
- $Arid_k$: Mittlerer Ariditätsindex nach DE MARTONNE (1926) in Bestand k im Zeitraum 1961-1990
- HNN_k : Seehöhe des Zentroides von Bestand k [m]
- RW_k, HW_k : Gauß-Krüger Hoch- und Rechtswert des Zentroides von Bestand k
- $\widehat{p}_{1a}, \widehat{p}_{3a}, \lambda$: Konstante Parameter der Chapman-Richards-Funktion, die zur Approximierung des Alterstrends des Lageparameters (Niveau) der Höhenkurve verwendet wurde (Gl. 3)
- p_{2a} : Zu schätzender Parameter der Chapman-Richards-Funktion, die zur Approximierung des Alterstrends des Lageparameters (Niveau) der Höhenkurve verwendet wurde (Gl. 3)
- $f_{2a}, f_{3a}, f_{4a}, f_{5a}$: 1-dimensionale glättende Regressionssplines zur Beschreibung von nicht-linearen Effekten der Prädiktorvariablen auf den Lageparameter (Niveau) der Höhenkurve (Gl. 3)
- f_{6a} : 2-dimensionaler glättender Regressionsspline zur Beschreibung des räumlichen Trends des Lageparameters (Niveau) der Höhenkurve (Gl. 3)
- p_{0b}, p_{1b}, p_{2b} : Parameter linearer Effekte auf den Steigungsparameter der Höhenkurve (Gl. 3)

Die Variablen Temperatursumme in der Vegetationszeit und Ariditätsindex werden über deutschlandweit gültige Regionalisierungsmodelle in Abhängigkeit von der Seehöhe und der geographischen Lage geschätzt.

Das originäre Höhen-Durchmesser-Modell ist eine von LAPPI (1997) modifizierte Form der Korf-Funktion, die sich durch die biologische Interpretierbarkeit und eine relativ geringe Kollinearität des Lageparameters A und Steigungsparameters B auszeichnet (Gl. 3). Das Modell wurde erweitert, indem in einem ersten Entwicklungsschritt Effekte des Alters auf die Parameter A und B modelliert wurden (Gl. 3.1). Mit Hilfe dieses erweiterten Modells wurden verschiedene Kombinationen der 'nicht-linearen' Parameter C und λ getestet bzw. als Konstanten im Modell verwendet. Die solchermaßen heuristisch ermittelte optimale Parameterkombination von C und λ wurde in den folgenden Parametrisierungsschritten konstant gesetzt, so dass das Modell linear ist und verallgemeinerte additive Modelle zur Quantifizierung der Standorteffekte verwendet werden konnten (Gl. 2).

$$\ln\{E(H_{kti})\} = A + B x_{kti} \quad [3]$$

$$\ln\{E(H_{kti})\} = f_1(\text{Alter}_{kti}) + f_2(\text{Alter}_{kti}) x_{kti} \quad [3.1]$$

mit x_{kti} :

$$x_{kti} = \frac{(BHD_{kti} + \lambda)^{-C} - (30 + \lambda)^{-C}}{(10 + \lambda)^{-C} - (30 + \lambda)^{-C}}$$

und:

- $E(H_{kti})$: Erwartungswert der Baumhöhe von Baum i in Bestand k zum Zeitpunkt t mit $H_{kti} \sim N(\exp(\eta_{kti}), \sigma^2)$
- BHD_{kti} : BHD von Baum i in Bestand k zum Zeitpunkt t [cm]
- A, B, C, λ : Parameter des Höhen-Durchmesser-Modells
- Alter_{kti} : Alter von Baum i in Bestand k zum Zeitpunkt t [J]
- f_1, f_2 : 1-dimensionale glättende Regressionssplines zur Beschreibung von nicht-linearen Effekten der Prädiktorvariablen Alter auf den Lage- A und Steigungsparameter B der Höhenkurve (Gl. 3)

2.2 Methodik der Prognose potenzieller Vulnerabilitäten gegenüber Winterstürmen

Das verwendete empirische Sturmschadenmodell (Gl. 4) ist auf der Grundlage von Schadansprachen in der BWI 2 nach dem Wintersturm "Lothar" in Baden-Württemberg entwickelt worden (SCHMIDT et al. 2010). Die breite Datengrundlage und die enge zeitliche Nähe zwischen dem Wintersturm und dem Inventurzeitpunkt wurden für die Entwicklung eines Modells genutzt, das im Bereich der statistischen Sturmschadenmodelle eine bisher nicht erreichte Sensitivität gegenüber einer Vielzahl von Einflussfaktoren aufweist. Das Modell erlaubt Schätzungen, die sensitiv gegenüber der Baumart(gruppe), dem BHD, der Baumhöhe sowie der Exposition und Exponiertheit des Geländes sind (SCHMIDT et al. 2010). Effekte auf die Sturmschadenswahrscheinlichkeit, die aus der spezifischen Struktur von Beständen (Bestandesstabilität) oder aus der Lage von Beständen zueinander oder in Bezug auf vorgelagerte Waldränder resultieren, können durch das Sturmschadenmodell nicht abgebildet werden.

Eine besondere Problematik bei der Modellierung von Sturmschadensdaten besteht darin, dass im Allgemeinen keine Informationen über das regionale Muster der Windgeschwindigkeiten und anderer Strömungsparameter in der notwendigen Qualität und Auflösung vorliegen. Die regionalen Sturmbedingungen müssen bei der Modellierung aber unbedingt berücksichtigt werden, da sie das Sturmschadensrisiko ganz maßgeblich bestimmen. Die regionalen Unterschiede in der Windgeschwindigkeit werden im verwendeten Sturmmodell durch eine räumliche Trendfunktion bzw. durch die Formulierung eines speziellen verallgemeinerten additiven Regressionsmodells (Gl. 4) beschrieben.

Dabei wird angenommen, dass die regionalen Unterschiede in der Sturmschadenswahrscheinlichkeit, die nicht über die Kovariablen Baumart(gruppe), BHD, Baumhöhe sowie Topex-Indices (Parameter zur Erfassung der Geländeexposition) beschrieben werden können, vor allem durch die regional variierenden Windgeschwindigkeiten bedingt sind. Die geographische Lage dient somit als Proxy-Variable für die Windgeschwindigkeit. Der Effekt der räumlichen Trendfunktion weist beträchtliche Gradienten innerhalb Baden-Württembergs auf, was somit als Ausdruck der unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten beim Durchzug des Wintersturms "Lothar" interpretiert werden kann (Abb. 2).

$$g(\pi_{ijk}) = BA_{ijk}^T \alpha + \log\left(\frac{BHD_{ijk} BA_{ijk}^T \delta}{h_{ijk} - BA_{ijk}^T \gamma}\right) + \beta_1 \text{Top_to_Dist_1}_{ij} + \beta_2 \text{Top_to_Dist_2}_{ij} + \beta_3 \text{Top_to_Dist_3}_{ij} + \beta_4 \text{Top_to_Dist_4}_{ij} + f(\text{RW}_{ij}; \text{HW}_{ij}) \quad [4]$$

mit:

- π_{ijk} : Erwartungswert der Sturmschadenswahrscheinlichkeit
 $\pi_{ijk} = E(y_{ijk})$ von Baum k in Traktecke ij mit $i=1\dots 4$,
 $j=1\dots 4516$ und $y_{ijk} \sim \text{Bernoulli}(\pi_{ijk})$;
- $g(\cdot)$: Logistische Verknüpfungsfunktion;
- BA_{ijk} : Ein Vektor zur Kodierung der Baumartengruppe von Baum ijk [Fichte, Tanne/Douglasie, Kiefer/Lärchen, Buche/Eichen, übrige Laubholzarten];
- BHD_{ijk} : Brusthöhendurchmesser von Baum ijk 1999 [cm];
- h_{ijk} : Baumhöhe von Baum ijk 1999 [m];
- $\text{Top_to_Dist_1}_{ij}$: Modifizierter Topex-to-Distance-Index auf den Expositionen 270 und 240 für Traktecke ij (Abb. 4) [Grad * 10];
- $\text{Top_to_Dist_2}_{ij}$: Modifizierter Topex-to-Distance-Index auf den Expositionen 90 und 60 für Traktecke ij (Abb. 4) [Grad * 10];

- $Top_to_Dist_3_{ij}$: Modifizierter Topex-to-Distance-Index auf den Expositionen 320 und 190 für Traktecke ij (Abb. 4) [Grad * 10];
- $Top_to_Dist_4_{ij}$: Modifizierter Topex-to-Distance-Index auf den Expositionen 140 und 10 für Traktecke ij (Abb. 4) [Grad * 10];
- RW_{ij} : Rechtswert des Mittelpunktes von Traktecke ij (Gauß-Krüger-Koordinate)
- HW_{ij} : Hochwert des Mittelpunktes von Traktecke ij (Gauß-Krüger-Koordinate)
- $\alpha, \delta, \gamma,$: Vektoren von Regressionskoeffizienten;
- $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$: Regressionskoeffizienten;
- f : Zweidimensionaler glättender Regressionsspline zur Erfassung räumlicher Autokorrelation bzw. regionaler Unterschiede

Unter der Annahme, dass die geographische Lage als Ersatz für die regionale Windgeschwindigkeit fungiert, lassen sich in Simulationen die Auswirkungen verschiedener Windgeschwindigkeiten abbilden. Anstelle von konkreten mittleren oder maximalen Windgeschwindigkeiten können allerdings lediglich qualitative Vorgaben gemacht werden. Die Verwendung der Koordinaten der Position 1 bzw. 2 (Abb. 2) würde Bedingungen in Luv bzw. in Lee des Nordschwarzwaldes beim Durchzug des Wintersturms 'Lothar' abbilden.

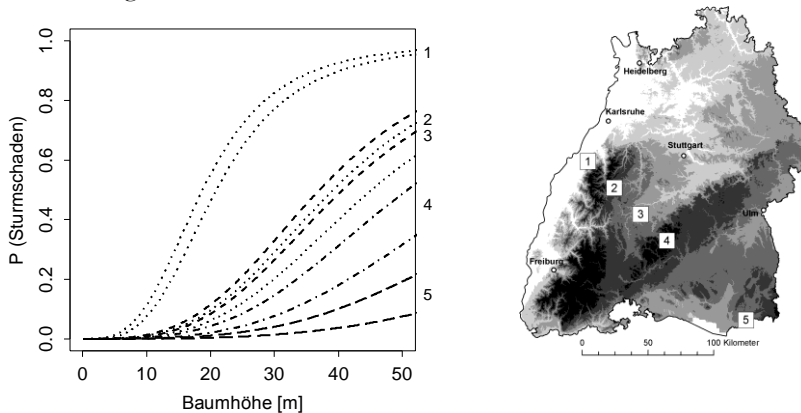


Abbildung 2: Durch die geographische Lage und die Einzelbaumhöhe bedingte Unterschiede der prognostizierten Schadwahrscheinlichkeit, (95% Prognoseintervall). In der Abbildung und der Karte übereinstimmende Ziffern kennzeichnen die Zugehörigkeit der Wahrscheinlichkeitsverläufe zur jeweiligen geographischen Lage. Der BHD wird mit variierender Höhe so verändert, dass ein konstanter b/d -Wert von 80 [cm/cm] resultiert. Die übrigen Prädiktoren wurden konstant gehalten (Baumartengruppe Fichte, Median der Exponiertheit (modifizierte Topex-to-Distance-Indices)).

Die Sensitivität gegenüber der Baumart(gruppe) und der Baumhöhe kann durch eine Modellprognose unter konstanten Randbedingungen dargestellt werden (Abb. 3). Dabei wurden eine durchschnittlich Geländeexponiertheit und eine Windgeschwindigkeit, wie sie durch die Position 1 in Luv des Nordschwarzwaldes repräsentiert wird (Abb. 2), als konstante Prädiktoren verwendet.

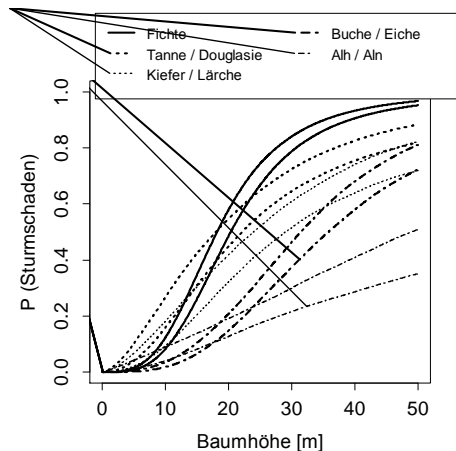


Abbildung 3: Für unterschiedliche Baumartengruppen und variierende Einzelbaumhöhen prognostizierte Schadenswahrscheinlichkeiten (95% Prognoseintervall). Der BHD wird mit variierender Höhe so verändert, dass ein konstanter b/d -Wert von 80 [cm/cm] resultiert. Die übrigen Prädiktoren wurden konstant gehalten (Position 1 in Abb. 2, Median der Exponiertheit (modifizierte Topex-to-Distance-Indices)).

Die Überprägung der Strömungsparameter durch die Topographie wird durch sogenannte Topex-Indices abgebildet, die ebenfalls als Proxy-Variablen fungieren. Zur Erfassung der Exposition und Exponiertheit von Waldbeständen aufgrund der Geländemorphologie werden Varianten des Topex-to-Distance-Index (SCOTT & MITCHELL 2005) eingesetzt. Die Berechnung der Topex-Werte erfolgte für eine Grenzdistanz von 1000 m für die Wald-Traktecken der BWI 2 auf der Grundlage eines digitalen Geländemodells mit 90 m Auflösung (USGS, 2006a, 2006b). Das deutschlandweit zur Verfügung stehende DGM weist damit eine deutlich geringere räumliche Auflösung auf, als das zur Modellentwicklung verwendete DGM mit 25 m Auflösung (SCHMIDT et al. 2010). Die resultierenden Vulnerabilitätsprognosen dürften daher insbesondere in den Bereichen besonders exponierter und geschützter Standorte zu geringeren Sensitivitäten führen. Exakter Bezugspunkt der Topex-to-Distance-Indices ist der jeweilige Trakteckenmittelpunkt.

Im hier verwendeten Modellansatz werden anstelle des originalen summarischen Topex-Wertes vier verschiedene Werte verwendet, die die Exponiertheit in bestimmten Himmelsrichtungen beschreiben (SCHMIDT et al. 2010, Abb. 4).

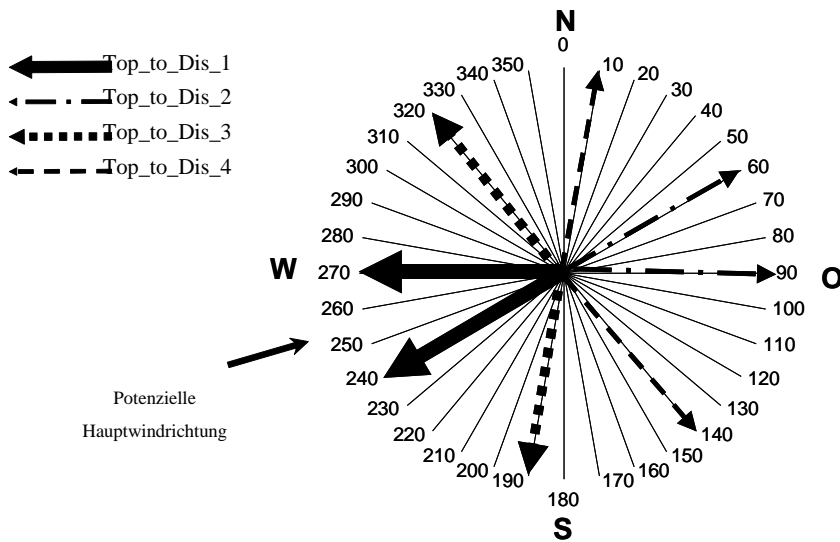


Abbildung 4: Windrose der Himmelsrichtungen für die separate Topex-Werte berechnet wurden. Pfeile markieren Himmelsrichtungen, deren Topex-Werte im Parametrisierungsprozess als Prädiktoren ausgewählt wurden. Die Stärke der Pfeile ist proportional zum Betrag der Regressionskoeffizienten, so dass beispielsweise deutlich wird, dass die Exponiertheit in westlicher Richtung einen ca. 3-fach stärkeren Einfluss auf das Schadrisiko hat als die Exponiertheit in östlicher Richtung. Gleichartige Linientypen kennzeichnen Himmelsrichtungspaare, die aufsummiert die Werte der modifizierten Topex-Indices ergeben.

Die Selektion der spezifischen Himmelsrichtungen erfolgte im Rahmen der Modellselektion unter statistischen Gesichtspunkten (SCHMIDT et al. 2010). Die selektierten Himmelsrichtungen wurden dahingehend interpretiert, dass sie bestimmte relative Abweichungen von einer unterstellten Hauptwindrichtung aufweisen (Abb. 4), deren Topex-Werte eine besonders hohe Korrelation zur Sturmschadenswahrscheinlichkeit zeigen. Himmelsrichtungen, die die gleiche Abweichung von dieser hypothetischen Hauptwindrichtung aufweisen, wurden summiert, da es als physikalisch irrelevant angesehen werden kann, ob eine Abweichung im oder gegen den Uhrzeigersinn auftritt. Der Topexwert mit dem stärksten Effekt auf die Sturmschadenswahrscheinlichkeit ist dabei der Top_to_Dis_1, dessen Wertepaar die unterstellte Hauptwindrichtung des Wintersturms 'Lothar' genau einfasst (Abb. 4). Positive Topexwerte kennzeichnen geschützte Lagen, Werte um Null ebene Lagen und negative Werte exponierte Lagen. Der Grad der Exponiertheit bzw. Geschützttheit nimmt mit dem Betrag zu. Unter dieser Annahme lassen sich in Szenariosimulationen auch Winterstürme mit einer abweichenden Hauptwindrichtung berücksichtigen. Dazu werden die Himmelsrichtungen, für die die Topex-Indices berechnet werden, so um einen einheitlichen Winkel gedreht, dass die unterstellte Hauptwindrichtung durch die Himmelsrichtungen des Top_to_Dis_1 genau eingefasst wird.

Die Sensitivität gegenüber der Geländeexponiertheit und der Baumhöhe kann ebenfalls durch eine Modellprognose unter konstanten Randbedingungen dargestellt werden (Abb. 5).

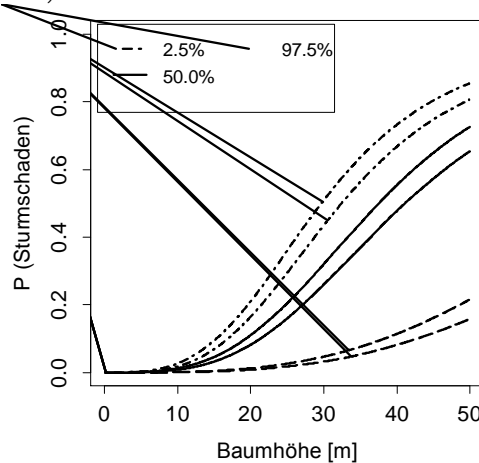


Abbildung 5: Durch die Geländeexponiertheit auf den Expositionen 270 und 240 ° (*Top_to_Dis_1*, Abb. 4) und die Einzelbaumhöhe bedingte Unterschiede der prognostizierten Schadwahrscheinlichkeit (95% Prognoseintervall). Der *Top_to_Dis_1* wird in den Ausprägungen 2,5% 50% und 97,5%-Quantil der Parametrierungsgrundlage variiert. Der BHD wird mit variierender Höhe so verändert, dass ein konstanter h/d -Wert von 80 [cm/cm] resultiert. Die übrigen Prädiktoren wurden konstant gehalten (Baumartengruppe Fichte, Mediane der übrigen *Topex-to-Distance Indices*, Position 1 in Abb. 2).

2.3 Hochrechnung von Waldflächen

Die durch eine Traktecke repräsentierte Waldfläche entspricht ihrem Repräsentationsfaktor aus der BWI 2, wobei die Repräsentationsfaktoren aus der Anzahl der Wald- und Nichtwaldecken sowie der Gesamtfläche des zugehörigen Verdichtungsgebietes hergeleitet werden:

$$\text{Waldfläche}_{\text{rep}_k} = \text{Repräsentationsfaktor}_k \quad [5]$$

mit:

Repräsentationsfaktor_k : Repräsentationsfaktor der Traktecke k an der Fläche des jeweiligen Verdichtungsgebietes der BWI 2 [ha].

3 Ergebnisse

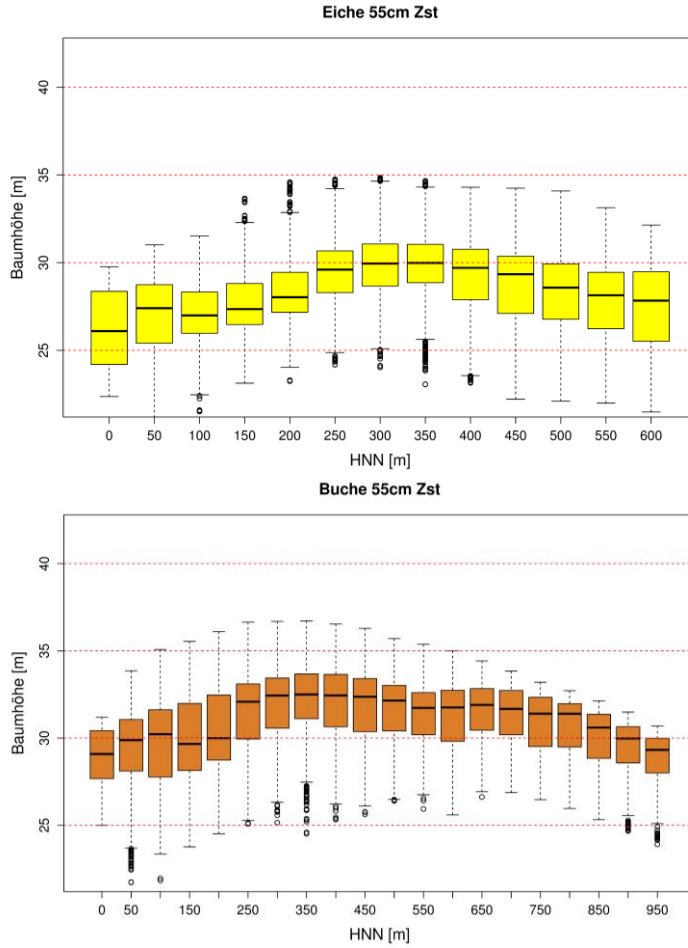
3.1 Initialisierung potenzieller Bestockungen

Im Folgenden werden die prognostizierten Baumhöhen bzgl. ihrer Sensitivität gegenüber der Seehöhe und eines geographischen Nord-Südgradienten überprüft. Eine möglichst hohe und plausible Sensitivität bzgl. dieser subsummierenden Proxyvariablen ist die Voraussetzung für eine realistische Prognose, da die Baumhöhe einen starken Effekt auf die Vulnerabilität hat. Die prognostizierten Baumhöhen zeigen in Abhängigkeit von der Seehöhe plausible Muster (Abb. 6). Für die folgenden beispielhaften Darstellungen wurde zu Vergleichszwecken eine einheitliche Zielstärke von 55 cm für alle Baumarten verwendet (Abb. 6, Abb. 7, Abb. 8, Tab. 2). Zur Vermeidung von Prognosen im Extrapolationsbereich wurden dabei die folgenden Seehöhen als baumartenspezifische Obergrenzen definiert, oberhalb derer keine Schätzungen erfolgen:

- Eiche: 600 m
- Douglasie: 700 m
- Kiefer: 760 m
- Buche: 950 m
- Fichte: 1050 m

Alle Baumarten weisen tendenziell niedrigere Baumhöhen im Bereich geringer Seehöhen auf. Der Wertebereich geringer Seehöhen wird vom Norddeutschen Tiefland dominiert, das insgesamt sowohl bzgl. der Boden- als auch der Klimaparameter ungünstigere Wuchsbedingungen aufweist als die unteren und mittleren Lagen der Mittelgebirge. Mit zunehmender Seehöhe verschlechtern sich die Wuchsbedingungen vor allem aufgrund der sinkenden Temperatursummen in den Hochlagen der Mittelgebirge und Alpen wieder. Daher zeigen bis auf die Kiefer alle Baumarten ein mehr oder weniger ausgeprägtes Optimum. Allerdings verschiebt sich dieser Optimumbereich von Douglasie und Eiche über Buche zu Fichte in immer größere Seehöhen (Abb. 6), wodurch einerseits das Wärmebedürfnis aber auch die Anforderungen an die Wasserversorgung der Baumarten realistisch abgebildet werden. Bei der Interpretation ist zu beachten, dass die abgedeckten Seehöhenbereiche der Baumarten unterschiedliche Obergrenzen aufweisen. Die bzgl. der Temperatur am wenigsten sensitive Baumart Kiefer weist bis 800 m kein Optimum auf. Generell ist zu beachten, dass in den eindimensionalen Darstellungen innerhalb einer Seehöhenstufe immer unterschiedliche Standortbedingungen subsummiert sind. So sind beispielsweise in der Seehöhenstufe 800 m für die Fichte als Hochleistungsstandorte zu bewertende Wald-Traktecken im Alpenvorland mit relativ ungünstigen Standorten in den Harzhochlagen zusammengefasst. Diese unterschiedlichen Standortbedingungen resultieren in der bedingten Streuung der Baumhöhenschätzung innerhalb einer

Seehöhenstufe (Abb. 6). Weiterhin ist zu beachten, dass die Baumhöhen bei Zielstärke in Abhängigkeit des Standortes zu unterschiedlichen Altern erreicht werden und somit keine absoluten Höhenbonitäten darstellen.



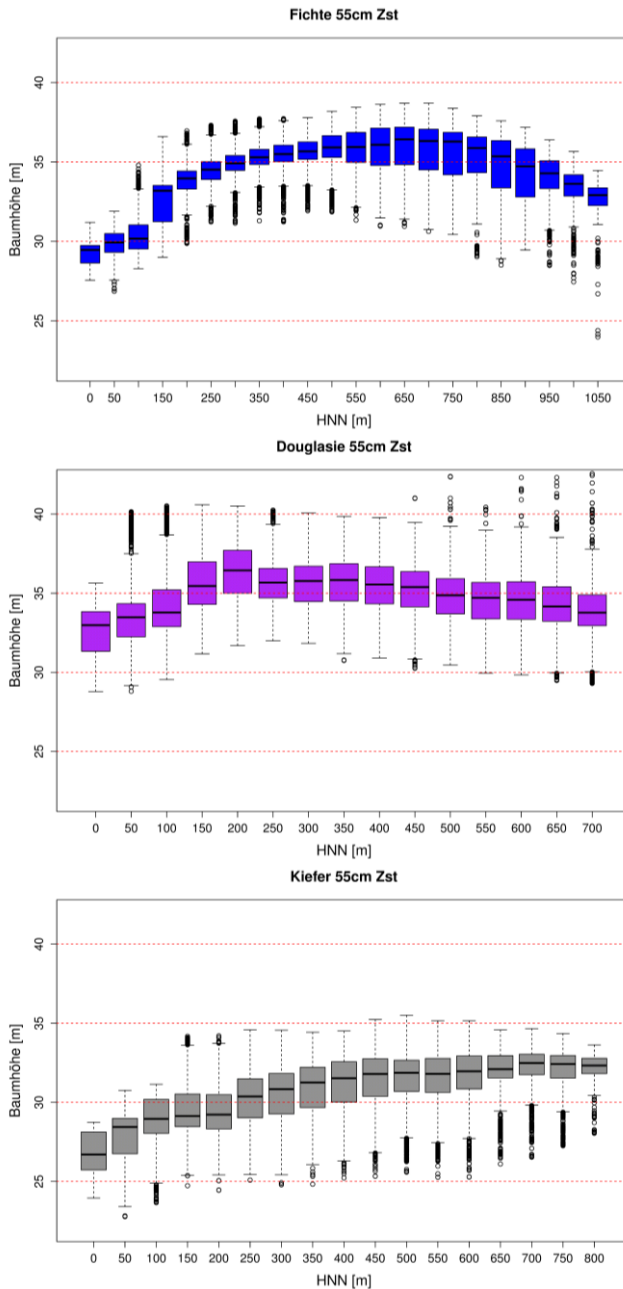
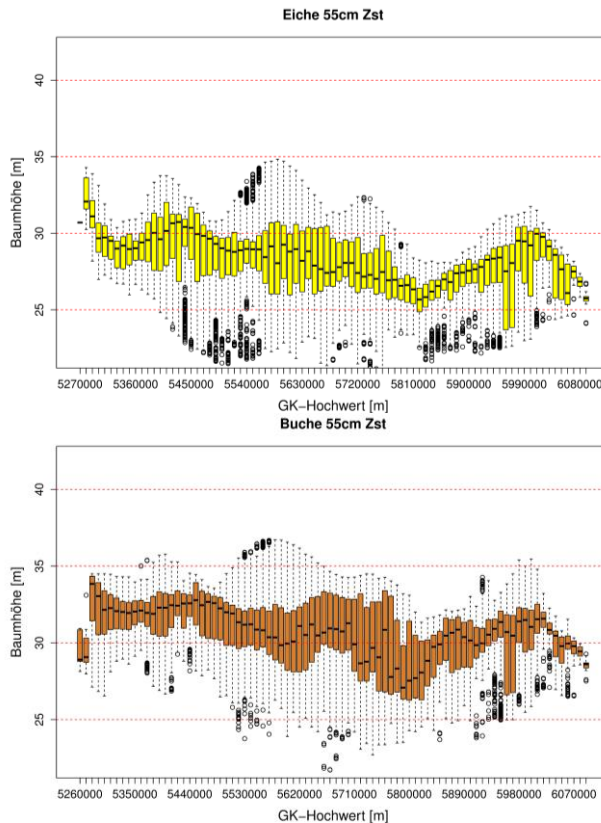


Abbildung 6: Verteilungen (Boxplots) der prognostizierten Baumhöhe für 53.977 Wald-Traktecken der BWI 2 über der Seehöhe (HNN [m]) für Eiche, Buche, Fichte, Douglasie und Kiefer bei einer einheitlichen Zielstärke von 55 cm. Die Seehöhenstufen sind jeweils durch ihre Obergrenze definiert.

Die Nord-Süd-Gradienten der Höhenschätzungen für die Baumarten zeigen ebenfalls plausible und insgesamt ähnliche Muster (Abb. 7). Tendenziell sinken die Baumhöhenschätzungen von Süden nach Norden bis in den Bereich der Mittelgebirgsschwelle mehr oder weniger deutlich ab. Ein etwas abweichendes Muster zeigt die Douglasie, für die bis in den Bereich der Mittelgebirgsschwelle von Süden nach Norden insgesamt leicht ansteigende Baumhöhen prognostiziert werden. Mit Erreichen des Tieflandes sinken die Baumhöhen dann deutlich, wobei dieses Muster bei der Fichte am deutlichsten ausgeprägt ist. Bei Eiche, Buche und Kiefer nehmen die Baumhöhen mit zunehmenden Gauß-Krüger-Hochwerten anschließend wieder zu, was auf den Übergang zwischen den Standorten des Alt- und Jungpleistozäns zurückzuführen sein könnte.

Auch in dieser Darstellung ist zu beachten, dass die Stufen der Gauß-Krüger-Koordinaten eine Vielzahl von Standortvariablen subsumieren, was in der bedingten Streuung innerhalb der Stufen resultiert. Weiterhin sind bei der Interpretation die baumartenspezifischen Seehöhen-Obergrenzen der Prognosen zu berücksichtigen. Auch weisen die Stufen an den Rändern des Nord-Süd-Gradienten teilweise eine nur geringe Besetzung auf.



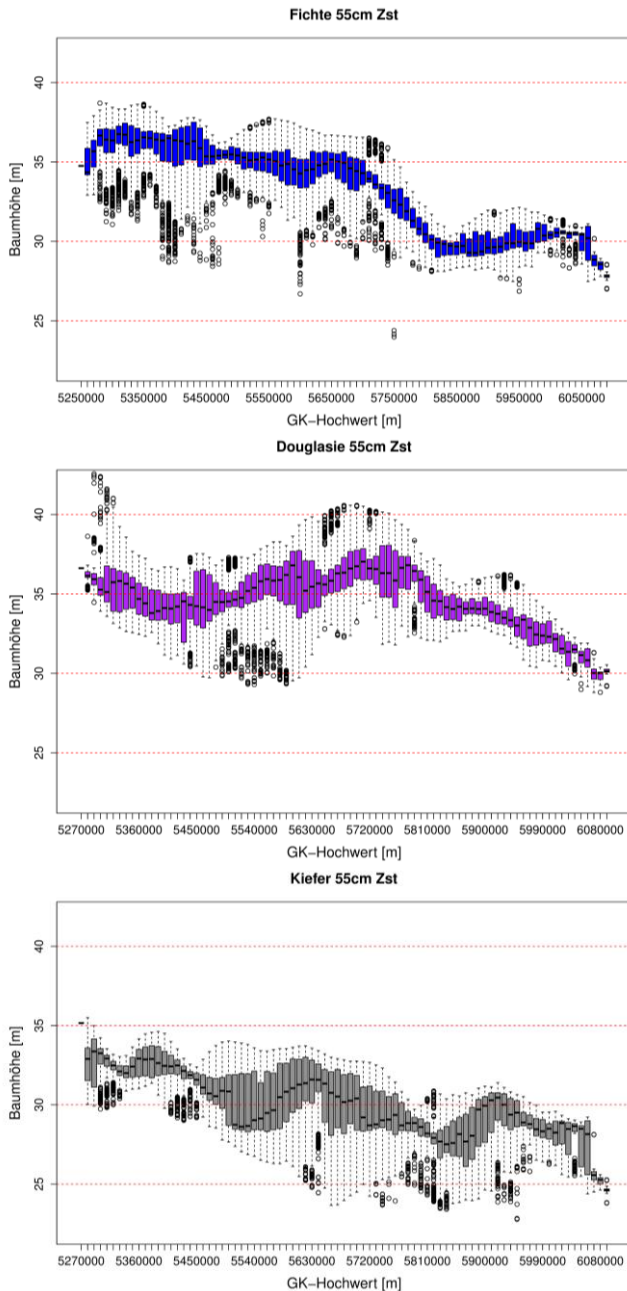
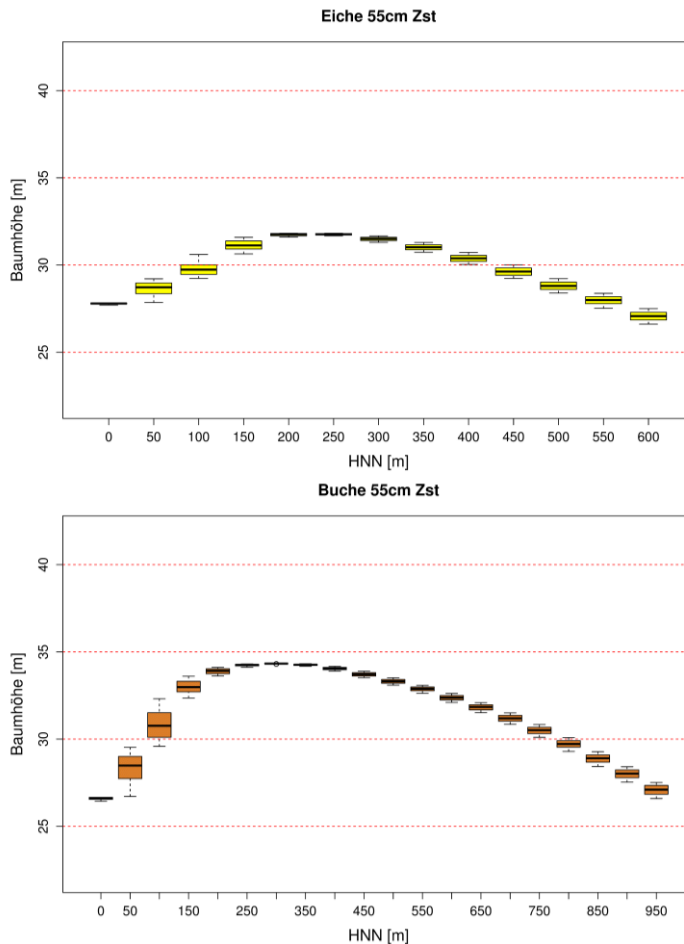


Abbildung 7: Verteilungen (Boxplots) der prognostizierten Baumhöhe für 53.977 Wald-Traktecken der BWI 2 über dem geographischen Hochwert (Gauß-Krüger, 3.-ter Meridian) für Eiche, Buche, Fichte, Douglasie und Kiefer bei einer einseitlichen Zielstärke von 55 cm. Die Stufen des Hochwertes sind jeweils durch ihre Obergrenze definiert.

In den bisherigen Darstellungen weisen die bedingten Verteilungen innerhalb der Stufen der Seehöhe und des Gauß-Krüger-Hochwertes eine relativ hohe Streuung auf, die aus der Zusammenfassung verschiedener Standorte unterschiedlicher Seehöhe und geographischer Lage resultiert. Für die Sensitivitätsanalyse wurde daher exemplarisch eine Prognose der Baumhöhen entlang eines Höhengradienten für eine konstante geographische Position durchgeführt. Dazu wurden die Modelle mit den originalen Seehöhenwerten der Wald-Traktecken aber beispielhaft einheitlich mit den Koordinaten des Brockens initialisiert (Abb. 8). Die deutlich reduzierte bedingte Streuung in den Seehöhenstufen resultiert in diesem Fall lediglich aus der Variabilität der Seehöhenwerte innerhalb der Stufen. Gleichzeitig bilden sich deutlichere Höhengradienten bzw. eindeutige Optimumverläufe heraus.



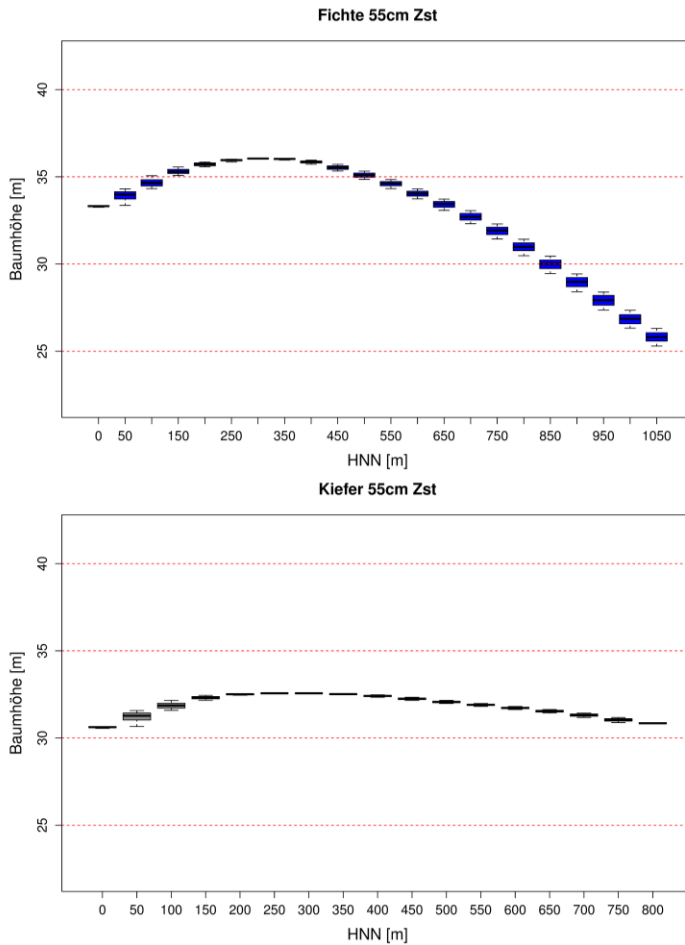


Abbildung 8: Verteilungen (Boxplots) der prognostizierten Baumhöhe für 53.977 Wald-Traktecken der BWT 2 über der Seehöhe (HNN [m]) für Eiche, Buche, Fichte und Kiefer bei einer einheitlichen Zielstärke von 55 cm, wobei einheitlich die geographische Lage des Brockens zur Ableitung der Effekte klimatischer Variablen auf die Baumhöhenschätzung verwendet wurde. Die Seehöhenstufen sind jeweils durch ihre Obergrenze definiert.

Die Gesamtverteilungen der prognostizierten Baumhöhe bei Zielstärke spiegeln die Variabilität der Schätzungen über alle Waldstandorte ausschließlich der Stichproben oberhalb der baumartenspezifischen Seehöhengrenzen wider (Tab. 2).

Tabelle 2: Verteilungen der prognostizierten Baumhöhe [m] bei einer Zielstärke von 55 cm für die Baumarten Eiche, Buche, Fichte, Douglasie und Kiefer an den Wald-Traktecken der BWI 2. Für die Baumarten gelten spezifische obere Grenzwerte der Seehöhe, bis zu denen eine Prognose erfolgt (Eiche: 600 m, Buche: 950 m, Fichte: 1050 m, Douglasie: 700, Kiefer: 760 m).

	Quantile										
	0%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
Eiche	20,9	25,2	26,3	27,0	27,7	28,4	29,1	29,7	30,3	31,1	34,8
Buche	21,7	27,9	29,2	30,0	30,6	31,3	31,9	32,4	32,9	33,6	36,7
Fichte	24,0	29,8	30,7	32,8	33,9	34,7	35,3	35,7	36,3	36,9	38,7
Douglasie	28,8	32,4	33,3	33,7	34,2	34,7	35,2	35,8	36,4	37,1	42,6
Kiefer	22,8	27,8	28,5	29,0	29,8	30,6	31,3	31,9	32,4	33,1	35,5

Insgesamt kann nachgewiesen werden, dass die Prognosen der Baumhöhe bei (Ziel-)stärke eine deutliche und plausible Sensitivität bzgl. der Seehöhe bzw. der geographischen Lage aufweisen. Letztere wird dabei anhand des Nord-Süd-Gradienten dargestellt, während auf die Darstellung des West-Ost-Gradienten bzw. weitere regionale Vergleiche verzichtet wird. Differenzierungen aufgrund kleinräumig variierender bodenkundlicher Standortparameter können nicht abgebildet werden, da derartige Informationen aktuell nicht flächendeckend für die BWI zur Verfügung stehen. Als weitere Schwierigkeit sind in diesem Zusammenhang die länderspezifischen bzw. uneinheitlichen Kartierverfahren zu nennen. Die hier durchgeführte standortspezifische Prognose der Baumhöhe ermöglicht es somit, realistische Baumhöhen unter Berücksichtigung großräumiger regionaler Gradienten und eines Seehöhengradienten abzubilden bzw. als Eingangsparameter für die eigentliche Vulnerabilitätsprognose bereitzustellen.

3.2 Prognose potenzieller Vulnerabilitäten gegenüber Winterstürmen

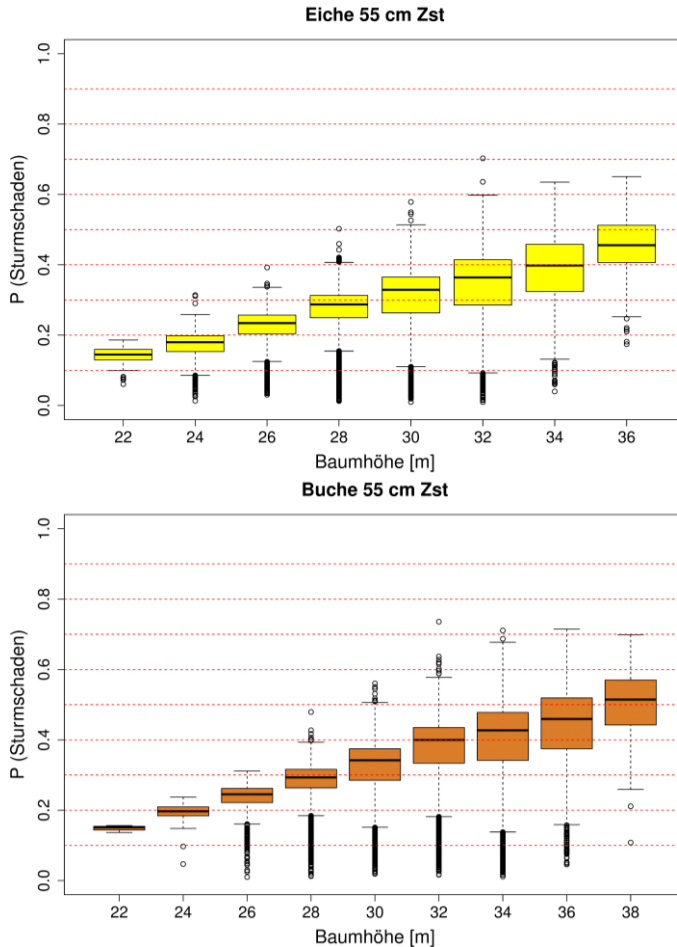
Die Vulnerabilitätsprognosen basieren auf den folgenden Eingangsdaten:

- BHD 20-70 cm in einem Intervall von 5 cm
- Zugehörige standortsensitiv geschätzte Baumhöhen
- Die Windintensität wurde über eine Koordinate in Luv des Nordschwarzwaldes eingesteuert (Position 1 in Abb. 2). Derartige Bedingungen sind auf ganz Deutschland angewendet ein extrem unwahrscheinliches Szenario. In der folgenden Untersuchung geht es aber darum, die Vulnerabilität möglichst sensitiv einzuschätzen, wofür extreme Randbedingungen eine bessere Trennschärfe aufweisen. Eine realitätsnahe Prognose des Risikopotentials würde dagegen realistische meteorologische Prognosen über die Intensität und Frequenz von Winterstürmen voraussetzen, die aktuell nicht zur Verfügung stehen.
- Bezüglich der Hauptwindrichtung wurde jeweils ein Wintersturm aus exakt südwestlicher bzw. nordwestlicher Richtung unterstellt und die resultierenden Schadwahrscheinlichkeiten anschließend gemittelt. Regionale Muster der Häufigkeitsverteilungen der Hauptwindrichtung von Winterstürmen standen als Eingangsparameter nicht zur Verfügung.
- Topexwerte der Mittelpunktkoordinaten der Wald-Traktecken bei südwestlicher bzw. nordwestlicher Hauptwindrichtung.

Die Sensitivitätsanalyse der prognostizierten Vulnerabilitäten dient der Plausibilitätsprüfung und als Grundlage für die Interpretation der abschließenden Flächenhochrechnungen (Abb. 1). Exemplarisch werden Prognosen der Vulnerabilität über Stufen von prognostizierten Baumhöhen (Abb. 9) und der Geländeexponiertheit (Abb. 11) bei einer Zielstärke von 55 cm unter den definierten Randbedingungen (s.o.) dargestellt. Ergänzend erfolgt für Fichte ein Vergleich der Vulnerabilitäten für Zielstärken von 55 und 40 cm (Abb. 10). Artspezifische Zielstärken werden in dieser exemplarischen Darstellung nicht verwendet, da diese u.a. regional variieren und sich die baumarten- und geländebedingten Unterschiede unter konstanten Randbedingungen einfacher interpretieren lassen.

Alle untersuchten Baumarten weisen plausible Verläufe mit im Mittel steigenden Sturmschadenswahrscheinlichkeiten über der Baumhöhe auf. Das Gesamtniveau der Vulnerabilität steigt von Eiche über Buche, Kiefer und Douglasie zu Fichte hin an, was mit forstlichem Expertenwissen übereinstimmt. Douglasie weist einen relativ geringen Gradienten über den Baumhöhenbereich auf, was auf die im Baumartenvergleich deutlich größeren prognostizierten Baumhöhen zurück geführt werden kann. Fichte und Douglasie weisen unter den unterstellten extremen Windgeschwindigkeiten einen deutlichen Anstieg der

Vulnerabilität zwischen 20 und 30 m Baumhöhe auf (Abb. 3). Die prognostizierten Baumhöhen der Douglasie liegen jedoch größtenteils oberhalb dieses besonders sensitiven Bereiches (Abb. 9). Insbesondere die prognostizierten Baumhöhen für Buche und Eiche aber auch für Kiefer und Fichte liegen demgegenüber in Bereichen, in denen unter den unterstellten Randbedingungen deutlich stärkere Gradienten der prognostizierten Sturmschadenswahrscheinlichkeit auftreten (Abb. 3). Die bedingte Streuung innerhalb der Baumhöhenstufen wird ausschließlich durch die Variabilität der Baumhöhe innerhalb einer Stufe sowie durch die Variabilität der Topex-to-Distance Indices verursacht, da die übrigen Prädiktoren konstant sind. Die beiden untersten Stufen bei der Fichte und die oberste Stufe bei der Douglasie weisen eine sehr geringe Belegung auf, so dass die zugehörigen Boxplots nicht interpretierbar sind. Bei der Interpretation sind ferner die für die Baumhöhenschätzung definierten baumartenspezifischen Obergrenzen der Seehöhe zu beachten (s. Kapitel 3.1).



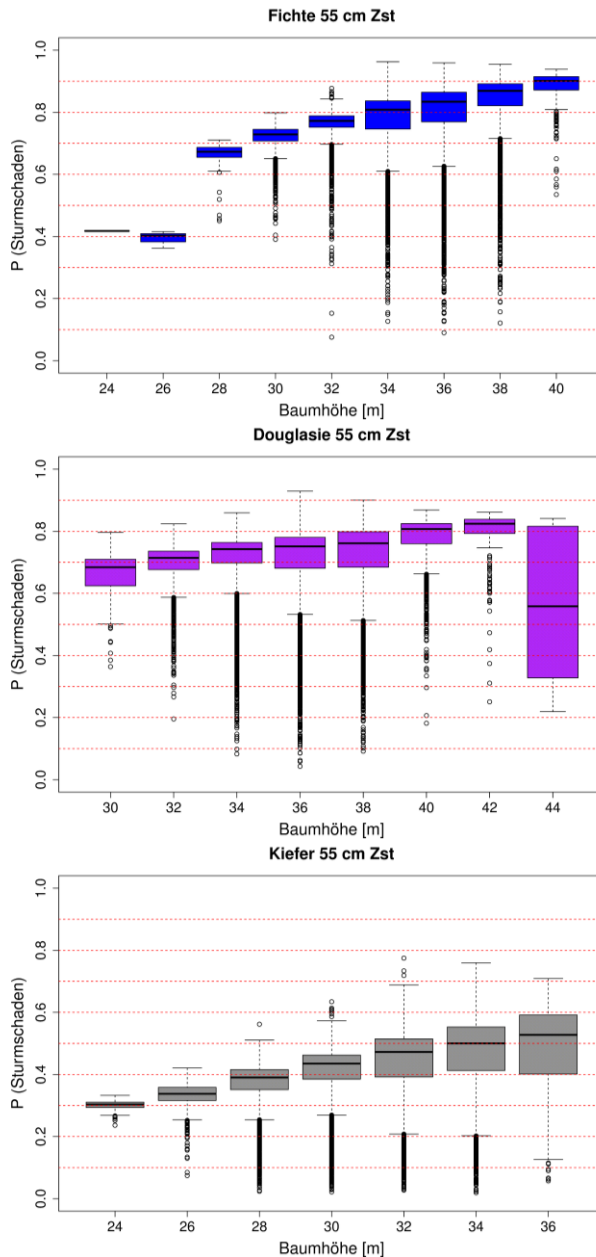


Abbildung 9: Verteilungen (boxplots) der prognostizierten Sturmschadenwahrscheinlichkeit für 53.977 Wald-Traktecken der BWI 2 über der Baumhöhe für Eiche, Buche, Fichte, Douglasie und Kiefer bei einer einheitlichen Zielstärke von 55 cm. Die Baumhöhenstufen sind jeweils durch ihre Obergrenze definiert. Die Schadenwahrscheinlichkeiten werden als Mittel der Prognosen eines Sturmes aus südwestlicher und nordwestlicher Richtung bestimmt.

Durch eine beispielhafte Reduktion der Zielstärke für Fichte von 55 auf 40 cm wird das Vulnerabilitätsniveau insgesamt gesenkt (Abb. 10), wobei der Mittelwert von 0,791 auf 0,758 sinkt. Beim Vergleich derselben Baumhöhenstufe weist dagegen die geringere Zielstärke aufgrund der höheren H/D-Werte höhere Vulnerabilitäten auf (Abb. 10). Die beiden untersten Baumhöhenstufen weisen auch für eine Zielstärke von 40 cm eine nur sehr geringe Belegung auf.

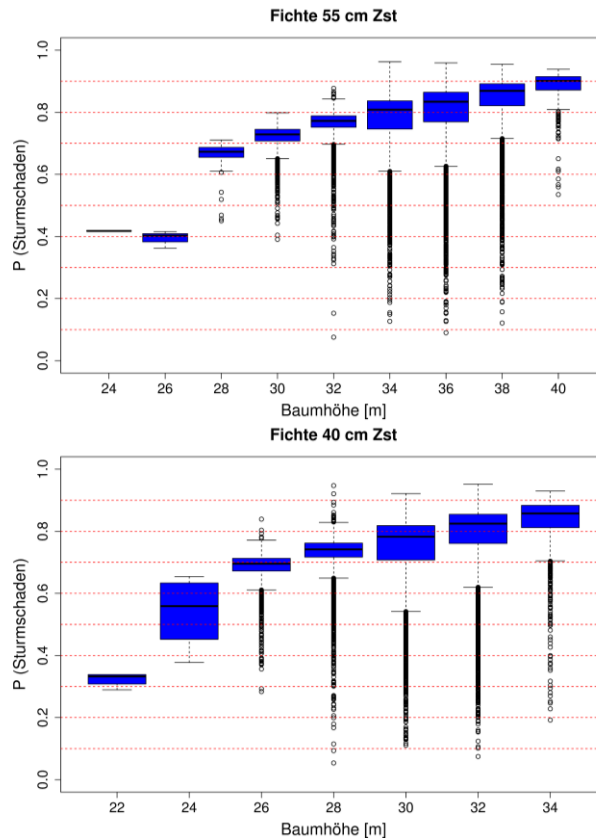
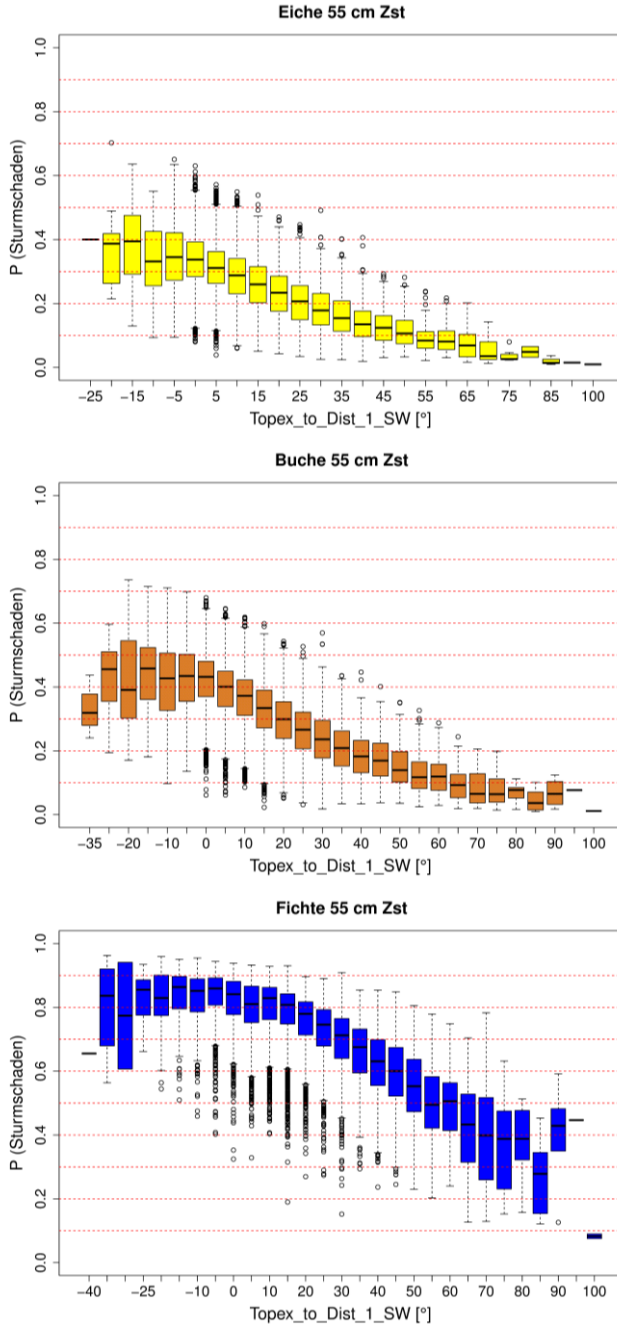


Abbildung 10: Verteilungen (boxplots) der prognostizierten Sturmschadenswahrscheinlichkeit für 53.977 Wald-Traktecken der BWI 2 über der Baumhöhe für Fichte bei einer Zielstärke von 55 (oben) bzw. 40 cm (unten). Die Baumhöhenstufen sind jeweils durch ihre Obergrenze definiert. Die Schadenswahrscheinlichkeiten werden als Mittel der Prognosen eines Sturmes aus südwestlicher und nordwestlicher Richtung bestimmt.

Die Vulnerabilitäten weisen für alle Baumarten deutliche Gradienten über der Geländeexponiertheit auf (Abb. 11). Der Verlauf der Vulnerabilität wird exemplarisch über dem Topex-to-Distance Index 1 (Abb. 4) bei südwestlicher Windrichtung dargestellt. Abgesehen von den baumartenspezifischen Niveauunterschieden treten für die Baumarten ähnliche und plausible Muster auf. So

weisen besonders geschützte Traktecken, die durch hohe Topex-Werte gekennzeichnet sind, im Mittel die geringste Vulnerabilität auf.



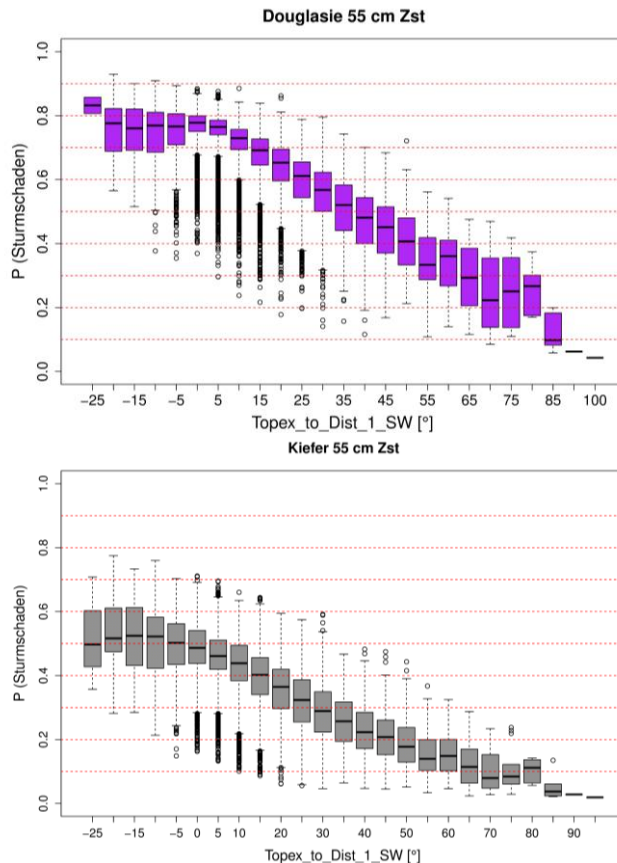


Abbildung 11: Verteilungen (boxplots) der prognostizierten Sturmenschadenswahrscheinlichkeit für 53.977 Wald-Traktecken der BWI 2 über den zugehörigen Werten des Topex-to-Distance Index 1 (Abb. 4) bei Annahme eines Sturmes aus südwestlicher Richtung für Eiche, Buche, Fichte, Douglasie und Kiefer bei einer einheitlichen Zielstärke von 55 cm. Die Stufen der Indexwerte sind jeweils durch ihre Obergrenze definiert. Die Schadenswahrscheinlichkeiten werden als Mittel der Prognosen eines Sturmes aus südwestlicher und nordwestlicher Richtung bestimmt.

Mit sinkenden Topex-Werten bzw. steigender Exponiertheit nimmt die Vulnerabilität zu. Im Bereich schwach geschützter (Fichte, Douglasie) bzw. ebener Lagen (Eiche, Buche, Kiefer) werden Niveaus hoher Vulnerabilität erreicht. Mit weiterer Zunahme der Exponiertheit nehmen die Vulnerabilitäten für Eiche, Douglasie und Kiefer anschließend nur noch geringfügig zu oder verbleiben auf dem erreichten Niveau (Abb. 11). Die Prognosen für Buche und Fichte umfassen aufgrund der baumartenspezifischen höheren Seehöhenobergrenzen auch stärker exponierte Traktecken als die der übrigen Baumarten. Für diesen Bereich treten bei Buche und Fichte teilweise wieder abnehmende Vulnerabilitäten auf. Als Ursache dieser konstanten oder sogar leicht abnehmenden Vulnerabilitäten ist die

Korrelation zwischen der Exposition und der Seehöhe zu nennen. Es ist davon auszugehen, dass besonders exponierte Standorte wie Berggipfel und -kämme im Durchschnitt größere Seehöhen aufweisen, als ebene oder geschützte Lagen. Die prognostizierten Baumhöhen stark exponierter Traktecken sind damit tendenziell niedriger als die ebener oder geschützter Traktecken. Der Effekt der stärkeren Exponiertheit wird damit durch den Effekt niedrigerer Baumhöhen (über-) kompensiert. Auch lässt der Gradient des Modelleffektes der Exponiertheit unter den unterstellten Randbedingungen mit zunehmender Exponiertheit nach, so dass die Unterschiede zwischen geschützten und ebenen Lagen größer sind als zwischen ebenen und besonders exponierten Lagen (Abb. 5).

3.3 Waldflächenverteilungen nach Stufen potenzieller Vulnerabilität

Die erstellte Ergebnisdatenbank enthält für jede der 53.977 Wald-Traktecken 60 Vulnerabilitätswerte, die sich aus den 5 untersuchten Baumarten und je 12 unterschiedlichen Zielstärken ergeben. Die folgenden Hochrechnungen sind als beispielhafte Darstellungen bzw. Auswertungen zu sehen, da die gesamte Ergebnisdatenbank nur in Auszügen erläutert werden kann.

Die Waldflächenverteilungen in Deutschland differenziert nach Stufen der potenziellen Vulnerabilität weisen in Abhängigkeit von der Normbestockung beträchtliche Unterschiede auf. Exemplarisch werden Verteilungen für eine einheitliche Zielstärke von 55 cm für die untersuchten Baumartengruppen dargestellt (Abb. 12). Die prognostizierten Vulnerabilitäten werden dabei in 10 gleich breite Risikostufen im theoretisch möglichen Intervall $[0,1]$ eingeteilt. Der Wert 1 entspricht einer 100%-tigen Schadwahrscheinlichkeit während beim Wert 0 überhaupt kein Schaden zu erwarten wäre. Die sehr hohe Vulnerabilität der Fichte und die hohe Vulnerabilität der Douglasie werden in den Flächenstatistiken deutlich, ebenso wie die geringe Vulnerabilität der Eiche und die Mittelstellung der Kiefer. Die größte Waldfläche liegt bei Fichte in der Stufe 0,9, bei Douglasie in der Stufe 0,8, bei Kiefer in der Stufe 0,5, bei der Buche in der Stufe 0,4 und bei Eiche in der Stufe 0,3. Gleichzeitig werden die Verteilungen bei Fichte und Douglasie von zwei bzw. einer Stufe dominiert, während Kiefer, Eiche und Buche etwas gleichmäßigere Verteilungen aufweisen. Die Mittelwerte der Verteilungen betragen für die Fichte: 0,79, die Douglasie: 0,72, die Kiefer: 0,43, die Buche: 0,37 und die Eiche 0,29. Bei der Interpretation sind die unterschiedlichen baumartenspezifischen Seehöhenobergrenzen der Prognosen zu beachten.

Der Baumarteneffekt für Buche und Eiche ist im Sturmschadenmodell identisch (Abb. 3, SCHMIDT et al., 2010), so dass die geringere Gefährdung der Eiche in diesem Fall nur aus den im Mittel geringeren Baumhöhen resultiert. Alle anderen Baumarten unterscheiden sich demgegenüber sowohl aufgrund von Effekten der Baumart als auch der prognostizierten Baumhöhen.

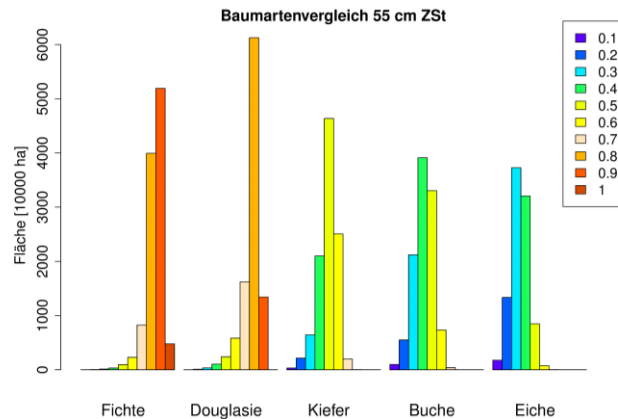


Abbildung 12: Flächenverteilungen des Waldes in Deutschland differenziert nach Vulnerabilitätsstufen gegenüber Winterstürmen für unterschiedliche Normbestockungen bei einer einheitlichen Zielstärke von 55 cm. Die Schadenswahrscheinlichkeiten werden als Mittel der Prognosen eines Sturmes aus südwestlicher und nordwestlicher Richtung bestimmt. Die Vulnerabilitätsstufen sind durch Ihre Obergrenze definiert.

Obwohl eine einheitliche Zielstärke für Vergleichszwecke sinnvoll ist, weisen die Baumarten in der forstlichen Praxis mehr oder wenige große Abweichungen in den Zielstärken auf. Beispielhaft wird daher der Effekt der Zielstärke für Fichte, Douglasie und Buche dargestellt (Abb. 13, 14, 15). Für die drei Baumarten wird ein Zielstärkenbereich von 40 cm betrachtet. Aufgrund der üblicherweise höheren Zielstärken von Douglasie und Buche wird hier der Bereich von 75-35 cm und bei Fichte der Bereich von 65-25 cm betrachtet.

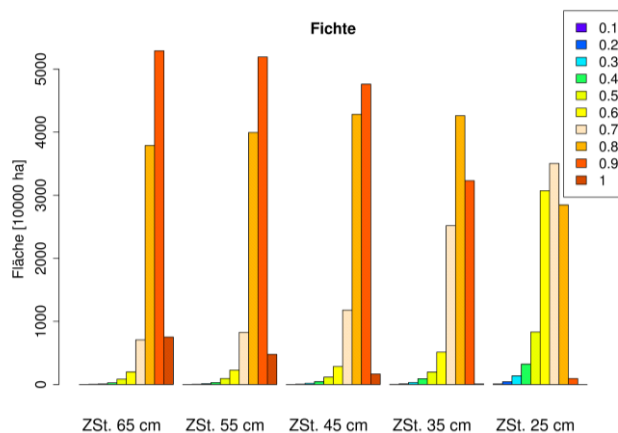


Abbildung 13: Flächenverteilungen des Waldes in Deutschland differenziert nach Vulnerabilitätsstufen gegenüber Winterstürmen für Normbestockungen von Fichte mit unterschiedlichen Zielstärken. Die Schadenswahrscheinlichkeiten werden als Mittel der Prognosen eines Sturmes aus südwestlicher und nordwestlicher Richtung bestimmt. Die Vulnerabilitätsstufen sind durch Ihre Obergrenze definiert.

Es wird deutlich, dass Fichte und Douglasie in den betrachteten Zielstärkenbereichen eine sehr viel höhere Sensitivität aufweisen, als Buche. So liegt die größte Waldfläche für die Zielstärken 65, 55 und 45 cm bei der Fichte in der Stufe 0,9 für die Zielstärke 35 cm in der Stufe 0,8 und für die Zielstärke 25 cm in der Stufe 0,7 (Abb. 13). Für die Douglasie liegt die größte Waldfläche bei einer Zielstärke von 75 cm in der Stufe 0,9, bei Zielstärken von 65, 55 und 45 cm in der Stufe 0,8 und bei einer Zielstärke von 35 cm in der Stufe 0,7 (Abb. 14). Dagegen liegt die größte Waldfläche bei der Buche über den betrachteten Bereich konstant in der Stufe 0,4. Insgesamt findet aber auch hier eine Verlagerung der Verteilungen mit sinkender Zielstärke hin zu niedrigeren Vulnerabilitätsstufen statt. Diese Verlagerung ist dabei im Bereich 75-55 cm Zielstärke wenig ausgeprägt, während die Absenkungen auf 45 und besonders 35 cm zu etwas stärkeren Veränderungen führen (Abb. 15). Bei der Fichte treten im Bereich von 65 bis 45 cm Zielstärke bei einer insgesamt viel stärkeren Dynamik relativ geringe Verlagerungen auf (Abb. 13). Deutliche Verlagerungen hin zu niedrigeren Vulnerabilitätsstufen bewirken die Absenkungen der Zielstärke auf 35 und 25 cm. Die grundsätzlich hohe Vulnerabilität der Fichte wird daran deutlich, dass die Waldflächenverteilung der Douglasie mit 75 cm Zielstärke in etwa der Waldflächenverteilung der Fichte bei 40 cm Zielstärke entspricht. Absenkungen der Zielstärke bei der Douglasie (Abb. 14) resultieren im Gegensatz zur Fichte über den gesamten betrachteten Bereich in deutlichen Verlagerungen der Waldflächenverteilungen hin zu geringeren Vulnerabilitäten. Eine besonders starke Reduktion der Vulnerabilität tritt dabei durch eine Absenkung der Zielstärke von 45 auf 35 cm auf.

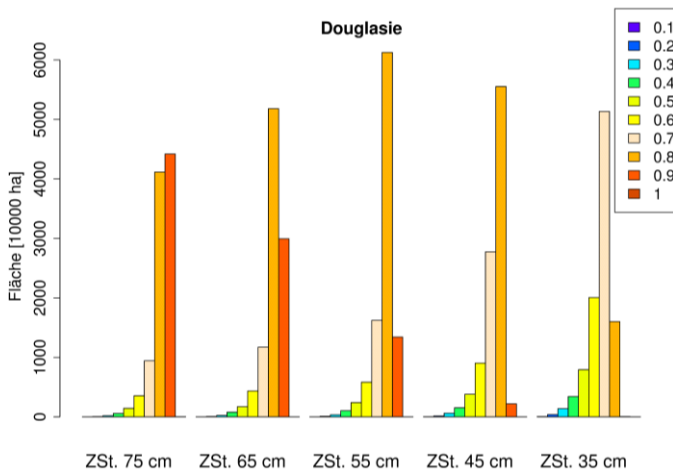


Abbildung 14: Flächenverteilungen des Waldes in Deutschland differenziert nach Vulnerabilitätsstufen gegenüber Winterstürmen für Normbestockungen von Douglasie mit unterschiedlichen Zielstärken. Die Schadenswahrscheinlichkeiten werden als Mittel der Prognosen eines Sturmes aus südwestlicher und nordwestlicher Richtung bestimmt. Die Vulnerabilitätsstufen sind durch Ihre Obergrenze definiert.

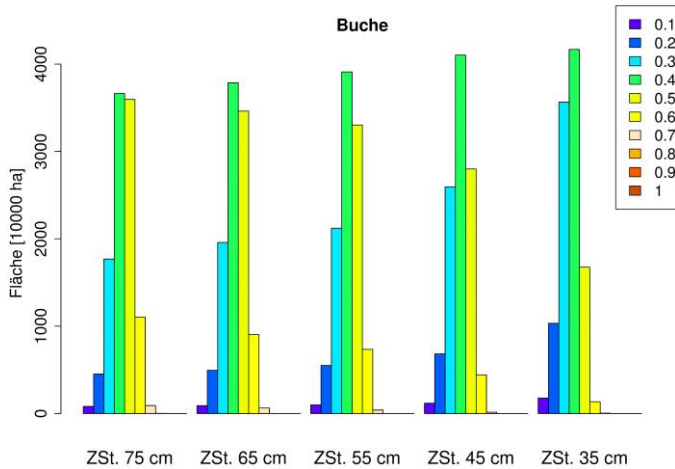


Abbildung 15: Flächenverteilungen des Waldes in Deutschland differenziert nach Stufen einer potenziellen Vulnerabilität gegenüber Winterstürmen für Normbestockungen von Buche mit unterschiedlichen Zielstärken. Die Schadenswahrscheinlichkeiten werden als Mittel der Prognosen eines Sturmes aus südwestlicher und nordwestlicher Richtung bestimmt. Die Vulnerabilitätsstufen sind durch Ihre Obergrenze definiert.

Abschließend wird als ein Beispiel für eine stratifizierte Auswertung eine Differenzierung nach Seehöhenstufen für Fichte bei einer Zielstärke von 55 cm dargestellt (Abb. 16). Aufgrund der unterschiedlichen Flächenausstattung der Seehöhenstufen erfolgt zusätzlich eine Berechnung der Flächenanteile. Die bereits erläuterten Effekte der Seehöhe und der Geländeexponiertheit (Kapitel 3.2) bestimmen auch die stratifizierten Hochrechnungen. Die Optimumverläufe der Baumhöhen-schätzungen über der Seehöhe (Abb. 6, Fichte) bewirken mit steigender Seehöhe einen Anstieg des Vulnerabilitätspotenzials bis zur Stufe 600 m (Abb. 16). So weist die Stufe 600 m sowohl die absolut als auch anteilmäßig höchste Fläche in der Vulnerabilitätsstufe 0,9 und damit das höchste Vulnerabilitätsniveau auf. Die Höhenstufe 400 m weist eine nur wenig günstigere Verteilung auf, während für die Höhenstufe 200 m ein deutlich geringeres Vulnerabilitätspotenzial mit dem Flächenschwerpunkt in den Stufen 0,7 und 0,8 prognostiziert wird. Oberhalb von 600 m verlagern sich die Verteilungen erst geringfügig dann sehr deutlich wieder in Richtung geringerer Vulnerabilitäten.

Aufgrund der mit zunehmender Seehöhe steigenden Variabilität der Geländeexponiertheit bzw. der zugehörigen Effekte nimmt auch die Variabilität der absoluten Flächen- und Anteilverteilungen mit der Seehöhe zu. So weisen die Höhenstufen 1000 und 1200 m sehr viel breitere und gleichmäßigere Verteilungen auf als die Höhenstufe 200 m (Abb. 16).

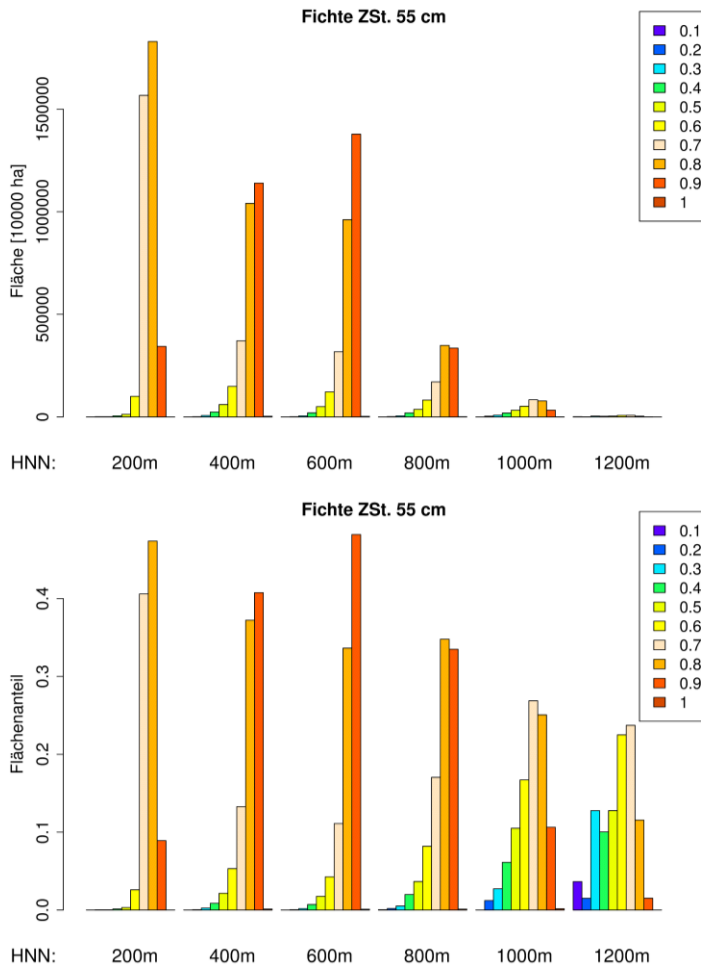


Abbildung 16: Flächen- (oben) und Flächenanteilsverteilungen (unten) des Waldes in Deutschland differenziert nach Stufen einer potenziellen Vulnerabilität gegenüber Winterstürmen für Normbestockungen von Fichte bei einer Zielstärke von 55 cm und unterschiedliche Seeböhenbereiche. Die Schadenswahrscheinlichkeiten werden als Mittel der Prognosen eines Sturmes aus südwestlicher und nordwestlicher Richtung bestimmt. Die Vulnerabilitätsstufen und Seeböhenbereiche sind durch Ihre Obergrenze definiert.

3.4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Die Prognose der Vulnerabilitäten liefert die Grundlage für die Entwicklung von Anpassungsmaßnahmen der Forstwirtschaft zur Vermeidung bzw. Reduktion des Schadausmaßes durch Winterstürme. Die Ergebnisse stellen damit die Schnittstelle zum Teilprojekt *Anpassungen/Forstwirtschaft* (<http://www.agrarrelevante-extremwetterlagen.de/index.php?id=1398>) im übergeordneten Forschungsvorhaben *Agrarrelevante Extremwetterlagen und Möglichkeiten des Risikomanagements* (<http://www.agrarrelevante-extremwetterlagen.de/index.php?id=1399>) dar. Basierend auf den Ergebnissen der Vulnerabilitätsanalyse können die Effekte eines vollständigen oder teilweisen Baumartenwechsels sowie die Anpassungen der baumartenspezifischen Produktionsziele (Zielstärken) im Teilprojekt *Anpassungen/Forstwirtschaft* abgeschätzt werden. Die Folgenabschätzung sollte dabei in einem ersten Schritt über die Sensitivität der abstrakten Vulnerabilitäten gegenüber waldbaulichen Maßnahmen erfolgen, wie sie hier exemplarisch dargestellt wurden.

Eine längerfristige Verwertungsmöglichkeit der Ergebnisse besteht in der Kombination mit den Ergebnissen der BWI 3 sowie den zugehörigen Waldentwicklungs- und Holzaufkommensprognosen. So ließen sich der aktuelle Vorrat und die aktuelle Baumartenfläche nach Stufen einer potenziellen Vulnerabilität bzw. nach Standorten unterschiedlicher Gefährdung stratifizieren. Dabei sollte das Vulnerabilitätspotenzial unter Berücksichtigung der aktuellen Baumartenmischung an der jeweiligen Traktecke und unter Verwendung praxisüblicher Zielstärken erfolgen. Darauf aufbauend könnten die aktuell noch relativ starren waldbaulichen Szenarien der Waldentwicklung und Holzaufkommensprognosen in Abhängigkeit der potenziellen Vulnerabilität adaptiert werden. Mögliche Anpassungen betreffen die Art, Stärke und Frequenz von Durchforstungen sowie die Zielstärke und maximale Endnutzungsmassen.

3.5 Ausblick

Eine erhebliche Steigerung der Genauigkeit der prognostizierten Vulnerabilitäten ist zukünftig durch die Verwendung höher aufgelöster digitaler Geländemodelle (DGM) zu erwarten. Die höhere Auflösung würde eine differenziertere Berechnung der modifizierten Topex-to-Distance Indices zur Erfassung der Geländeexponiertheit und damit ihrer Effekte bei der Vulnerabilitätsprognose ermöglichen.

Eine vereinheitlichte Datenbasis bodenkundlicher Parameter an den Wald-Traktecken der BWI würde genauere Schätzungen des Alters und der Baumhöhe bei Zielstärke und damit der potenziellen Vulnerabilität erlauben. Insbesondere die Effekte der häufig kleinstandörtlichen Variabilität von Bodenparametern könnten so besser berücksichtigt werden. Eine direkte Wirkung des Wasserhaushaltes im

Sturmschadenmodell ließe sich für Fichte durch die Ableitung einer groben Klassifikation von Vernässungsstufen an den Wald-Traktecken abbilden. Neben einer umfangreichen Erweiterung der standörtlichen Datenbasis der BWI würden derartige Prognosen zusätzliche Weiterentwicklungen der Hilfsmodelle zur standortsensitiven Prognose der Baumhöhe bei Zielstärke voraussetzen. Eine Weiterentwicklung der Klimasensitivität dieser Hilfsmodelle würde ferner eine Prognose der Effekte der projizierten Klimaszenarien ermöglichen.

Ein großes Potenzial wird schlussendlich in der Weiterentwicklung von meteorologischen Modellen zur Prognose von regionalen Eintrittswahrscheinlichkeiten für Winterstürme sowie ihrer Hauptwindrichtungen gesehen. In der vorliegenden Untersuchung mussten einheitliche Intensitäten und Hauptwindrichtungen unterstellt werden, so dass realistische regionale Muster für Winterstürme zu einer deutlich genaueren Einschätzung der Vulnerabilität führen würden.

4 Zusammenfassung

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung wurden potenzielle Vulnerabilitäten des Waldes in Deutschland gegenüber Winterstürmen mit Hilfe eines statistischen Sturmschadenmodells und verschiedener Hilfsmodelle eingeschätzt. Die Prognose erfolgte für die Wald-Traktecken der BWI 2, so dass die Ergebnisse für verschiedene weiterführende Analysen z.B. im Rahmen von Holzaufkommensprognosen genutzt werden können. Darüber hinaus können die Trakteckeneigenschaften, die in der BWI erfasst wurden, für stratifizierte Auswertungen genutzt werden. Als Ergebnis lassen sich Waldflächenverteilungen differenziert nach Stufen der Vulnerabilität und gegebenenfalls stratifiziert nach weiteren Merkmalen wie Höhenstufen oder für großräumige regionale Einheiten berechnen. Zur Speicherung der Prognoseergebnisse wurde eine MS-ACCESS-Datenbank erstellt.

Die Einschätzung der Vulnerabilität wurde für verschiedene Normbestockungen von Eiche, Buche, Fichte, Douglasie und Kiefer bei unterschiedlicher Zielstärke durchgeführt. Für realistische Prognosen wurden die zugehörigen Baumhöhen bei Zielstärke standortsensitiv geschätzt, wobei jedoch nur klimatische und keine Effekte von Bodenparametern berücksichtigt werden konnten. Die Effekte der Geländeexposition und -exponiertheit gegenüber hypothetischen Hauptwindrichtungen wurden bei der Vulnerabilitätsprognose mit Hilfe topographischer Indices abgebildet, die auf der Grundlage eines deutschlandweiten digitalen Geländemodells (90 x 90 m) berechnet wurden. Als meteorologische Randbedingungen wurden zwei Winterstürme in Orkanstärke und exakt südwestlicher bzw. nordwestlicher Windrichtung verwendet, die über Proxyvariablen spezifiziert wurden.

Die Prognosen für unterschiedliche Normbestockungen ermöglichen es, die Effekte der Baumartenmischung und der Zielstärke und somit waldbaulicher Maßnahmen auf die Vulnerabilität abzuschätzen. Sie sind damit die Voraussetzung für Anpassungsmaßnahmen im Bereich der forstlichen Klimafolgenforschung.

5 Abstract

Potential vulnerabilities of the German forest woodlands against winter storms were calculated based on a statistical storm damage model in connection with several supplementary models. The prognosis was based on data from the inventory plots of the 2nd German national forest inventory. Hence, the results can be employed for further analysis like in the framework of future wood supply prediction. Moreover the attributes assessed within the national forest inventory can be used for stratified analyses. Main results are forest areas differentiated by

classes of vulnerability and if necessary stratified by additional attributes like altitude or large scale regional units. An MS-ACCESS data base was compiled to store prognoses results.

Vulnerability was predicted for different standard forest stands of oak, beech, Norway spruce, Douglas fir and Scots pine and assuming different target diameters. Corresponding tree heights were estimated in relation to specific site conditions for realistic prognoses. However, only climatic but no soil parameters were available. Effects of topographic exposure and direction against hypothetical wind direction were included into the prognosis of vulnerability by employing specific topographical indices. These indices were calculated on the basis of a digital terrain model with a resolution of 90×90 m. The meteorological boundary conditions used are two winter storms of Beaufort wind speed 12 with southwest and northwest wind direction specified via proxy variables.

The prognoses for different standard forest stands allow quantifying the effects of silvicultural measures on vulnerability such as different tree species mixtures and target diameters. Hence, they are a main requirement for the development of measures in forest research of climate change effects mitigation.

6 Appendix (Weiterentwicklung des Sturmschadenmodells)

Parallel zur Bearbeitung des Projektes erfolgte eine Weiterentwicklung des existierenden Sturmschadenmodells (SCHMIDT et al., 2010, Gl. 4). Im Rahmen dieser Modellentwicklung wurde die Proxyvariable 'geographische Lage' in Form der Gauß-Krüger-Koordinaten durch eine regionalisierte Windgeschwindigkeit als Prädiktor ersetzt. Mit der Weiterentwicklung wurde eine sehr viel stärkere Kausalität des Modells durch die Verwendung des eigentlichen schadbestimmenden Faktors anstelle einer Proxyvariablen angestrebt. Grundlage der Regionalisierung waren Messungen der maximalen Windgeschwindigkeit an Stationen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) während des Durchzugs des Orkans 'Lothar' am 26.12.1999. Die Daten wurden vom Zentrum für Agrar-meteorologische Forschung des DWD (ZAMF) bereit gestellt. Aufgrund der begrenzten Anzahl von Wetterstationen, für die Windgeschwindigkeitsmessungen vorlagen, wurden von der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt (NW-FVA) zusätzliche Messwerte von Stationen der Meteomedia GmbH (<http://www.meteogroup.com/de/de/home.html>) beschafft. Es wurden grundsätzlich nur Stationen berücksichtigt, an denen Windgeschwindigkeiten von mehr als 13 m/s gemessen worden waren. Insgesamt standen deutschlandweit 188 Stationswerte des DWD und 45 Stationswerte der Meteomedia GmbH in und um Baden-Württemberg zur Verfügung. Zur Regionalisierung der maximalen Windgeschwindigkeit wurde ein verallgemeinertes additives Regressionsmodelle unter Verwendung der R-library *mgcv* (WOOD 2006, 2011) entwickelt (Gl. 6):

$$\log\{E(WS_{max_k})\} = f_1(HNN_k) + f_2(\text{Rechtswert}_k, \text{Hochwert}_k) \quad [6]$$

mit: $WS_{max_k} \sim \text{Gamma}(\exp(\eta_k))$

$E(WS_{max_{ki}})$: Erwartungswert der maximalen Windgeschwindigkeit an Traktecke k für den Orkan 'Lothar' [m/s]

HNN_k : Seehöhe des Mittelpunktes von Traktecke k [m]

RW_k, HW_k : Rechts- und Hochwert des Mittelpunktes von Traktecke k im Gauß-Krüger-Koordinatensystem (3.-ter Meridian)

f_1 : Eindimensionaler glättender Regressionsspline

f_2 : Zweidimensionaler glättender Regressionsspline zur Erfassung räumlicher Autokorrelation bzw. großräumiger regionaler Unterschiede

Die maximale Windgeschwindigkeit wird dabei in Abhängigkeit von der Seehöhe und der regionalen Lage der Wetterstationen geschätzt. Das Modell unterstellt einen regional konstanten Effekt der Seehöhe ($f_1(HNN)$), da eine modelltheoretisch

mögliche Beschreibung regional variierender Höhengradienten aufgrund des begrenzten Datenumfanges nicht möglich war. Eine Wechselwirkung zwischen dem regionalen Muster und dem Höhengradienten der Windgeschwindigkeit kann jedoch nicht ausgeschlossen werden. Um daher die regionale Variabilität einzuschränken, wurden für die Modellbildung nur Stationen in und um Baden-Württemberg verwendet (Abb. 17). Nach der zusätzlichen Begrenzung auf einen für Baden-Württemberg relevanten Seehöhenbereich ($HNN \leq 1640$ m) standen für die Modellbildung noch 38 Stationen des DWD und 37 Stationen der Meteomedia GmbH zur Verfügung.

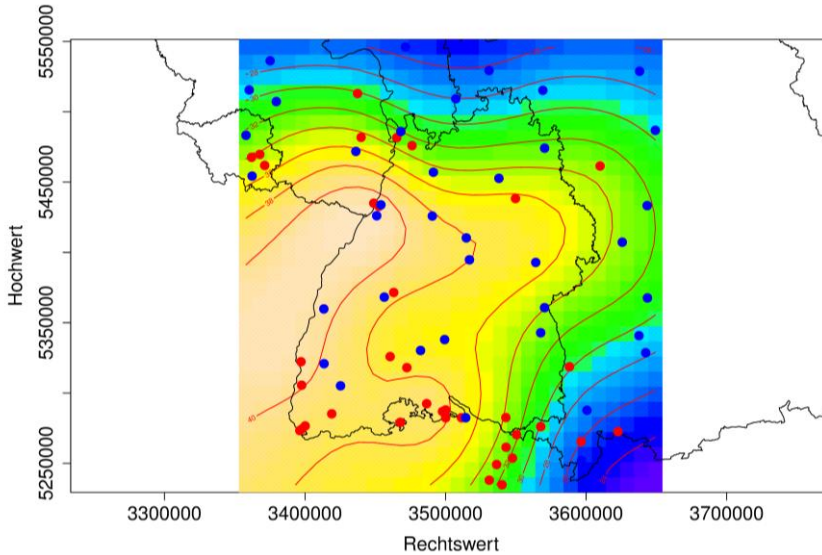


Abbildung 17: Muster der regionalisierten maximalen Windgeschwindigkeit für den Wintersturm 'Lothar'. Die Windgeschwindigkeit nimmt vom blauen über den grünen zum gelben Bereich hin zu. Blaue Punkte kennzeichnen Stationen des DWD und rote Punkte Stationen der Meteomedia GmbH. Zur besseren Darstellung des regionalen Musters wurde für die Prognose ein einheitlicher Wert von 300 m Seehöhe unabhängig von realen Seehöhe verwendet.

Für die Seehöhe wurde ein linearer Modelleffekt auf die maximale Windgeschwindigkeit identifiziert, wobei für die Interpretation die logarithmische Transformation der Zielgröße zu beachten ist (Abb. 18, Gl. 6). So steigt die prognostizierte maximale Windgeschwindigkeit über der Seehöhe mit leicht exponentiellen Gradienten an.

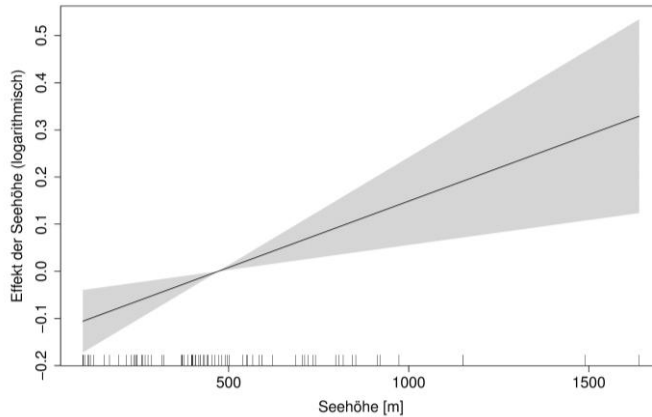


Abbildung 18: Modelleffekt der Seehöhe auf die prognostizierte maximale Windgeschwindigkeit für den Wintersturm 'Lothar'.

Mit Hilfe des Modells wurde anschließend für alle Wald-Traktecken der BWI 2 in Baden-Württemberg die maximale Windgeschwindigkeit prognostiziert bzw. regionalisiert. Die regionalisierten maximale Windgeschwindigkeit wurde anstelle der geographischen Lage bei der Weiterentwicklung des Sturmschadenmodells verwendet (Gl. 7).

$$g(\pi_{ijk}) = BA_{ijk}^T \alpha + \log\left(\frac{BHD_{ijk} BA_{ijk}^T \delta}{h_{ijk} BA_{ijk}^T \gamma}\right) + \beta_1 \text{Top_to_Dist_1}_{ij} + \beta_2 \text{Top_to_Dist_2}_{ij} + \beta_3 \text{Top_to_Dist_3}_{ij} + \beta_4 \text{Top_to_Dist_4}_{ij} + fm(\text{WS_max}_{ij}) \quad [7]$$

mit:

$WS_{max_{ij}}$: Maximale Windgeschwindigkeit beim Durchzug des Wintersturms 'Lothar' an der Traktecke ij [m/s]

fm : Eindimensionaler glättender Regressionsspline mit zusätzlicher Monotoniebedingung zur Gewährleistung eines monoton ansteigenden Effektes der Windgeschwindigkeit auf die Sturmschadenwahrscheinlichkeit

Für alle weiteren Abkürzungen siehe die Beschreibung zu Gleichung 4.

Zur Gewährleistung eines physikalisch plausiblen Modelleffektes der maximalen Windgeschwindigkeit auf die Schadwahrscheinlichkeit wurde bei der Modellbildung ein glättender Regressionsspline mit Monotoniebedingung verwendet (Abb. 19).

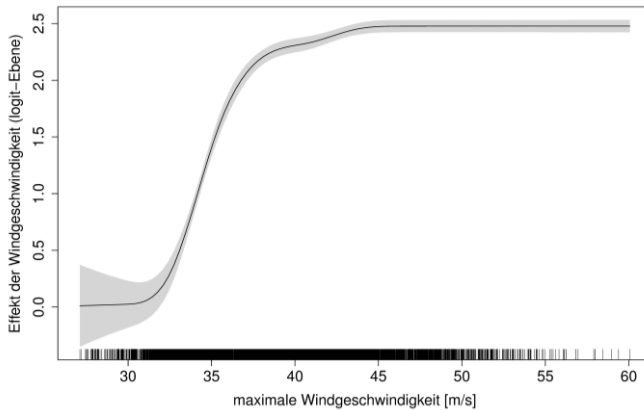


Abbildung 19: Modelleffekt der maximalen Windgeschwindigkeit auf die prognostizierte Sturmschadenwahrscheinlichkeit (auf der Ebene der logistischen Transformation).

Der Modelleffekt der maximalen Windgeschwindigkeit ist durch einen starken Anstieg zwischen etwa 32 und 38 m/s gekennzeichnet. Für diesen Bereich wird somit ein starker Anstieg der Schadwahrscheinlichkeit mit steigender Windgeschwindigkeit prognostiziert. Im Gegensatz dazu läuft der Effekt unter- und oberhalb dieses Geschwindigkeitsbereiches gegen konstante Werte hin aus. Der konstante Verlauf des Modelleffektes im unteren Geschwindigkeitsbereich kann dahingehend interpretiert werden, dass unterhalb von ca. 30 m/s kaum noch Schäden oder lediglich Schäden auf einem konstant (niedrigen) Niveau auftreten. Allerdings erscheinen 30 m/s als Grenzwert bzw. als generelle Schadschwelle als relativ hoch. Dementsprechend wäre der konstante Verlauf oberhalb von ca. 40 m/s dahingehend zu interpretieren, dass weitere Steigerungen der Windgeschwindigkeit zu keiner weiteren Erhöhung der Schadwahrscheinlichkeit führen. Der Verlauf in diesem Bereich muss als unplausibel beurteilt werden. Trotz des im mittleren Geschwindigkeitsbereiches plausiblen Modelleffektes, kann die Weiterentwicklung des Modells daher bisher nicht als Alternative zum ursprünglichen Sturmschadenmodell (SCHMIDT et al., 2010) beurteilt werden. Als Hauptursache muss die zu geringe Anzahl an Wetterstationen vermutet werden, die keine ausreichend genaue Regionalisierung der maximalen Windgeschwindigkeit zulässt. Eine zukünftige Lösung des Problems könnte unter Umständen in der physikalischen Modellierung des Windfeldes des Orkans 'Lothar' als Grundlage für die Regionalisierung der Windgeschwindigkeit und eventuell -richtung bestehen. Zu diesem Zweck sind informelle Forschungsvereinbarungen mit DWD vereinbart worden.

7 Literatur

- DE MARTONNE, E. (1926): Une nouvelle fonction climatologique: l'indice d'aridité. *La Météorologie* 2, 449-458.
- LAPPI, J. (1997): A longitudinal analysis of height/diameter curves. *Forest Sci.* 43, 555-570.
- SCHELHAAS, M.-J., NABUURS, G.-J., SCHUCK, A. (2003): Natural disturbances in the European forests in the 19th and 20th centuries. *Global Change Biol.* 9, 1620–1633.
- SCHMIDT, M. (2010): Ein standortsensitives, longitudinales Höhen-Durchmesser-Modell als eine Lösung für das Standort-Leistungs-Problem in Deutschland. Jahrestagung der Sektion Ertragskunde im DVFFA in Körbecke am Möhnesee, 131-152.
- 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. *Can. J. For Res.* 40 (8), 1636-1652 (doi:10.1139/X10-099).
- SCOTT, R.E., MITCHELL, S.J. (2005): Empirical modelling of windthrow risk in partially harvested stands using tree neighbourhood and stand attributes. *For. Ecol. Manage.* 218, 193-209. doi:10.1016/j.foreco.2005.07.012
- USGS (2006a): Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) “Finished” 3-arc second SRTM Format Documentation, Available online at: <http://edc.usgs.gov/products/elevation/srtmbil.html> (accessed 01/08/2006).
- USGS (2006b): Shuttle Radar Topography Mission DTED® Level 1 (3-arc second) documentation, Available online at: <http://edc.usgs.gov/products/elevation/srtmdted.html> (accessed 01/08/2006).
- WOOD, S.N. (2006): Generalized additive models: an introduction with R. Chapman & Hall/CRC, Boca Raton, 391 S.
- WOOD, S.N. (2011): Fast stable restricted maximum likelihood and marginal likelihood estimation of semiparametric generalized linear models. *J. Royal Stat. Soc. (B)* 73(1), 3-36.