

Sturmrisiko von Fichte versus Douglasie auf baden-württembergischen Versuchsflächen

Axel Albrecht¹, Ulrich Kohnle¹, Marc Hanewinkel² und Jürgen Bauhus³

¹: Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg, Wonnhaldestr. 4, D-79100 Freiburg

²: Eidg. Forschungsanstalt WSL, Zürcherstrasse 111, CH-8903 Birmensdorf

³: Universität Freiburg, Waldbau-Institut, Tennenbacherstr. 4, D-79106 Freiburg

Einleitung

Zwischen der ersten und der zweiten Bundeswaldinventur (1987-2001/2) nahm der Anteil der Douglasie (*Pseudotsuga menziesii* [Mirbel] Franco) in deutschen Wäldern von 1,1 auf 1,6 % zu, während der Anteil fast aller anderen Nadelbaumarten während des gleichen Zeitraums abnahm. Dieser geringe Anteil wird mittelfristig jedoch deutlich zunehmen, da sie als eingeführte Baumart insbesondere in den jüngeren Altersklassen bis 40 Jahre besonders stark vertreten ist (BMVEL 2006). Die zunehmende Bedeutung verdankt die Douglasie ihrer hohen Produktivität, ihren vorteilhaften Holzeigenschaften und ihrer Dürretoleranz (BRANDL 1988, HEIDINGSFELDER und KNOKE 2004), besonders auch im direkten Vergleich mit Fichte (*Picea abies* [L.] Karst.).

Stürme mit hohen Folgeschäden in Wäldern sind in Mitteleuropa meist Winterstürme der nordatlantischen Zugbahn (BENGTSSON et al. 2006, HURRELL et al. 2001, LECKEBUSCH et al. 2006). Laubbäume haben klare Stabilitätsvorteile gegenüber Nadelbäumen, da sie während dieser Jahreszeit keine Blätter tragen und ihr Windwiderstand folglich geringer ist. Innerhalb der Nadelbäume ist die Fichte besonders sturmgefährdet (BOUCHON 1987), wobei ihre Labilität überwiegend ihrer Eigenschaft als Flachwurzler sowie dem Anbau außerhalb ihres natürlichen Verbreitungsareals zugeschrieben wird (HANEWINKEL et al. 2008, V. TEUFFEL et al. 2004). Über das Sturmrisiko der Douglasie hingegen ist in Mitteleuropa wenig bekannt.

Aufgrund des hohen Anteils von Douglasie auf den langfristigen waldwachstumskundlichen Versuchsflächen in Baden-Württemberg hat diese Untersuchung einen Schwerpunkt auf dem Baumartenvergleich von Fichte und Douglasie bezüglich ihres Sturmrisikos. Methodische Aspekte insbesondere der Boosted Regression Trees (BRTs) sind bereits umfassend veröffentlicht und werden daher hier nicht eingehend betrachtet (DÍAZ-URIARTE und DE ANDRÉS 2006, ELITH und GRAHAM 2009, KAMPICHLER et al. 2010). Die Forschungsfragen sind:

- Sind die Versuchsflächendaten von Fichte und Douglasie im Hinblick auf dendrometrische Bestandeskennwerte, Standortseigenschaften sowie waldbauliche Behandlung vergleichbar?
- Ist die Douglasie auch nach der Berücksichtigung von Bestandeskennwerten, Standortseigenschaften und waldbaulicher Behandlung sturmstabiler als die Fichte?

Material

Für die vorliegende Untersuchung wurden 700 Versuchsflächen mit führender Baumart Fichte bzw. Douglasie ausgewählt. Diese Bestände sind vorwiegend einschichtige Reinbestände, und aus den Zeitreihenbeobachtungen wurden nur die Beobachtungszeiträume ausgewählt, in die die Stürme Wiebke (1990) und Lothar (1999) fielen. Für jede Versuchsfläche wurde die jeweils letzte Beobachtung vor jedem dieser zwei Ereignisse ausgewählt. Die aufgrund von Sturmschaden durch das folgende Ereignis ausscheidenden Bäume einer Versuchsfläche erhielten dann die einzelbaumweise Kennung für Sturmschaden, wobei eine Trennung zwischen Bruch und Wurf leider nicht möglich war. Auf Bestandesebene wurden diese Einzelbaumkennungen dann zur Analysevariablen sturmgeschädigte Grundfläche aufsummiert.

Die 700 Versuchsflächen sind durchschnittlich ca. 0,25 ha groß und stellen zusammen 189 ha vollaufgenommener Fläche dar. Sie sind unregelmäßig über Baden-Württemberg verteilt. Von den berücksichtigten 142.543 Baumbeobachtungen waren 13.181 als Sturmschaden registriert (Tab. 1). Während 1990 höhere Schadanteile bei Fichte (7%) als bei Douglasie (4%) beobachtet wurden, führte Lothar 1999 bei Douglasie zu höheren Schäden (15%) gegenüber Fichte (11%).

Tab. 1: Übersicht über die Einzelbaumdaten. Gesamtzahl der Beobachtungen und Anzahl sturmgeschädigter Bäume getrennt nach Sturmereignis sowie Baumart.

		Anzahl	Sturm- bäume	Anteil
Wiebke	Dgl	30556	1090	4%
	Fi	30969	2054	7%
Lothar	Dgl	33954	5031	15%
	Fi	47064	5006	11%

Die getesteten 42 potenziellen Prädiktoren beschreiben dendrometrische Eigenschaften der Bestände, Bodeneigenschaften sowie geographische und topographische Lage. Zusätzlich wurden die maximale Böen-Windgeschwindigkeit für beide Sturmereignisse sowie ein langjähriger Durchschnittswert getestet (HENEKA et al. 2006). Eine Kurzbeschreibung und zusammenfassende Statistik ist für jeden potenziellen Prädiktor in Tab. 2 zusammengestellt. Besonderheiten des Datensatzes sind, dass viele dendrometrische Kennwerte auf Bestandesebene rechnerisch aus präzisen Einzelbaumdaten hergeleitet wurden und dass die langfristige Entwicklung der Bestände inkl. ihrer waldbaulichen Behandlung bekannt ist. Die Auswertungen wurden auf der Bestandesebene vorgenommen, da auf den untersuchten Flächen Einzelbaumdaten weit weniger wichtig sind als Bestandesdaten (ALBRECHT 2009). Von den 1167 Beobachtungen auf Bestandesebene wurde bei 567 Sturmschaden festgestellt, und 67 dieser Flächen wurden komplett geschädigt. Die Häufigkeitsverteilung der Antwortvariablen sturmgeschädigte Grundfläche zeigt eine sehr hohe Anzahl von Flächen ohne Schäden, wie es für seltene Ereignisse typisch ist (Abb. 1A). Bei den Werten größer als 5 % (Abb. 1B) fällt eine negativ exponentielle Abnahme bis hin zu 60 % auf, und darauf folgt ein Wiederansteigen der Häufigkeiten bei Schäden zwischen 75 und 100 %. Diese quasi U-förmige Häufigkeitsverteilung mit Nulleninflation, die keiner Normal- oder Exponentialverteilung zuzuordnen ist, bedingte eine spezielle Untersuchungsmethodik.

Tab. 2: Zusammenfassende Statistik der 42 potenziellen Prädiktoren.

Variablenname	Variablenbeschreibung	Mittelwert	N	Min	Max	STD	Variablenkategorie
E0	Bestockungsgrad	0.88	1149	0.28	1.66	0.21	Dichte
H:D100	H100/D100	0.70	1167	0.16	0.85	0.07	Dichte
H:D100_brel	relativer b-j. H100/D100	1.01	1167	0.66	1.33	0.10	Dichte
H:D100_relnorm	normierter H100/D100	0.98	1167	0.63	1.33	0.10	Dichte
H:D100_relnorm_5rel	normierter relativer 5-j. H100/D100	1.00	1167	0.66	1.42	0.09	Dichte
H:Dg	Hg:Dg	0.85	1167	0.48	1.23	0.11	Dichte
G	Grundfläche (m ² /ha)	32.32	1167	8.90	70.38	9.43	Dimension
N	Stammzahl/ha	676.15	1167	111	2636	388.95	Dimension
V	Vorrat (Vfm/ha)	410.02	1167	61.10	1568.70	201.19	Dimension
Alter	Alter der Hauptbaumart	50.20	1154	0	206	29.87	Dimension
D100	D100	35.13	1167	13.60	79.60	9.90	Dimension
Dg	Dg	27.25	1167	10.50	75.80	9.73	Dimension
H:100	H100	24.52	1167	10.30	52.26	7.17	Dimension
Hg	Hg	22.72	1167	9.10	51.68	7.18	Dimension
h ₂ O_1990	rel. Wassersättigung m Boden am 28.02.1990	0.95	1167	0	1	0.12	MeteoWind
h ₂ O_1999	rel. Wassersättigung m Boden am 26.12.1999	0.98	1167	0	1	0.12	MeteoWind
Wind50	max. Böengeschwindigkeit in m/s mit jährl. Überschreitungswahrsch. 2%	38.12	1165	29.20	54.70	3.08	MeteoWind
Wind90	max. Böengeschwindigkeit in m/s am 28.02.1990	35.39	1165	22.10	45.10	4.00	MeteoWind
Wind99	max. Böengeschwindigkeit in m/s am 26.12.1999	35.82	1165	24.30	46.40	3.39	MeteoWind
Vorschäden	Vorschäden durch Sturm (0=nein; 1=ja)	0.19	1167	0	1.00	0.39	Vorschäden
D:FQ	Durchforstungsquotient (Dg das ausscheidenden Bestände/Dg das Bestands vor Durchforstung)	0.74	1167	0	1.31	0.33	Entnahmen
DFQ_10j	mittlerer 10-j. Durchforstungsquotient	0.73	1167	0	1.18	0.26	Entnahmen
DFQ_plan	Durchforstungsquotient nur der planmäßigen Entnahmen	0.67	1167	0	2.11	0.56	Entnahmen
DFQz	Durchforstungsquotient/Jahre seit letztem Eingriff	0.02	1167	0	0.38	0.03	Entnahmen
letz1grDFQ	Durchforstungsquotient des vorangegangenen Eingriffs	0.71	1167	0	1.37	0.34	Entnahmen
letz1grcm	absolute Entnahmemenge des vorangegangenen Eingriffs	52.21	1167	0	464.50	55.54	Entnahmen
letz1grjahrsseit	Jahre seit vorangegangenen Eingriff	4.90	1167	1	26.00	1.97	Entnahmen
letz1grrel	relative Entnahmemenge des vorangegangenen Eingriffs	0.13	1167	0	0.70	0.12	Entnahmen
sumahproszgwlv	kumulierte Entnahmen/Gesamtwachstumleistung	0.34	1167	0	0.80	0.16	Entnahmen
Vaus	absolute Entnahmemenge	55.90	1167	0	580.50	53.86	Entnahmen
Vaus_plan	absolute Entnahmemenge nur der planmäßigen Entnahmen	35.32	1167	0	401.90	44.14	Entnahmen
Vausproz	relative Entnahmemenge	0.14	1167	0	0.80	0.12	Entnahmen
Vausproz_plan	relative Entnahmemenge nur der planmäßigen Entnahmen	0.09	1167	0	0.80	0.11	Entnahmen
Vausproz_10j	rel. Entnahmen der letzten 10 Jahre	0.13	1167	0	0.52	0.09	Entnahmen
flach40	flachgründiger Boden (0=nein; 1=ja)	0.07	1156	0	1	0.25	S:anor:/Boden
kalk30	kalkhaltiger Oberboden (0=nein; 1=ja)	0.11	1161	0	1	0.31	S:anor:/Boden
moass70	Stauässe (0=nein; 1=ja)	0.07	1161	0	1	0.25	S:anor:/Boden
sauer	starke Oberbodenversauerung (0=nein; 1=ja)	0.17	1161	0	1	0.38	S:anor:/Boden
fsto-pkt	Standortrisikopunkte (Stauässe*2 + flachgründig*2 + kalkhaltig + Versauerung)	0.82	1156	0	4	1.03	S:anor:/Boden
H:NN	Meereshöhe	567.16	1166	104.55	1201.70	210.78	Topographie:Lage
Topex	topographische Exponiertheit (TOPEX, Grenzdistanz 1000m, West-gewichtet)	21.32	1165	-26.00	205.00	29.97	Topographie:Lage
WR	Entfernung zum nächsten westlich vorgelagerten Waldrand (max. 340m)	304.52	1166	0	340	79.33	Topographie:Lage

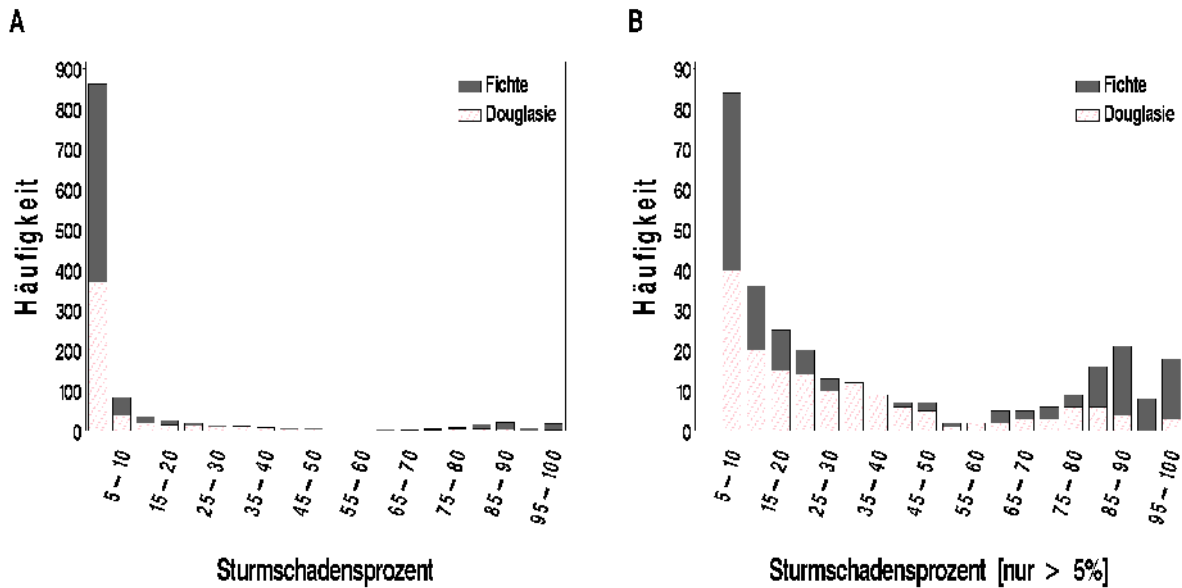


Abb. 1: Histogramm der Antwortvariablen Anteil sturmeschädigter Grundfläche (Sturmschadensprozent) für die beiden Stürme 1990 und 1999. A: für alle Versuchsflächen, B: nur für Versuchsflächen mit Schäden größer als 5%.

Methoden

Zur Auswertung wurden verallgemeinerte lineare gemischte Modelle (engl.: generalized linear mixed model, GLMM) und Boosted Regression Trees (BRT) verwendet. Diese Techniken sind besonders geeignet für die Analyse nicht-normalverteilter Antwortvariablen mit gemischten Skalierungen der Prädiktoren und von korrelierten Beobachtungen. Für beide Verfahren wird die Antwortvariable mit der logit-Link-Funktion transformiert (siehe [1], $\log[P/(1-P)]$).

GLMM

GLMME setzen sich aus zwei Komponenten zusammen. Die festen Effekte sind die erste Komponente, die aus den klassischen Prädiktoren multipler Regression und deren geschätzten Koeffizienten besteht (siehe [1], Xb). Für die Ergebnisinterpretation der festen Effekte stehen die Signifikanzwerte und die Koeffizienten zur Verfügung. Die zweite Komponente sind die zufälligen Effekte, die räumliche und zeitliche Korrelationen in den Daten quantifizieren. Nachteile gemischter Modelle wie GLMME sind jedoch, dass die Prädiktoren nicht multikollinear verknüpft sein dürfen und dass die Effekte linear sein müssen (LITTELL et al. 2006, THE SAS INSTITUTE INC. 2006). Nicht-lineare Effekte könnten in gemischten nicht-linearen Modellen abgebildet werden, jedoch ist die Variablenauswahl und Modellspezifizierung häufig kompliziert und numerisch unmöglich, wenn die Zahl der zu testenden Prädiktoren groß ist, wie im vorliegenden Fall.

$$\log\left[\frac{P}{1-P}\right] = Xb + Zu \quad [1]$$

Aufgrund der Verteilungseigenschaften der Antwortvariablen wurden drei schrittweise aufeinander aufbauende GLMME an die Sturmschadensdaten auf Bestandesebene angepasst. Das erste Modell ist ein Auftretensmodell als binäres logit-Modell (siehe [2], Kodierung von π : 0=kein Schaden, 1=Schaden). Die zufälligen Effekte quantifizieren in diesem Modell die räumliche Klumpung mehrerer direkt nebeneinander liegender Parzellen in einer Versuchsanlage.

$$\text{Logit}(\pi) = x' \beta + \gamma_t; \quad \gamma_t \sim N(0, \sigma^2_\gamma); \quad [2]$$

Im zweiten Schritt wird ebenso als binäres Logitmodell das Auftreten von Totalschäden beschrieben (siehe [3], Kodierung von π : 0: Schaden < 75 %, 1: Schaden \geq 75 %). Der verwendete Grenzwert für die binäre Kodierung von Totalschäden (75 %) wurde anhand der Häufigkeitsverteilung der Antwortvariablen (Abb. 1) und der Beobachtung vorgenommen, dass sogar bei augenscheinlichen Totalschäden in Beständen häufig einige kodominante und unterdrückte Kleinbäume verbleiben. Die zunächst getesteten zufälligen Effekte waren vermutlich aufgrund der geringen Anzahl von Parzellen mit Totalschäden nicht signifikant. Das angepasste Modell ist somit folglich ein einfaches verallgemeinertes lineares Modell ohne zufällige Effekte (GLM).

$$\text{Logit}(\pi) = x' \beta \quad [3]$$

Im dritten Schritt wird für diejenigen Parzellen, auf denen zwar Schaden (Schritt 1) aber kein Totschaden (Schritt 2) aufgetreten ist, ein logit-Modell mit binomialer Antwort angepasst, das die Menge der Teilschäden schätzt ($y \in \mathbf{R}$ [0 bis 0.75; Schadanteil]). Die zufälligen Effekte bei dieser Modellanpassung waren signifikant und beschreiben die räumliche Klumpung der Parzellen in Versuchsanlagen wie in Schritt 1. Die Gleichung ist deshalb gleich wie [2].

Die Prädiktoren wurden unter Verwendung von p-Werten und einer Irrtumswahrscheinlichkeit von $\alpha=0.05$ ausgewählt. Als Anpassungsstatistiken wurden in den GLMMen die -2 Residual Pseudo-Likelihood verwendet (Schritte 1 und 3). In Schritt 2 wurde die -2 Log-Likelihood verwendet.

Die Baumartenzugehörigkeit wurde als kategorielle Variable auf der Bestandesebene kodiert. Anstatt getrennte Modelle für jede Baumart anzupassen erleichtert dieser Ansatz die Überprüfung baumartenspezifischer Unterschiede. Während der Variablenselektion wurde Wert darauf gelegt, Baumart als Interaktionseffekt mit den anderen zur Auswahl stehenden Variablen zu testen, um baumartenspezifische Unbalanciertheit im Datenmaterial angemessen zu berücksichtigen.

BRTs

BRTs bestehen aus den zwei Komponenten Entscheidungsbäume und boosting Algorithmen. Die Entscheidungsbäume unterteilen den Prädiktorenraum anhand der Antwortvariablen in Untergruppen. Dabei werden für die Prädiktoren schrittweise Schwellenwerte errechnet, die die Daten in zwei je in sich möglichst homogene, untereinander aber möglichst verschiedene Untergruppen aufteilen. Mit Hilfe dieser schrittweisen Verzweigungen wird dann der Entscheidungsbaum erstellt. Im zweiten Teil, den boosting Algorithmen, werden viele solcher Entscheidungsbäume erstellt, indem jeweils die Genauigkeit optimiert wird. Dabei werden in den folgenden Entscheidungsbäumen die Residuen des ersten Baums als neue Antwortvariable verwendet. Weiterer Bestandteil der Optimierung ist, dass die besonders schlecht abgebildeten Datenbereiche mit großen Residuen im Zuge der folgenden Iteration ein höheres Gewicht erhalten. Als Maß für die Verbesserung in diesem schrittweisen Prozess wird die Devianz-basierte Loss-Funktion verwendet. Die Entscheidungsbäume mit der geringsten Devianz werden schließlich ausgewählt. In Anlehnung an ELITH et al. (2008) fußen BRTs auf der Idee, dass es leichter ist viele einfache und grobe Entscheidungsregeln zu finden und diese dann zu mitteln, als eine einzige, höchstpräzise Vorhersageregeln zu erstellen. Die Vorteile von BRTs zeigen sich insbesondere dann, wenn die Daten Korrelationen aufweisen, Prädiktorenwerte häufig fehlen, und wenn viele Prädiktoren zur Auswahl stehen. Außerdem sind BRTs wenig anfällig für Ausreißer und berücksichtigen Interaktionseffekte automatisch. Ein großer Nachteil ist jedoch, dass sie üblicherweise nicht so präzise sind wie GLMMe. Weiterführende Informationen zu Entscheidungsbäumen haben MAINDONALD und BRAUN (2007), THERNEAU und ATKINSON (2008) und VENABLES und RIPLEY (2002) zusammengestellt. Die Boosting Technik wird näher in HASTIE et al. (2009), RIDGEWAY (2006), FRIEDMAN (2001) und FRIEDMAN und MEULMAN (2003) beschrieben.

Die Antwortvariable Sturmschadensanteil wurde mit der Logit-Funktion transformiert um den Wertebereich der Vorhersage auf Werte zwischen 0 und 1 zu begrenzen. Die Beobachtungen mussten nicht in einzelne Schritte unterteilt werden wie bei den GLMMen, sondern wurden in einer Modellanpassung berücksichtigt, da BRTs im Gegensatz zu GLMMen keine Anforderungen an die Verteilung der Antwortvariablen stellen. Bei der Erstellung der BRTs wurden zwischen 1 und 20 Verzweigungen sowie Lernraten von 0.01, 0.05 und 0.1 getestet. Als ideale Parameterwerte stellten sich 10 Verzweigungen und eine Lernrate von 0.05 heraus, was anhand der geringsten kreuzvalidierten Devianz beurteilt wurde.

Relativer Einfluss der Prädiktorguppen

Um die Wirkungsweisen der zahlreichen einzelnen Prädiktorvariablen übersichtlich zusammenzufassen, wurde jedem einzelnen Prädiktor eine Kategorie zugewiesen. So wurden beispielsweise die Bestandeshöhe, das Alter und der Holzvorrat der Kategorie Dimension zugeordnet, die relative Entnahmemenge und der Durchforstungsquotient hingegen der Kategorie Entnahmen. Alle Prädiktoren und die jeweilige Zuordnung zu den Kategorien sind in Tab. 2 zusammengestellt.

Der relative Einfluss für die GLMMe wurde berechnet, indem für jeden Prädiktor ein Modell ohne den jeweiligen Prädiktor angepasst wurde. Die Verschlechterung der Anpassungsstatistik durch das Weglassen des jeweiligen Prädiktors wurde als Indikator für dessen Einfluss verwendet. Teilt man diesen Wert durch die Summe aller Verschlechterungen, erhält man den relativen Anteil.

Für die BRTs wird der relative Einfluss berechnet, indem die Häufigkeit des jeweiligen Prädiktors als Trennkriterium mit der durch dessen Verwendung erzielten Modellverbesserung gewichtet wird. Dieser Wert wird schließlich über alle Entscheidungsbäume gemittelt, auf 100% Gesamtsumme skaliert und quantifiziert den relativen Einfluss (FRIEDMAN und MEULMAN 2003).

Ergebnisse und Diskussion

Unterschiede zwischen Douglasien- und Fichtenversuchsflächen

Die Fichtenversuchsflächen sind im Durchschnitt etwas höher als die Douglasienflächen (Abb. 2A). Obwohl einige einzelnen Werte bei Douglasie über 50m liegen, beträgt der Mittelwert 24 m, wohingegen der Mittelwert der Fichten über 25 m liegt. Für den Durchforstungsquotient der planmäßigen Durchforstung sind nur geringe Unterschiede zwischen den Baumarten festzustellen, die allenfalls nahelegen, dass bei Fichte etwas stärker ins Herrschende eingegriffen wurde (Abb. 2B). Etwas ausgeprägter sind die Unterschiede für die relative Entnahmemenge der planmäßigen Eingriffe (Abb. 2C): Bei Douglasie wurden durchschnittlich 17 % des Holzvorrats entnommen, bei Fichte lediglich 12 %. Die Artenunterschiede für diese drei Prädiktoren sind signifikant (Wilcoxon-Rangsummentest, $\alpha=0,05$).

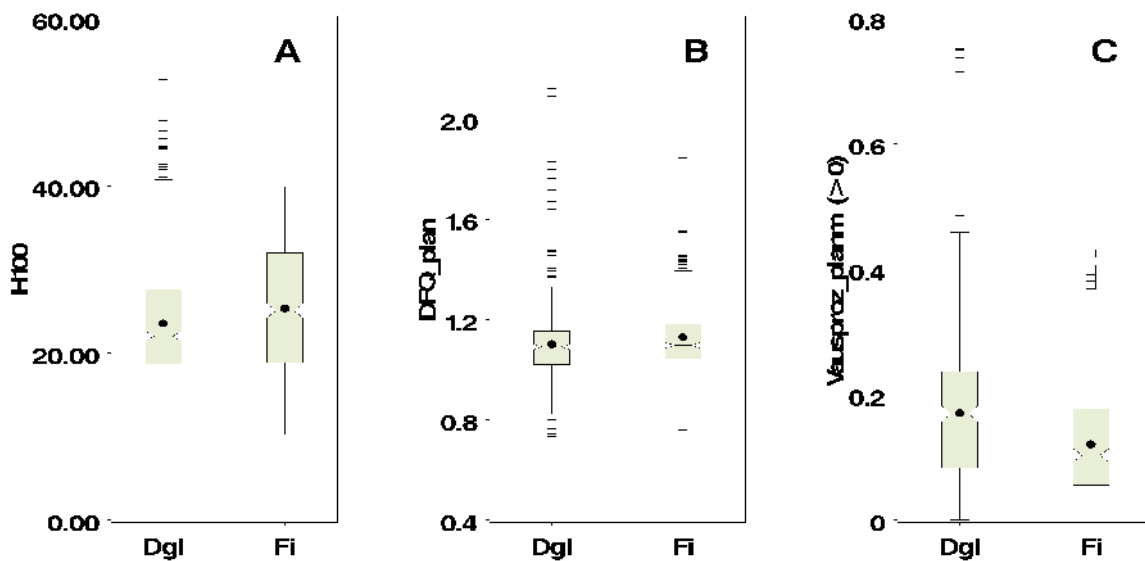


Abbildung 2: Boxplots von drei Variablen für die Baumarten Douglasie (Dgl) und Fichte (Fi). A: Bestandesspitzenhöhe (H100), B: Durchforstungsquotient der planmäßigen Durchforstung (DFQ_plan), C: relative Entnahmemenge der planmäßigen Eingriffe (Vausproz_plan).

Für einige sturmrisikorelevanten Standortseigenschaften wurden die Flächenanteile für Douglasie und Fichte gegenübergestellt (Tab. 3). Während die Douglasie höhere Anteile auf tondominierten (6%) und flachgründigen (9%) Standorten aufweist, hat die Fichte größere Anteile auf Böden mit starker Oberbodenversauerung, Staunässe und tiefgründigen Lehm Böden. Auf Böden mit freiem Kalk sind beide Baumarten ähnlich häufig anzutreffen.

Tabelle 3: Standortseigenschaften der Versuchsflächen. Häufigkeit möglicher Risikofaktoren für Douglasie und Fichte.

Baumart	stark versauert	Stau- nässe	flach- gründig	freier Kalk	Ton- boden	Lehm- boden
Dgl	3%	1%	9%	10%	6%	33%
Fi	29%	12%	5%	11%	1%	53%

Da die betrachteten Risikoeigenschaften bei den beiden Baumarten wechselweise stärker und schwächer ausgeprägt sind, ist keine höhere a priori Disposition für eine der beiden Arten festzustellen.

GLMMe

Im Modellierungsschritt 1 wurden drei Variablen als Prädiktoren ausgewählt (Tab. 4). Der positive Koeffizient für die Bestandesspitzenhöhe zeigt an, dass die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Sturmschäden mit zunehmender Spitzenhöhe zunimmt. Der relative Einfluss dieses Prädiktors ist jedoch gering. Die anderen beiden Prädiktoren zeigen gegensätzliche Wirkweisen an: während der Koeffizient für die relative Entnahmemenge ein

positives Vorzeichen hat, ist der Koeffizient für die relative Entnahmemenge der planmäßigen Eingriffe negativ. Somit wirken planmäßige Eingriffe stabilisierend, die gesamten Eingriffe jedoch labilisierend.

Tabelle 4: Prädiktoren und ihre Koeffizienten für die GLMMe.

Teilmodell	Variable	Parameter	p	Variablen-kategorie	rel.Einfluss
1 (Schaden ja/nein)	H100	0.063	0.00	Dimension	1%
	Vaus_proz	11.361	0.00	Entnahmen	50%
	Vausproz_plan	-9.845	0.00	Entnahmen	49%
2 (Totalschaden ja/nein)	B0	6.642	0.00	Dichte	9%
	DFQ_plan	2.084	0.00	Entnahmen	9%
	H100	0.126	0.00	Dimension	6%
	H100*Baumart(Dgl)	-0.028	0.00	Art-Interaktion	4%
	HD100relnorm_5rel	8.295	0.00	Dichte	5%
	Topex	-0.026	0.01	Topographie/Lage	3%
	Vaus_plan	-0.138	0.00	Entnahmen	43%
	Vausproz_10j.	20.008	0.00	Entnahmen	12%
3 (Mengenmodell der teilgeschädigten Flächen)	Wind90	0.266	0.00	MeteoWind	9%
	H100	0.058	0.00	Dimension	47%
	HNN	-0.002	0.00	Topographie/Lage	53%

Im Modellierungsschritt 2 wurden neun Variablen als Prädiktoren für das Auftreten von Totalschäden ausgewählt. Mit gleicher Wirkungsrichtung wie in Schritt 1 wurde die Spitzhöhe ausgewählt, die hier jedoch einen etwas höheren relativen Einfluss hat. Der zweite Prädiktor ist ein Interaktionseffekt aus Spitzhöhe und Baumart und zeigt an, dass die Wahrscheinlichkeit für Totalschäden bei Douglasie mit zunehmender Spitzhöhe weniger schnell ansteigt als bei Fichte. Niedrigere relative h/d-Werte sind mit geringerem Risiko verbunden, was durch das positive Vorzeichen zum Ausdruck kommt. Der gleiche antagonistische Effekt wie in Schritt 1 ist auch in Schritt 2 anzutreffen: planmäßige Eingriffe reduzieren das Risiko von Totalschäden, wohingegen die relative Eingriffsstärke aller Eingriffe während der letzten 10 Jahre mit einer Erhöhung des Risikos von Totalschäden verknüpft ist. Den höchsten Anteil an relativem Einfluss in diesem Modellierungsschritt haben die planmäßigen Eingriffe. Der auffallend geringe Wert des Koeffizienten lässt sich aus der absoluten Kodierung dieser Variablen erklären. Als sechster Prädiktor wurde der Bestockungsgrad ausgewählt, dessen Koeffizient anzeigt, dass es in geschlosseneren Beständen mit höherer Wahrscheinlichkeit zu Totalschäden kommt. Ein weiteres Indiz für die labilisierende Wirkung von Durchforstungen liefert der Durchforstungsquotient der planmäßigen Durchforstung. Der positive Koeffizient zeigt an, dass die Labilisierung umso größer ist, je stärker vorherrschende Bäume durchforstet werden. Mit niedrigem relativem Einfluss schlägt der Topex zu Buche und zeigt an, dass exponierte Bestände etwas mehr von Totalschäden bedroht sind als windgeschützte. Ein positiver Koeffizient wurde für die Böengeschwindigkeit des 1990er Sturms errechnet, so dass die Wahrscheinlichkeit für Totalschäden mit höherer Windgeschwindigkeit zunimmt.

Für die Schätzung der Schadensmenge im Modellierungsschritt 3 wurden nur zwei Prädiktoren ausgewählt. Mit zunehmender Meereshöhe nahm die Menge an Schäden ab, und zunehmende Bestandesspitzhöhe ist mit größerer Schadensmenge assoziiert. Der relative Einfluss beider Erklärenden ist annähernd gleich.

BRTs

Die ausgewählten Verzweigungskriterien für die boosted regression trees werden von der Meereshöhe dominiert (Tab. 5). Knapp 41 % des gesamten Einflusses wird durch die Variable erklärt, und alle anderen Variablen haben jeweils Anteile kleiner als 6 %. Das Bestandesalter stellt die zweitwichtigste Variable dar (5,8 %), gefolgt von der modellierten Böengeschwindigkeit zum Zeitpunkt Lothar. An vierter Stelle folgen die absoluten planmäßigen Entnahmen, und der Abstand zum westlich vorgelagerten Waldrand ist die fünftwichtigste Variable, die Effekte von Verwirbelungen an abrupten Änderungen der Landoberfläche repräsentiert. Weitere wichtige Variablen sind die topographische Exponiertheit, die modellierte Böengeschwindigkeit bei Sturm Wiebke, und die absoluten Eingriffsmengen der gesamten Entnahmen. Der Einfluss der Baumart ist sehr gering (0,06 %).

Tabelle 5: Verzweigungsvariablen der BRTs sortiert nach relativem Einfluss (nur Variablen mit relativem Einfluss > 1 %).

Variable	relativer Einfluss [%]
HNN	40.6
Alter	5.8
Wind99	4.9
Vaus plan	4.7
WR	4.5
Topex	3.8
Wind90	3.5
Vaus	3.0
Vorschäden	2.7
letz1gr_Jahrseit	2.0
Wind50	2.0
Vausproz_plan	1.8
B0	1.6
sumabprozwlv	1.5
V	1.3
Vausproz_10j	1.3
DFQ_plan	1.3
HD100_5rel	1.3
DFQz	1.2
letz1gr_Vausproz	1.2
Vausproz	1.0

Zusätzlich zur Reihenfolge der Verzweigungsvariablen geben die Abhängigkeitsgrafiken Aufschluss über die Wirkzusammenhänge unter ceteris paribus Bedingungen. Dabei wird auf der x-Achse der Wertebereich einer Variablen und auf der y-Achse der Wert der angepassten Antwortvariablen, hier des logit-transformierten Anteils sturmgeschädigter Grundfläche, abgebildet. Eine Auswahl dieser Grafiken ist in Abb. 3 zu sehen.

Die absolute Entnahmemenge waldbaulicher Eingriffe erhöht demnach bis zu Werten von ca. 120 Efm/ha das Sturmschadensrisiko kontinuierlich (Abb. 3A). Oberhalb dieses Wertes bleibt das Risiko konstant. Die Wirkung nur der planmäßigen Entnahmen (Abb. 3B) ist dem jedoch genau entgegengesetzt, wobei der Sättigungswert hier bei ca. 150 Efm liegt. Die Zunahme von Sturmschäden mit steigendem Holzvorrat ist sehr deutlich ausgeprägt (Abb. 3C) und der Kurvenverlauf besonders steil zwischen 700 und 900 Vfm/ha. Der Durchforstungsquotient ist bis zum Wert von 1,2 ebenso positiv mit Sturmschäden korreliert (Abb. 3D). Bei höheren Werten nimmt das Sturmschadensrisiko leicht ab, verbleibt jedoch insgesamt auf einem hohen Niveau. Die für die letzten 10 Jahre gemittelte relative Entnahmemenge zeigt ebenso eine Labilisierung mit zunehmenden Werten an (Abb. 3E) und erreicht einen Sättigungspunkt bei 35%. Vorschädigungen durch Sturm wirken risikoe erhöhend, und in der Abhängigkeitsgrafik wird die für binär kodierte Variablen typische Treppenform beim Wert 0,5 ersichtlich (Abb. 3F).

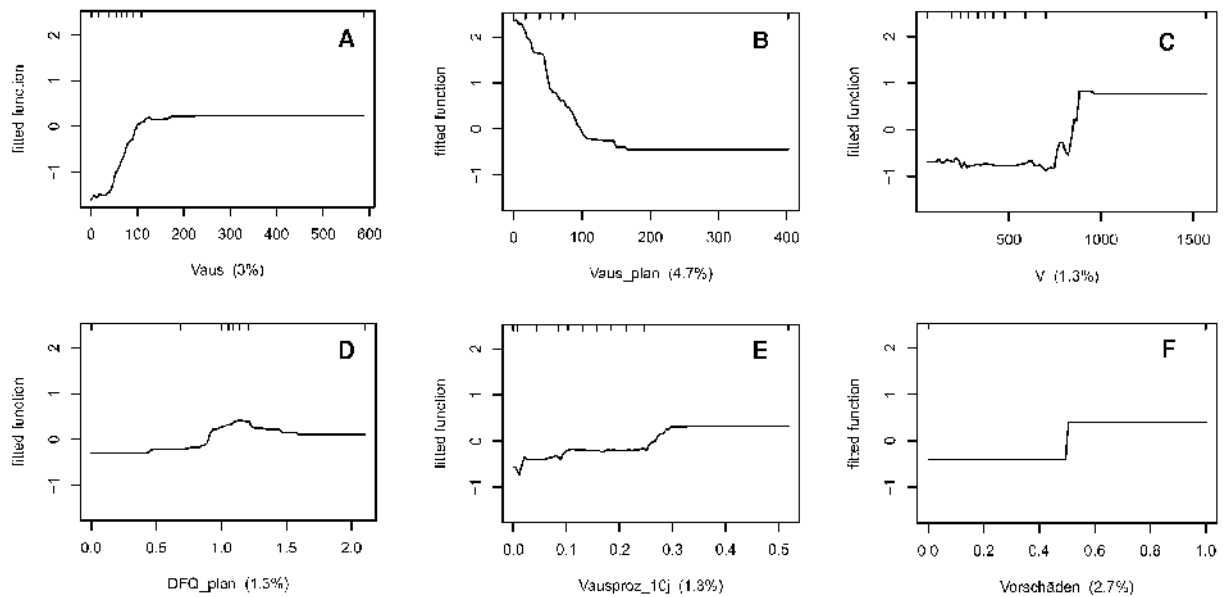


Abbildung 3: Abhängigkeitsgrafiken für sechs ausgewählte Verzweigungskriterien der BRTs. Jede Teilgrafik zeigt auf der y-Achse die angepasste Funktion (fitted function=logit(P)) in Abhängigkeit der Werte der jeweiligen Variablen (x-Achse). Die kurzen Linien am oberen Rand der Grafik beschreiben die Verteilung (Dezile) der Beobachtungen auf diese Variablen als Teppichplot. Die Werte in Klammern der x-Beschriftung quantifizieren den relativen Einfluss der jeweiligen Variablen.

Beide Auswertungsmethoden weisen waldbaulichen Eingriffen sowohl stabilisierenden als auch labilisierenden Einfluss zu. Besonders durch die Entnahme mitherrschender oder beschädigter Stämme und durch die Förderung vorherrschender, stabiler Bäume können planmäßige Durchforstungen (Abb. 4B) auch kurzfristig stabilitätsfördernd wirken. Bisher wurde die stabilitätsfördernde Wirkung von Durchforstungen vorwiegend für die mittel- bis langfristige Betrachtung berichtet, die besonders durch dichterreduzierende Eingriffe in jungen Beständen erzielt wird (CREMER et al. 1982, MACCURREACH 1991, SLODICÁK 1995). Die hier geschilderten Ergebnisse der auch kurzfristigen Stabilisierungswirkung von Durchforstungen werden deshalb als neue Erkenntnis eingestuft. Durch hohe Entnahmemengen oder durch Eingriffe ins Herrschende kehren sich diese Effekte jedoch ins Gegenteil um und führen zu erheblicher Labilisierung der Bestände (Abb. 4D, 4E). Dieser Labilisierungseffekt steht im Einklang mit Ergebnissen anderer Untersuchungen und ist im Wesentlichen durch das Unterbrechen des Kronendaches und der damit verbundenen vorübergehenden Verminderung der Kollektivstabilität verbunden (ACHIM et al. 2005, DOBBERTIN 2002, JALKANEN und MATTILA 2000, MASON 2002, PERRY 2006). Die verbleibenden Einzelbäume sind durch die Durchforstung stärker exponiert, und die aufgeraute Kronenoberfläche kann zu einer Erhöhung von Turbulenzen führen. In den auf den Eingriff folgenden Jahren dehnen sich die Kronen aus und stabilisieren den Bestand sukzessive durch Wiederezusammenwachsen der benachbarten Kronen, so dass die Labilisierung nur temporär ist. Der Zeitraum bis zur Wiederherstellung des Kronenschlusses wurde in anderen Arbeiten auf zwischen drei und acht Jahren ermittelt (CREMER et al. 1982, LOHMANDER und HELLES 1987, SCHMID-HAAS und BACHOFEN 1991), während aufgrund der Datenlage in der vorliegenden Arbeit zu diesem Aspekt keine Aussagen möglich sind.

Der risikoerhöhende Effekt allgemeiner Entnahmen inklusive zufälliger Nutzungen gegenüber dem risikomindernden Effekt der nur planmäßigen Entnahmen wurde mit Hilfe beider Untersuchungsmethoden festgestellt. Die Differenzierung zwischen planmäßigen und allgemeinen Entnahmen erscheint deshalb für die Charakterisierung von Sturmrisiko wichtig.

Vergleich der Prädiktorenkategorien

Bei den BRTs werden topographische und Standortseigenschaften als wichtigste Prädiktorenkategorie eingestuft, die knapp 50 % des relativen Einflusses ausmacht (Tab. 6). Entnahmen folgen an zweiter Stelle, und meteorologische Informationen und Bestandescharakteristika erklären jeweils 11 % des Einflusses. Die anderen Kategorien erklären jeweils maximal 5 %. Bei den GLMMen stellen Entnahmen mit über 50 % Einfluss die wichtigste Kategorie dar, wohingegen topographische und Standortseigenschaften hier an zweiter Stelle folgen. An dritter Stelle steht hier die Bestandesdimension. Alle anderen Kategorien haben geringen Einfluss. Bei beiden Methoden hat die Baumart kaum Einfluss auf Sturmschäden.

Tabelle 6: relativer Einfluss der Prädiktorenkategorien für die beiden Untersuchungsmethoden BRT und GLMM.

Prädiktoren- kategorie	rel.Einfluss	
	BRT	GLMM
Topographie/Lage	49%	19%
Entnahmen	21%	54%
MeteoWind	11%	3%
Dimension	11%	18%
Dichte	5%	5%
Vorschäden	3%	0%
Standort/Boden	0.4%	0%
Art	0.06%	1.4%

Die Entnahmen weisen bei beiden Methoden bemerkenswert hohen Einfluss auf. Dass Durchforstungen generell labilisierenden Einfluss haben und wichtige Einflussfaktoren auf das Sturmrisiko darstellen, ist bekannt (DHÔTE 2005). Da ihr Einfluss den der Bestandesdimension aber sogar übersteigt, ist als neue Erkenntnis zu bewerten. Dieses Ergebnis ist dahingehend zu relativieren, dass in der untersuchten Datengrundlage kaum Parzellen enthalten sind, in die nicht eingegriffen wurde.

Der Einfluss der modellierten Böengeschwindigkeiten von 1990 und 1999 auf die tatsächlichen Sturmschäden war gering. Dieser Befund ist jedoch nicht verwunderlich, da die beiden Stürme in einem gemeinsamen Modellierungsansatz zusammengefasst wurden. Folglich ist die Sensitivität der Böengeschwindigkeiten der Einzelereignisse nicht mehr gegeben. Alternativ stand auch die langfristige durchschnittliche Böengeschwindigkeit mit jährlicher Überschreitungswahrscheinlichkeit von 2 % als Prädiktor zur Verfügung. In dieser Variablen hätte dann die allgemeine Korrelation von Böengeschwindigkeiten mit Sturmschäden mehrerer Ereignisse Ausdruck gefunden. Sie wurde allerdings in den GLMMen nicht und in den BRTs als Prädiktor mit nur geringem relativem Einfluss ausgewählt. Dieser Befund verdeutlicht die Schwierigkeiten, die mit der Modellierung von Böenwindgeschwindigkeiten bei seltenen Ereignissen und der chaotischen Strukturen von Sturmschäden verbunden sind. Die in der vorliegenden Arbeit verfolgte gemeinsame Modellierung von Schäden zweier Sturmereignisse hatte bewusst hohe Priorität, um die allgemeinen Risikofaktoren zu extrahieren, die dem einzelnen Ereignis überlagert sind und verallgemeinerte Gültigkeit besitzen.

Der relative Einfluss des Prädiktors Baumart ist für beide Untersuchungsmethoden sehr gering. In starkem Gegensatz zu diesem Befund herrscht in der Forstpraxis derzeit die Einschätzung vor, dass Douglasie im Vergleich mit Fichte deutlich sturmfester sei. Diese Einschätzungen stützen sich weitestgehend auf die höhere Stammstabilität, flexiblere und plastischere Kronen sowie tiefere Durchwurzelung von Douglasien (GROTH 1927, HERMANN 2005, MCMINN 1963, NICOLL et al. 2006, PETERSON 2000, STUDHOLME 1995). In Ergänzung zu den wenigen Untersuchungen, die Aussagen zur empirischen Sturmgefährdung von Douglasie in Mitteleuropa zulassen (LOHMANDER und HELLES 1987, RIOU-NIVERT 2003, SCHÜTZ et al. 2006), müssen wir unsere Ergebnisse allerdings dahingehend werten, dass Douglasie im Vergleich zu Fichte nicht sturmfester ist.

Schlussfolgerungen

Nach der Berücksichtigung von Bestandesdimension, Standortseigenschaften und waldbaulichen Eingriffen zeigt sich, dass das Sturmrisiko von Douglasie auf den untersuchten langfristigen waldwachstumskundlichen Versuchsflächen ähnlich hoch einzustufen ist wie das der Fichte.

Waldbauliche Systeme für Douglasie in Mitteleuropa sollten vor dem Hintergrund eines allgemein hohen Sturmrisikopotentials revidiert werden. Lange Umtriebszeiten und hohe Zieldurchmesser müssen insbesondere vor dem Hintergrund des enormen Höhenwachstums der Douglasie als große Risikofaktoren angesehen werden. Neben diesen bekannten Risikofaktoren wurden waldbauliche Eingriffe als weitere wichtige Erklärende für Sturmschäden gefunden.

Aus der Sicht der Sturmschadensbegrenzung in Wirtschaftswäldern erscheint es notwendig, dichte Naturverjüngungen frühzeitig ausdünnen oder die künstliche Bestandesbegründung mit niedriger Pflanzanzahl vorzunehmen. Diese Maßnahmen fördern sowohl das Durchmesser- als auch das Wurzelwachstum und minimieren die Notwendigkeit hochrisikanter Durchforstungseingriffe zum späten Zeitpunkt in der Bestandesentwicklung, wenn aufgrund großer Bestandeshöhen das Risikoniveau hoch ist.

Literatur

- ACHIM A, RUEL J-C, GARDINER BA, LAFLAMME G und MEUNIER S (2005) Modelling the vulnerability of balsam fir forests to wind damage. *Forest Ecology and Management* 204:35-50
- ALBRECHT A (2009) Sturmschadensanalysen langfristiger waldwachstumskundlicher Versuchsflächendaten in Baden-Württemberg. Dissertation, Universität Freiburg
- BENGTSSON L, HODGES KI, ROECKNER E und BROKOPF R (2006) On the natural variability of the pre-industrial European climate. *Climate Dynamics* 27:743-760
- BMVEL (2006) Ergebnisse der 2. Bundeswaldinventur von 2001/2, Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft, <http://www.bundeswaldinventur.de/enid/0bdf8c191b727d322030f33996ba0f12,0/66.html>. letzter Zugriff: 10. August 2011
- BOUCHON J (1987) État de la recherche relative aux dégâts forestiers dus aux tempêtes. *Revue Forestière Française* 39:301-312
- BRANDL H (1988) Entwicklungen der Ertragslage der vier Baumarten Fichte, Kiefer, Buche und Eiche im Staatsforstbetrieb von Baden-Württemberg und ihr Einfluß auf die waldbauliche Planung. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 159:164-170
- CREMER KW, BOROUGH CJ, MCKINNEL FH und CARTER PR (1982) Effects of stocking and thinning on wind damage in plantations. *New Zealand Journal of Forestry Science* 12:244-268
- DHÔTE J-F (2005) Implication of Forest Diversity in Resistance to Strong Winds. In: Scherer-Lorenzen M et al. (eds.) *Forest diversity and function*. Springer, Berlin-Heidelberg, S. 291-307, DOI: 210.1007/1003-1540-26599-26596_26514
- DÍAZ-URIARTE R und DE ANDRÉS SA (2006) Gene selection and classification of microarray data using random forest. *BMC Bioinformatics* 7:
- DOBBERTIN M (2002) Influence of stand structure and site factors on wind damage comparing the storms Vivian and Lothar. *Forest Snow and Landscape Research* 77:187-205
- ELITH J und GRAHAM CG (2009) Do they? How do they? WHY do they differ? On finding reasons for differing performance of species distributions models. *Ecography* 66-77
- ELITH J, LEATHWICK JR und HASTIE T (2008) A working guide to boosted regression trees. *Journal of Animal Ecology* 77:802-813
- FRIEDMAN JH (2001) Greedy Function Approximation: A Gradient Boosting Machine. *Annals of Statistics* 29:1189-1232
- FRIEDMAN JH und MEULMAN JJ (2003) Multiple additive regression trees with application in epidemiology. *Statistics in Medicine* 22:1365-1381
- GROTH O (1927) Die Wurzelbildung der Douglasie und ihr Einfluß auf die Sturm- und Schneefestigkeit dieser Holzart. Universität Freiburg, Sonderdruck der AFJZ 1927 (Jahrgang 103), Heft Mai bis Juni
- HANEWINKEL M, BREIDENBACH J, NEEF T und KUBLIN E (2008) 77 years of natural disturbances in a mountain forest area - the influence of storm, snow and insect damage analysed with a long-term time-series. *Canadian Journal of Forest Research* 38:2249-2261
- HASTIE T, TIBSHIRANI R und FRIEDMAN J (2009) *The Elements of Statistical Learning*. Springer, New York
- HEIDINGSFELDER A und KNOKE T (2004) Douglasie versus Fichte. J. D. Sauerländer's Verlag, Frankfurt a. M.
- HENEKA P, HOFHERR T, RUCK B und KOTTMEIER C (2006) Winter storm risk of residential structures - model development and application to the German state of Baden-Württemberg. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 6:721-733
- HERMANN RK (2005) Wurzelstudien an Douglasie - ein Literaturüberblick. In: Dong P H (eds.) *Zum Anbau und Wachstum der Douglasie*. Mitteilungen aus der Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz Nr. 55/05, Trippstadt, S. 135-164
- HURRELL JW, KUSHNIR Y und VISBECK M (2001) The North Atlantic Oscillation. *Science* 291:603-605
- JALKANEN A und MATTILA U (2000) Logistic regression models for wind and snow damage in northern Finland based on the National Forest Inventory data. *Forest Ecology and Management* 135:315-330
- KAMPICHLER C, WIELAND R, CALMÉ S, WEISSENBERGER H und ARRIAGA-WEISS S (2010) Classification in conservation biology: A comparison of five machine-learning methods. *Ecological Informatics* 5:441-450
- LECKEBUSCH G, KOFFI B, ULBRICH U, PINTO JG, SPANGHEHL T und ZACHARIAS S (2006) Analysis of frequency and intensity of European winter storm events from a multi-model perspective, at synoptic and regional scales. *Climate Research* 31:59-74
- LITTELL RC, MILLIKEN GA, STROUP WW, WOLFINGER RD und SCHABENBERGER O (2006) *SAS for Mixed Models*. SAS Institute Inc., Cary, NC
- LOHMANDER P und HELLES F (1987) Windthrow Probability as a Function of Stand Characteristics and Shelter. *Scandinavian Journal for Forest Research* 2:227-238
- MACCURREN RS (1991) Spacing: an option for reducing storm damage. *Scottish Forestry* 45:285-297

- MAINDONALD J und BRAUN J (2007) Data Analysis and Graphics Using R - An Example-Based Approach. Cambridge University Press, Cambridge
- MASON WL (2002) Are irregular stands more windfirm? *Forestry* 75:347-355
- MCMINN RG (1963) Characteristics of Douglas-Fir Root Systems. *Canadian Journal of Botany* 41:105-122
- NICOLL BC, GARDINER BA, RAYNER B und PEACE AJ (2006) Anchorage of coniferous trees in relation to species, soil type, and rooting depth. *Canadian Journal of Forest Research* 36:1871-1883
- PERRY T (2006) Wind damage in Maine Forests: Trends and vulnerability assessment. Master Thesis, The University of Maine
- PETERSON CJ (2000) Catastrophic wind damage to North American forests and the potential impact of climate change. *The Science of the Total Environment* 262:287-311
- RIDGEWAY G (2006) Generalized boosted regression models. Documentation on the R package "gbm", version 1.5-7. <http://www.i-pensieri.com/gregr/gbm.shtml>. Accessed
- RIOU-NIVERT P (2003) Tempêtes et dégâts aux forêts : évolution sur le XXe siècle. Programme International Géosphère Biosphère - Programme Mondial de recherches sur le climat (PIGB-PMRC) n°15:46-49
- SCHMID-HAAS P und BACHOFEN H (1991) Die Sturmgefährdung von Einzelbäumen und Beständen. *Schweizerische Zeitschrift für das Forstwesen* 142:477-504
- SCHÜTZ J-P, GÖTZ M, SCHMID W und MANDALLAZ D (2006) Vulnerability of spruce (*Picea abies*) and beech (*Fagus sylvatica*) forest stands to storms and consequences for silviculture. *European Journal of Forest Research* 125:291-302
- SLODICÁK M (1995) Thinning regime in stands of norway spruce subjected to snow and wind damage. In: Coutts M P und Grace J (eds.) *Wind and Trees*. Cambridge University Press, Cambridge, S. 436-447
- STUDHOLME WP (1995) The experience of and management strategy adopted by the Selwyn Plantation Board, New Zealand. In: Coutts M P und Grace J (eds.) *Wind and Trees*. Cambridge University Press, Cambridge, S. 468-476
- THERNEAU, T. M. und ATKINSON, B., 2008, R port by Brian Ripley, rpart: Recursive Partitioning , R package version 3.1-41, 3.1-35, <http://mayoresearch.mayo.edu/mayo/research/biostat/splufunctions.cfm>
- THE SAS INSTITUTE INC. (2006) The GLIMMIX Procedure - June 2006. <http://support.sas.com/rnd/app/papers/glimmix.pdf>. Accessed 8.12.2008
- V. TEUFFEL K, HEINRICH B und BAUMGARTEN M (2004) Present distribution of secondary Norway spruce in Europe. In: H. Spiecker J H, E. Klimo, J.P. Skovsgaard, H. Sterba, K.v. Teuffel (eds.) *Norway spruce conversion - options and consequences*. Brill, Leiden - Boston, S. 63-96
- VENABLES WN und RIPLEY BD (2002) *Modern applied statistics with S*. Springer, New York