

THOMAS, F. M., R. BLANK und G. HARTMANN (2002): Abiotic and biotic factors and their interactions as causes of oak decline in Central Europe. *Forest Pathology* **32**: 277–307.

UTSCHIG, H., H. HERLING und H. PRETZSCH (2006): Veränderte Umweltbedingungen schaffen 13 Prozent mehr Wachstum. *LWF aktuell* **52**: 44–46.

WEISSTEIN, E. W. (2011): Spearman Rank Correlation Coefficient./Wilcoxon Rank Sum Test. From MathWorld – A Wolfram Web Resource. <http://mathworld.wolfram.com/SpearmanRankCorrelationCoefficient.html> / <http://mathworld.wolfram.com/WilcoxonRankSumTest.html> (16.08.2011)

ZIEGLER, C. (2004): Die Waldzustandserhebung zeigt nicht alles. *LÖBF-Mitteilungen* (4): 16–17.

## Modellbasierte Simulation waldbaulicher Anpassungsstrategien an den Klimawandel am Beispiel des niedersächsischen Harzes

Aus der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt, Grätzelstraße 2, D-37079 Göttingen

(Mit 8 Abbildungen und 8 Tabellen)

MARC OVERBECK<sup>\*</sup>), MATTHIAS SCHMIDT, RALF NAGEL und JAN HANSEN

(Angenommen August 2012)

### SCHLAGWÖRTER – KEY WORDS

*Waldbau; Klimawandel; Wasserdefizit; Borkenkäferbefall; Sturmschaden; Risikoprofil; Anpassungsstrategien; Harz.*

*Silviculture; climate change; water shortage; bark beetle infestation; windthrow; risk profiles; adaptive strategies; Harz Mountains.*

### 1. EINLEITUNG

Natürliche Störungen, die durch Stürme, Trockenheit oder Insektenkalamitäten verursacht werden, sind ein integraler Bestandteil von Waldökosystemen (OTTO, 1994). Diese Störungen bedeuten für den Forstbetrieb Risiken, da sie im Eintrittsfall die Erfüllung der Waldfunktionen beeinträchtigen oder sogar vollständig gefährden können (WAGNER, 2004). Möglichkeiten zur Risikominderung, beispielsweise durch den Anbau standortgerechter Baumarten, werden in den Waldbau-richtlinien der Länder berücksichtigt. Hierbei wird von konstanten standörtlichen Verhältnissen ausgegangen. Die Beurteilung, ob eine Baumart standortgerecht ist, basiert in der Regel auf der gutachtlichen Einschätzung des Wasser- und Nährstoffangebotes sowie der klimatischen Gegebenheiten. Angesichts des Klimawandels ist allerdings davon auszugehen, dass sich die Standortbedingungen verändern und natürliche Störungen in Waldökosystemen zunehmen werden (WERNER et al., 2000; LECKEBUSCH und ULBRICH, 2004; WERMELINGER;

2004; ROUAULT et al., 2006; PINTO et al., 2007), so dass eine Ergänzung der üblichen Planungsgrundlagen um modellbasierte dynamische Anpassungsstrategien erforderlich ist.

Die Forstwirtschaft ist bedingt durch die langen Produktionszeiträume der Wirtschaftsbaumarten und ihre Ortsgebundenheit in besonderem Maße vom Klimawandel betroffen. Natürliche Anpassungsprozesse von Waldökosystemen können angesichts des Ausmaßes und der Geschwindigkeit des Klimawandels die Veränderungen nicht kompensieren, so dass die Waldfunktionen in unseren vielfältig genutzten Wäldern mittelfristig durch adaptierte waldbauliche Maßnahmen aktiv gesichert werden müssen. Dabei existiert schon jetzt eine Vielzahl von Handlungsempfehlungen und Überlegungen zu waldbaulichen Anpassungsstrategien an den Klimawandel (NOSS, 2001; WAGNER, 2004; SPELLMANN et al., 2007; BOLTE et al., 2009; KÖLLING et al., 2010). Diese stützen sich im Wesentlichen auf Expertenwissen und beschränken sich überwiegend auf allgemeine Aussagen wie z. B. die Notwendigkeit zur Diversifizierung des Arteninventars (z. B. WAGNER, 2008; JENSSEN, 2009; SEPPÄLÄ, 2009). Andere Studien sind auf Grund ihrer geringen räumlichen Auflösung nur bedingt geeignet, um auf der Ebene forstlicher Planungseinheiten konkrete Handlungsempfehlungen abzuleiten (z. B. JANSEN et al., 2008).

Darüber hinaus sind die Prognosen baumartenspezifischer Gesamtrisiken (HANEWINKEL et al., 2010; KÖLLING et al., 2010) nur bedingt operational, da die zugrunde liegenden Einzelrisiken verschiedene waldbauliche Anpassungsstrategien erfordern können. Es ist vielmehr notwendig, die Risiken getrennt von einander zu betrachten und sie unter veränderten Klimabedingun-

<sup>\*</sup>) Korrespondierender Autor: MARC OVERBECK.  
Elmweg 17, D-38170 Schöppenstedt.  
E-Mail: [Marc.Overbeck@nfp.niedersachsen.de](mailto:Marc.Overbeck@nfp.niedersachsen.de)

gen fortzuschreiben (SPELLMANN, 2011). Anstelle von undifferenzierten Gesamtrisiken sollten somit Risiko-profile als Grundlage waldbaulicher Entscheidungen verwendet werden.

Bislang existieren nur wenige Studien (z.B. KÖHL et al., 2010), die die Auswirkungen waldbaulicher Anpassungsstrategien an den Klimawandel auf die Baumartenverteilung, die Vorratsstruktur und die langfristigen Nutzungsmöglichkeiten prognostizieren. Auch fehlen Analysen zur Umsetzbarkeit und Effizienz der vorgeschlagenen Maßnahmen.

In der vorliegenden Studie wird die Eintrittswahrscheinlichkeit der Risiken Wasserdefizit, Borkenkäferbefall und Windwurf auf Bestandesebene durch statistische Modelle eingeschätzt. Durch die differenzierte Schätzung einzelner Risikokomponenten können standortsabhängige Risikoprofile unterschieden werden. Darauf aufbauend werden konkrete waldbauliche Anpassungsmaßnahmen formuliert, die:

- a) über die Empfehlung standortgerechter Baumarten langfristig und
- b) über die Formulierung waldbaulicher Behandlungskonzepte mittelfristig auf die sich ändernden Risiken reagieren.

Anhand einer 50-jährigen Simulation für die Bestände der Modellregion niedersächsischer Harz werden die Auswirkungen der formulierten waldbaulichen Anpassungsmaßnahmen auf die Struktur des Waldes exemplarisch abgeschätzt und ihre Wirksamkeit in Bezug auf die Gefährdung der Bestände analysiert. Der Vergleich von drei waldbaulichen Nutzungsszenarien zeigt einen möglichen Handlungsrahmen für die Praxis auf. Darüber hinaus kann die vorliegende Studie als konzeptionelle Grundlage zur Überprüfung bisheriger Waldbaustrategien und für zukünftige strategische Waldbauplanungen für Großregionen genutzt werden.

## 2. MATERIAL UND METHODEN

### 2.1 Die Modellregion

Die Modellregion befindet sich im Niedersächsischen Harz. Der Harz ist das größte Mittelgebirge Norddeutschlands mit einer Ausdehnung von ca. 90 km Länge und 30 km Breite (Abb. 1). Geologisch betrachtet ist der Harz eine in NW-SO-Richtung streichende Pultscholle mit überwiegend paläozoischen Gesteinen, die

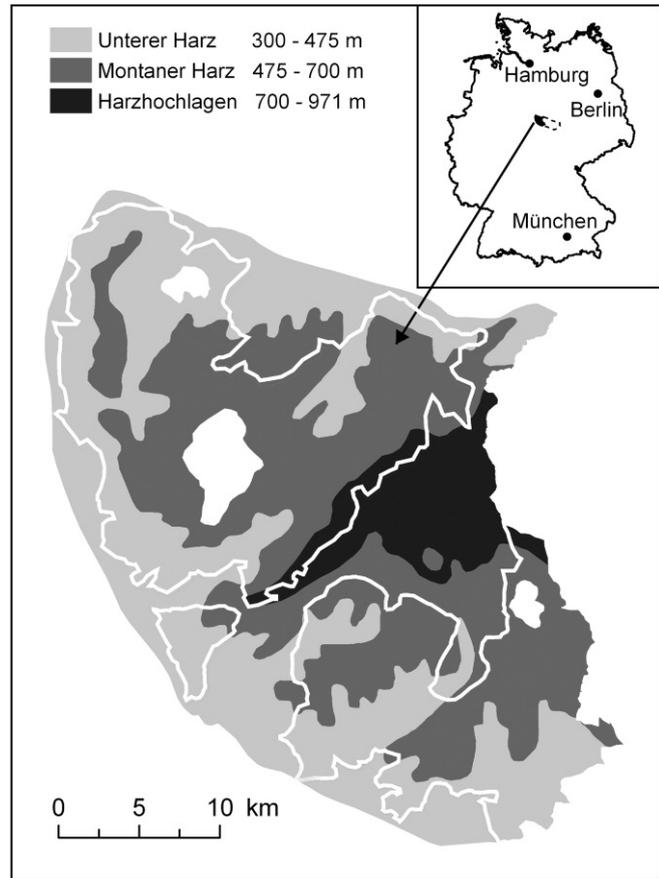


Abb. 1

Niedersächsischer Harz mit Höhenstufen, dessen Lage in Deutschland und Umriss der Modellregion (weiße Linie).

Lower Saxon Harz with altitude levels, its location in Germany and shape of the model region (white line).

sich über die jüngeren Schichten der Umgebung heraushebt.

Der niedersächsische Harz weist eine starke vertikale Gliederung auf. Aus den 300 m üNN liegenden Unteren Harzlagen steigt er bis auf 971 m üNN in den Harzhochlagen an. Das Klima im niedersächsischen Harz ist durch hohe Niederschläge und relativ geringe Temperaturen geprägt (Tab. 1, OTTO, 1991).

Tab. 1

#### Durchschnittliche Klimawerte (Mittelwerte 1961–1990) im niedersächsischen Harz.

Climate normals (mean values 1961–1990) from the Lower Saxon Harz.

Merkmale	Höhe üNN [m]		
	300-475 Unterer Harz	475-700 Montaner Harz	700-971 Harzhochlagen
Niederschlag [mm] Jan.-Dez.	1.060	1.235	1.430
Niederschlag [mm] Mai-Sept.	450	490	530
Temperatur [°C] Jan.-Dez.	6.8	5.7	4.6
Temperatur [°C] Mai-Sept.	13.3	12.2	10.8
Frosttage (Tmin < 0°C)	108	127	149
Sommertage (Tmax > 25°C)	13	10	6

Die Modellregion niedersächsischer Harz beschränkt sich auf Flächen des Landeswaldes ohne den Nationalpark Harz und umfasst ein Gebiet von etwa 52.000 ha (Abb. 1). Die Flächen verteilen sich annähernd zu gleichen Teilen auf die unteren und die montanen Harzlagen. Die Harzhochlagen sind mit einem Flächenanteil von etwa 1% in der Modellregion nur von geringer Bedeutung. Die Standortkartierung (Nds.MfdIRELV, 2004) weist auf 83% der Fläche „frische“ Standorte aus, die Nährstoffeinschätzung entspricht auf 25% der Fläche einer „mäßigen“ (Nährstoffziffer 3) und auf 58% einer „ziemlich guten“ (Nährstoffziffer 3+ bis 4) Nährstoffversorgung. Auf diesen Standorten würden sich überwiegend die Waldgesellschaften des Luzulo Fagetum typicum und des Luzulo Fagetum dryopteridetosum entwickeln. Die Fichte (*Picea abies* (L.) Karst.) ist mit einem Flächenanteil von 72% die dominierende Baumart und hat ein durchschnittliches Alter von 76 Jahren. Hierbei handelt es sich überwiegend um sekundäre Fichtenwälder. Wälder mit natürlicher Fichtenbeteiligung sind ab einer Höhe von 700 m bis 800 m üNN zu erwarten (BEUG et al., 1999). Die Buche (*Fagus sylvatica* L.) ist mit 21% Flächenanteil die zweite bedeutsame Baumart im Westharz und im Mittel 84 Jahre alt. Naturschutzfachlich begründete Schutzgebiete sind auf 12% der Fläche ausgewiesen. Es handelt sich dabei zu über 90% um „Naturwirtschaftswälder“ (OTTO, 1989), die überwiegend zu reinen Buchenbeständen entwickelt werden sollen.

## 2.2 Datengrundlagen

Die verwendeten Risikomodelle sind standorts- und bestandessensitiv. Aus diesem Grund wurden die Bestandesdaten der Forsteinrichtung mit den Daten der Standortkartierung verschnitten. Hieraus resultierten 49.075 Polygone. Diese werden im Weiteren als Planungseinheiten bezeichnet. Planungseinheiten kleiner 0,2 ha wurden nicht berücksichtigt und der größten Planungseinheit eines Bestandes zugeordnet. Zur Initialisierung der Modelle werden für jede Planungseinheit die in Tabelle 2 aufgeführten Eingangsparameter benötigt.

Die verwendeten Klimadaten basieren auf dem globalen Zirkulationsmodell ECHAM5/MPI-OMT63L31 (ROECKNER et al. 2003, 2004). Für die Modellschätzungen wurden bias-korrigierte (MUDELSEE et al., 2010; PIANI et al., 2010), regionalisierte (OLCHEV et al., 2008)

Klimaprojektionen des Klimamodells REMO (JACOB et al., 2009) unter Annahme des SRES-Szenarios A1B verwendet (IPPC, 2000).

Zur Erfassung der Exponiertheit bzw. Beschattung wurde der Topex-to-Distance Index (SCOTT und MITCHELL, 2005) auf Basis eines digitalen Geländemodells mit einer Auflösung von 20 m berechnet. Zur Ableitung eines Bestandeswertes wurden die Einzelwerte aller 20 x 20 m Kacheln gemittelt, deren Centroid innerhalb einer Planungseinheit liegt.

Für die Baumarten Traubeneiche (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.), Buche, Fichte und Douglasie (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) erfolgte eine standortssensitive und schichtenweise Schätzung der Höhe (hg) (Schmidt, 2010 b) und des Durchmessers (dg) des Grundflächenmittelstammes auf Basis von Betriebsinventurdaten unter Verwendung eines verallgemeinerten additiven gemischten Regressionsmodells (gamm) mit der Annahme, dass die Zielvariable gammaverteilt ist und die Kovariablen exponentiell multiplikativ auf die Zielvariable wirken:

$$\log \{E[dg_{ijkl}]\} = \text{Bestandesschicht}_{ijk}^T \beta_1 + \text{GW\_klasse}_{ijk}^T \beta_2 + \text{Nährstoffziffer}_{ijk}^T \beta_3 + f_1(\text{Alter}_{ijk}) * \text{Schicht\_1}_{ijk} + f_2(\text{Alter}_{ijk}) * \text{Schicht\_2}_{ijk} + f_3(\text{nFK}_{ijk}) * \text{GW\_1}_{ijk} + f_4(\text{nFK}_{ijk}) * \text{GW\_2}_{ijk} + f_4(\text{HNN}) + Z_i * b_i + Z_{ij} * b_{ij}, dg_{ijk} \sim \text{Gamma und } b = (b_i, b_{ij}) \sim N(0, \psi)$$

mit:

$dg_{ijkl}$ : Baumartengruppenweise berechneter Grundflächenmittelstamm [mm] der Bestandesschicht  $l$ , in Bestand  $k$ , in Revier  $j$  und Forstamt  $i$ , wobei nur Schichten betrachtet werden, deren Bäume eine maximale Altersdifferenz von 10 Jahren aufweisen,

$\text{Bestandesschicht}_{ijk}$ : Indikatorvektor zur Definition der Schicht mit den Kategorien: „Hauptbestand“, „Überhalt“, „Nachwuchs“,

$\text{GW\_klasse}_{ijk}$ : Indikatorvektor zur Definition der Grundwasserklasse mit den Kategorien „starker Grundwassereinfluss“, „mäßiger Grundwassereinfluss“, „ohne Grundwassereinfluss“,

Tab. 2

**Unabhängige Variablen der verwendeten Modelle (KWB\_V = klimatische Wasserbilanz in der Vegetationsperiode, TempSum\_V = Temperatursumme in der Vegetationsperiode, nFK = nutzbare Feldkapazität, Anteil = Mischungsanteil Fichte, dg und hg = Durchmesser und Höhe des Grundflächenmittelstammes).**

**Independent variables in the models (KWB\_V = climatic water balance during growing season, TempSum\_V = thermal sum during growing season, nFK = available water capacity, Anteil = proportion of spruce, dg and hg = diameter and height of mean basal area tree).**

Modell	unabhängige Variablen							
	KWB_V	TempSum_V	Topex	Bodendaten	nFK	Art	Alter	Anteil dg, hg
Wasserdefizit	X				X			
Borkenkäfer		X	X		X	X	X	X
Sturm			X	X		X		X

Nährstoffziffer<sub>ijk</sub>: Indikatorvektor zur Definition der Nährstoffkategorie,

Alter<sub>ijk</sub>: Mittleres Alter [J] der Baumartengruppe,

Schicht\_1<sub>ijk</sub>: Dummyvariable, die den Wert 1 annimmt, wenn die Bestandesschicht die Kategorie „Hauptbestand“ oder „Überhalt“ aufweist und anderenfalls den Wert 0,

Schicht\_2<sub>ijk</sub>: Dummyvariable, die den Wert 1 annimmt, wenn die Bestandesschicht die Kategorie „Nachwuchs“ aufweist und anderenfalls den Wert 0,

nFK<sub>ijk</sub>: Nutzbare Feldkapazität [mm], (OVERBECK et al., 2011),

GW\_1<sub>ijk</sub>: Dummyvariable, die den Wert 1 annimmt, wenn die GW\_klasse<sub>ijk</sub> die Kategorie „starker Grundwassereinfluss“ oder „mäßiger Grundwassereinfluss“ aufweist und anderenfalls den Wert 0,

GW\_2<sub>ijk</sub>: Dummyvariable, die den Wert 1 annimmt, wenn die GW\_klasse<sub>ijk</sub> die Kategorie „ohne Grundwassereinfluss“ aufweist und anderenfalls den Wert 0,

HNN<sub>ijk</sub>: Seehöhe [m]

$\beta_1, \beta_2, \beta_3$ : Vektoren von Koeffizienten zur Beschreibung der Effekte der Kategorien der Bestandesschicht, des Grundwassers und der Nährstoffziffer

$f_1, f_2, f_3, f_4$ : 1-dimensionale glättende Funktionen (penalisierte thin-plate-Basis Regressions-splines).

$Z_i, Z_{ij}$ : Zeilen in Design-Matrizen zur Kodierung der Zufallseffekte auf der Ebene des Forstamtes  $i$  bzw. des Reviers  $j$  innerhalb des Forstamtes  $i$ .

$b_i, b_{ij}$ : Zufallseffekte für Forstamt  $i$  bzw. für Revier  $j$  innerhalb des Forstamtes  $i$ .

$\psi$ : Positiv-definite Kovarianzmatrix

Hieraus resultierten realitätsnahe dg-Schätzungen, wogegen eine ertragstafelbasierte dg-Schätzung zu einer systematischen Unterschätzung geführt hätte (WOLLBORN und BÖCKMANN, 1998).

## 2.3 Modellbasierte Risikoeinschätzung und Risikodefinitionen

Zur Umsetzung waldbaulicher Anpassungsstrategien müssen die Risiken zunächst auf der Ebene forstlicher Planungseinheiten eingeschätzt werden. Zur Berücksichtigung des Risikos in der langfristigen Waldbauplanung (Baumartenwahl) wurden die verwendeten Modelle mit Daten von Klimaprojektionen der Periode 2071–2100 (2085) initialisiert. Für vorhandene Bestände wurden mittelfristige waldbauliche Behandlungskonzepte auf Grundlage von Klimaprojektionen der Periode 2046–2075 (2060), dem Ende des Simulationszeitraumes, entwickelt. Hieraus resultieren in Abhängigkeit von der Fragestellung zwei Risikoeinschätzungen mit unterschiedlichem Zeitbezug. Zusätzlich wurden die Risiken der Periode 2006–2035 geschätzt, um Behandlungsstrategien für die Bestände zu entwickeln, die bis dahin ihre reguläre Zielstärke erreichen können. Hier-

durch war es möglich, die dynamische Entwicklung des Risikos zu berücksichtigen.

### 2.3.1 Risiken durch Wasserdefizit

Das Risiko durch Wasserdefizit wurde über die Summe der Klimatischen Wasserbilanz in der Vegetationsperiode (KWB\_V) und der nutzbaren Feldkapazität (nFK, pflanzenverfügbares Bodenwasser) bestimmt. Die nFK wurde auf Basis der Standortskartierung mit Hilfe eines verallgemeinerten additiven Regressionsmodells mit explizit räumlicher Komponente geschätzt (OVERBECK et al., 2011). Der Schwellenwert für Buche und Fichte, ab dem ein Risiko durch Wasserdefizit besteht, wurde in Anlehnung an MÜLLER (2006) und SPELLMANN et al. (2011) auf  $-150$  mm festgelegt, wobei eine Grasreferenzfläche zur Berechnung der Evapotranspiration verwendet wurde. Der einheitliche Schwellenwert für Fichte und Buche erscheint insofern geeignet, da für die Fichte das Risiko durch Borkenkäferbefall (Kap. 2.3.2) separat quantifiziert wird und daher hier nicht mehr zu berücksichtigen ist.

Die Einschätzung des Wasserdefizites dient vor allem der Berücksichtigung von einzelnen Extremjahren. Daher wurden Jahresmittelwerte der Klimaprojektionen verwendet und das Risiko durch Wasserdefizit wie folgt definiert:

- Geringes Risiko: Der Schwellenwert wird innerhalb der 30-jährigen Periode nie unterschritten.
- Mittleres Risiko: Der Schwellenwert wird innerhalb der 30-jährigen Periode nicht häufiger als drei Mal unterschritten
- Hohes Risiko: Der Schwellenwert wird innerhalb der 30-jährigen Periode häufiger als drei Mal unterschritten.

### 2.3.2 Risiko durch Borkenkäferbefall

Das Risiko eines Bestandes, innerhalb von zehn Jahren durch Borkenkäfer befallen zu werden, wurde unter Verwendung eines binären gemischten linearen Regressionsmodells geschätzt (OVERBECK und SCHMIDT, 2012). Das Modell ist sensitiv gegenüber den Bestandesparametern Alter und Mischungsanteil der Fichte sowie gegenüber den Standortparametern nFK, Temperatursumme in der Vegetationsperiode und dem mittleren Topex für die Expositionen Südwest, Süd und Südost bei einer Grenzdistanz von 150 m.

Zur Beurteilung des langfristigen Anbaurisikos der Fichte bei der Baumartenwahl müssen die Standorte untereinander vergleichbar sein. Aus diesem Grund wurden die Bestandesparameter bzw. deren Modelleffekte konstant gesetzt, so dass die Unterschiede lediglich aus den Standorteffekten resultieren. Die Risikoschätzung der Periode 2085 erfolgte daher für 100-jährige Fichtenreinbestände. Für die Schätzung des mittelfristigen Risikos zur Umsetzung waldbaulicher Behandlungskonzepte wurde der Fichtenanteil aus den Bestandesdaten übernommen und das Alter auf das Jahr 2060 fortgeschrieben.

Die Spanne der Schätzungen für das Befallsrisiko durch Borkenkäfer liegt zwischen 0 und 82%. Zur

Bestimmung relativer Risikoklassen wurde die Spanne der Modellschätzungen für beide betrachtete Perioden in drei gleich große Bereiche eingeteilt.

- Geringes Risiko:  $\leq 27\%$  Befallswahrscheinlichkeit
- Mittleres Risiko:  $> 27\text{--}55\%$  Befallswahrscheinlichkeit
- Hohes Risiko:  $> 55\%$  Befallswahrscheinlichkeit

### 2.3.3 Risiko durch Windwurf

Das Windwurfrisiko wurde mit Hilfe eines binären additiven Regressionsmodells mit explizit räumlicher Komponente geschätzt (SCHMIDT et al., 2010 a). Das verwendete Modell ist sensitiv gegenüber der Baumart und der Baumhöhe, dem HD-Wert, einer 3-stufigen Vernäsungskategorie und einer expositionsabhängigen Variante des Topex-to-Distance-Index mit einer Grenzdistanz von 1000 m. Dieser modifizierte Topex-Index erlaubt Schätzungen, die sensitiv sowohl gegenüber der Geländeform als auch der Windrichtung bzw. deren Wechselwirkung sind.

Um den Einfluss der Standorte herauszuarbeiten, wurde das Windwurfrisiko für einen Wintersturm aus südwestlicher Richtung für 100-jährige Eichen-, Buchen-, Fichten- und Douglasienbestände geschätzt. Das Windwurfrisiko liegt zwischen 0 und 61%. Zur Bestimmung relativer Risikoklassen wurde die Spanne der Modellergebnisse in drei gleich große Bereiche eingeteilt.

- Geringes Risiko: 0–20% Windwurfwahrscheinlichkeit
- Mittleres Risiko: >20–40% Windwurfwahrscheinlichkeit
- Hohes Risiko: >40–61% Windwurfwahrscheinlichkeit

### 2.3.4 Risikoprofile

Aus den möglichen Kombinationen der Einzelrisiken ergeben sich verschiedene Risikoprofile. Risikoprofile, die im Hinblick auf die resultierende Baumartenwahl beziehungsweise die mittelfristigen waldbaulichen Behandlungskonzepte vergleichbar sind, wurden zu Risikogruppen aggregiert (Tab. 3). Risikoprofile, deren Flächenanteil in beiden Betrachtungszeiträumen kleiner 1% ist, wurden nicht aufgeführt.

## 2.4 Die Szenariodefinitionen

Um den Effekt unterschiedlicher waldbaulicher Anpassungsstrategien an den Klimawandel auf die Struktur der Wälder abschätzen zu können, wurden drei verschiedene Nutzungsszenarien über einen Zeitraum von 50 Jahren simuliert.

Das Szenario „naturnaher Waldbau“ (naturnah) entspricht im Wesentlichen einer modellhaften Umsetzung des Programms zur langfristigen ökologischen Waldentwicklung für die Niedersächsischen Landesforsten (OTTO, 1989; Nds.MfdIRELV, 2004). Modellbasierte Risikoschätzungen (Tab. 3) wurden dabei nicht berücksichtigt. Waldbauliche Entscheidungen erfolgten primär auf Grundlage der forstlichen Standortskartierung und der Klimakennwerte der Wuchsbezirke. Übergeordnetes Ziel ist es, standortgerechte Mischbestände (OTTO, 1989) zu etablieren und den Laubholzanteil langfristig auf etwa 65% anzuheben. Daher wurden ab einer „ziemlich guten“ Nährstoffeinschätzung Bestände mit überwiegend führendem Laubholz geplant.

Das Szenario Risikominimierung (R\_min) sieht vergleichbar dem naturnahen Szenario standortgerechte Baumartenmischungen und ab einer „ziemlich guten“ Nährstoffeinschätzung Bestände aus führendem Laub-

Tab. 3

**Risikoprofile und ihre Zuordnung zu Risikogruppen der lang- und mittelfristigen Waldbauplanung (Baumartenwahl bzw. Behandlung) sowie ihr Flächenanteil innerhalb der Modellregion.**

**Risk profiles and their designation as risk classes in long- and medium-term silvicultural planning (tree species selection and silviculture treatment) as well as their percentage within the model region.**

Risikoprofil			Risikogruppe Baumartenwahl		Risikogruppe Behandlung	
Borkenkäferbefall	Wasserdefizit	Windwurf	Periode 2085	%	Periode 2060	%
mittel	gering	mittel	1	25.0	4	14.6
mittel	gering	gering	1	8.4	4	4.7
gering	gering	mittel	1	<1	3	8.7
gering	gering	gering	1	<1	1	4.4
hoch	mittel	mittel	2	8.0	5	10.6
mittel	mittel	mittel	2	2.3	5	6.9
hoch	mittel	gering	2	2.3	5	2.5
gering	gering	hoch	2	<1	2	1.2
mittel	mittel	gering	2	<1	5	2.0
gering	mittel	gering	2	<1	5	3.8
gering	mittel	mittel	2	<1	5	8.8
hoch	mittel	hoch	2	<1	6	1.0
gering	mittel	hoch	2	<1	6	1.1
hoch	gering	mittel	3	32.4	4	18.2
hoch	gering	gering	3	12.6	4	6.6
hoch	gering	hoch	3	4.4	2	1.6
mittel	gering	hoch	3	2.2	2	1.9

holz vor. Zusätzlich berücksichtigt das Szenario R\_min, wie auch das Szenario Nadelholzmaximierung (N\_max), die modellbasierten Risikoeinschätzungen (Tab. 3). Das Szenario N\_max ist weiterhin durch die bevorzugte Planung von Beständen mit führendem Nadelholz gekennzeichnet, sofern diese standortsgemäß sind. Waldschutzgebiete wurden in allen drei Nutzungsszenarien wie „Naturwirtschaftswälder“ behandelt. Die modellbasierte Risikoeinschätzung blieb hier bei der mittel- und langfristigen Waldbauplanung unberücksichtigt. Die Baumartenwahl orientierte sich an der potentiell natürlichen Vegetation (pnV), abgeleitet aus der Höhenstufe und Bodeninformationen. Die Anzahl zu belassender Habitatbäume (lebende Bäume, die aus naturschutzfachlichen Gründen nicht genutzt werden) erhöhte sich für die Schutzgebiete von 5 auf 7 je ha.

#### 2.4.1 Definition und Zuordnung der Zielbestockung in den Nutzungsszenarien

Für die Simulation der drei Szenarien muss zunächst für jede Planungseinheit die langfristig angestrebte Zielbestockung festgelegt werden, da diese nach erfolgter Endnutzung den Folgebestand bildet und darüber hinaus die Wahl der Habitatbäume und die Dauer der Endnutzung (Verjüngungszeitraum) beeinflusst. Im naturnahen Szenario sollen die dominierenden Fichtenreinbestände überwiegend in Mischbestände aus Buche, Fichte und zum Teil Douglasie überführt und Buchenbestände durch Fichte angereichert werden. In den Szenarien R\_min und N\_max war übergeordnetes Ziel, die Bestände weiter zu diversifizieren, um deren Resistenz

und Resilienz gegenüber Störungen zu erhöhen (BENGTSSON, 2000; GRIESS et al., 2012). Daher wurden alternativ zu Fichte und Buche vermehrt Eiche, Roteiche (*Quercus rubra* L.), Weißtanne (*Abies alba* Mill.), Lärche (*Larix spec.*) und Douglasie berücksichtigt (Tab. 4).

#### 2.4.2 Definition und Zuordnung der Behandlungskonzepte in den Nutzungsszenarien

Zur Simulation der mittelfristigen Anpassungsmaßnahmen an veränderte Umweltbedingungen müssen für jede Planungseinheit neben der Zielbestockung auch die waldbaulichen Behandlungskonzepte definiert werden. Die Behandlungskonzepte leiten sich aus den Risikoprofilen ab (Tab. 3) und sind für die Szenarien R\_min und N\_max identisch.

In den Szenarien R\_min und N\_max wurden in Abhängigkeit des Risikoprofils die Umtriebszeiten durch Herabsetzen der Zielstärke verkürzt sowie stärkere Eingriffe in der ersten Durchforstungsphase und variierende Formen der Endnutzung simuliert (Tab. 5). Insbesondere die Herabsetzung der Zielstärke ist geeignet, um Risiken, die mit dem Alter oder der Höhe von Beständen korrelieren, beispielsweise Borkenkäferbefall oder Windwurf, zu reduzieren (SCHMIDT et al., 2010 a; STAUPENDAHL und MÖHRING, 2011; OVERBECK und SCHMIDT, 2012). Stärkere Eingriffe in der Jugendphase führen zu geringeren HD-Werten und können Nadelholzbestände stabilisieren (ABETZ, 1976; VANOMSEN, 2006). Darüber hinaus kann die Zielstärke früher erreicht (SPELLMANN und NAGEL, 1996) und das Bodenwasserangebot erhöht werden (GEBHARDT et al., 2010; KOHLER et al., 2010).

Tab. 4

#### Risikogruppen der langfristigen Waldbauplanung sowie Abweichungen gegenüber dem naturnahen Szenario in der Baumartenplanung der alternativen Szenarien R\_min und N\_max.

Risk classes in long-term silvicultural planning with respect to tree species planning in the alternative scenarios R\_min und N\_max as well as deviations with respect to semi-natural scenario.

Szenario	Risikogruppe und Baumartenplanung		
	1	2	3
	Geringe Risiken durch Wasserdefizit und geringe oder mittlere Risiken durch Borkenkäfer und Windwurf.	Mittleres Risiko durch Wasserdefizit, wechselnde Risiken durch Borkenkäfer und geringe oder mittlere Risiken durch Windwurf.	Hohes Risiko durch Borkenkäfer oder Windwurf, geringes Risiko durch Wasserdefizit.
R_min	Erhöhung der Stabilität durch Diversifizierung. Ausschöpfen des Baumartenspektrums, sofern standortgemäß. Stärkere Berücksichtigung von Eiche und Roteiche (bis 500 m üNN) sowie von Weißtanne und Lärche.	Eiche und Roteiche ersetzen die Buche bis 500 m üNN. Die Fichte wird im Wesentlichen durch Douglasie und Weißtanne ersetzt.	Die Fichte wird im Wesentlichen durch Douglasie und Weißtanne ersetzt.
N_max	Konsequente Planung von standortgemäßen Beständen mit führendem Nadelholz. Bei einem Laubholzanteil (primär Buche) von 10-45%.	Buche und Fichte werden im Wesentlichen durch Douglasie und Weißtanne ersetzt.	Die Fichte wird im Wesentlichen durch Douglasie und Weißtanne ersetzt.

Tab. 5

**Risikogruppen der mittelfristigen Waldbauplanung und waldbauliche Behandlungsparameter für die Hauptbaumarten in Abhängigkeit der verschiedenen Simulationsszenarien (UH = Untere Harzlagen, MH= Montaner Harz, Lh = Laubholz, Ndh = Nadelholz).**

**Risk classes in medium-term silvicultural planning and silvicultural management parameters for main tree species in relation to the varying simulation scenarios (UH = Lower Harz, MH = Upper Harz, Lh = deciduous trees, Ndh = coniferous trees).**

Risikogruppe	Waldbau Parameter Hauptbaumarten Harz	Alle Szenarien			
				Schutzgebiete	
1. Überwiegend geringe Risiken	<u>Zielstärke</u>	UH	MH	UH	MH
	Fichte/Tanne	45	45	40	40
	Buche	65	60	65	65
	Dgl	65	60	50	50
	Pflegetyp	Z-Baum orientiert			
	B° nach Erstdurchforstung Ndh	0,8			
	B° nach Erstdurchforstung Lh	0,8			
	Nutzungstyp	Zielstärke			
Abweichungen der Szenarien R <sub>min</sub> und N <sub>max</sub> gegenüber dem naturnahen Szenario					
2. Hohes Windwurfisiko, geringes Risiko durch Wasserdefizit, wechselnde Risiken durch Borkenkäferbefall	<u>Zielstärke</u>	UH	MH		
	Fichte/Tanne	35	35		
	Dgl	60	55		
	Pflegetyp	freie Hochdurchforstung			
	B° nach Erstdurchforstung Ndh	0,7			
	Nutzungstyp	flächig			
3. Mittleres Windwurfisiko, geringes Risiko durch Borkenkäfer oder Wasserdefizit	Pflegetyp	freie Hochdurchforstung			
	B° nach Erstdurchforstung Ndh	0,7			
	Nutzungstyp	Zielstärke/Schirmschlag			
4. Hohes und mittleres Risiko durch Borkenkäfer, überwiegend mittleres Windwurfisiko, geringes Risiko durch Wasserdefizit	<u>Zielstärke</u>	UH	MH		
	Fichte/Tanne	40	40		
	B° nach Erstdurchforstung Ndh	0,7			
	Nutzungstyp	Zielstärke/Schirmschlag			
5. Mittleres Risiko durch Wasserdefizit bei wechselnden Risiken durch Borkenkäfer und überwiegend mittlerem Risiko durch Windwurf	<u>Zielstärke</u>	UH	MH		
	Fichte/Tanne	40	40		
	Buche	60	55		
	B° nach Erstdurchforstung Ndh	0,7			
	Nutzungstyp	Zielstärke/Schirmschlag			
6. Hohes Windwurfisiko und mittleres Risiko durch Wasserdefizit bei wechselnden Risiken durch Borkenkäfer	<u>Zielstärke</u>	UH	MH		
	Fichte/Tanne	35	35		
	Buche	60	55		
	Dgl	60	55		
	Pflegetyp	freie Hochdurchforstung			
	B° nach Erstdurchforstung Ndh	0,7			
	Nutzungstyp	flächig			

## 2.5 Szenariosimulationen

Die Szenariosimulationen (Abb. 2) wurden mit Hilfe des Programms WaldPlaner 2.1 (HANSEN, 2011) durchgeführt. Für die Initialisierung der Simulationen wurde für jede Planungseinheit ein Ausgangsbestand auf Basis der zugehörigen Forsteinrichtungsdaten aufgebaut. Die Etablierung natürlicher Verjüngung wurde unter Verwendung eines logistischen Regressionsmodells in Abhängigkeit vom Ausgangsbestand und des Bestockungsgrades berücksichtigt (NAGEL, 2009). Investive Verjüngung wurde im Zuge der Endnutzung auf den noch nicht natürlich verjüngten Bereichen jeder Planungseinheit entsprechend der zugewiesenen Zielbestockung realisiert.

## 3. ERGEBNISSE

### 3.1 Die Baumartenverteilung in der Modellregion

Im Folgenden werden die auf standörtlicher Grundlage langfristig angestrebten Baumartenanteile der drei Nutzungsszenarien im Sinne einer Zielbestockung dargestellt. Dem gegenüber steht die bis zum Ende der 50-jährigen Szenariosimulation realisierte Baumartenverteilung.

#### 3.1.1 Die langfristig angestrebte Baumartenverteilung

Für alle drei Nutzungsszenarien ergibt sich in der langfristigen Planung gegenüber dem Bezugsjahr 2011 eine deutliche Diversifizierung der Baumartenverteilung

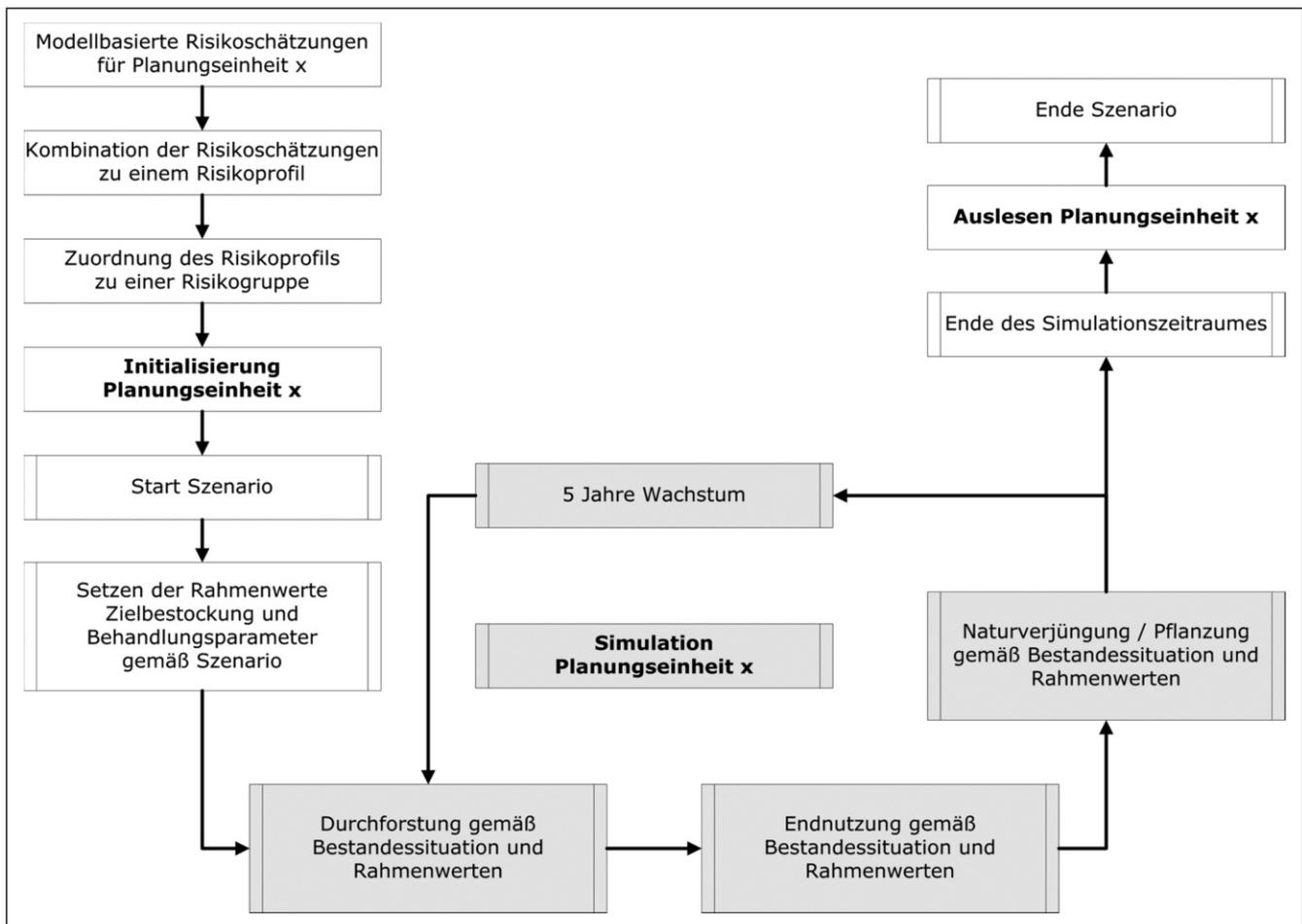


Abb. 2  
Ablauf der Szenariosimulation.  
Scenario simulation course.

(Tab. 6). Aus den Szenarien naturnah und R\_min resultiert eine Umkehr des Laub- und Nadelholzanteils gegenüber dem Bezugsjahr. Für das Szenario N\_max ergeben sich annähernd ausgeglichene Anteile von Laub- und Nadelholz. Im naturnahen Szenario würde die Buche mit einem Anteil von 47%, der mehr als einer Verdoppelung gegenüber dem Ausgangszustand von 2011 entspricht, zur Hauptbaumart der Modellregion (Tab. 6). Dagegen ginge der Fichtenanteil auf nur noch 19% zurück. Weiterhin hat dieses Szenario einen erheblichen Anstieg an Douglasie und Aln (Erle (*Alnus glutinosa* L.), Eberesche (*Sorbus aucuparia* L.) und Birke (*Betula spec.*)) zur Folge. Fichte und Douglasie werden auf Risikostandorten (hohes Risiko für Borkenkäferbefall oder Windwurf oder Wasserdefizit in der Periode 2085) weniger häufig geplant als auf Standorten mit geringeren Risiken. Eine noch stärkere Diversifizierung der Baumartenzusammensetzung als im naturnahen Szenario ergibt sich für das Szenario R\_min. Diese resultiert aus dem höheren Anteil an Eiche, Rot-Eiche, Weißtanne und Lärche. Fichte und Weißtanne werden stark unterproportional, Douglasie stark überproportional auf Risikostandorten geplant.

Das Szenario N\_max ist gegenüber den beiden anderen Nutzungsszenarien durch einen erheblich geringe-

ren Buchenanteil an der Zielbestockung gekennzeichnet. Durch einen größeren Anteil an Weißtanne und Lärche, weist dieses Szenario im Vergleich zum naturnahen Szenario ebenfalls eine höhere Diversifizierung auf. Mit einem Anteil von 25% würde die Douglasie in diesem Szenario zur bedeutendsten Nadelbaumart der Modellregion weit vor der Fichte, die nur noch auf einen Anteil von knapp 11% käme. Stark bevorzugt würde die Douglasie vor allem auf Risikostandorten, während Fichte und Lärche hier deutlich unterproportional geplant werden.

### 3.1.2 Die Baumartenverteilung am Ende des Simulationszeitraumes

Am Ende der 50-jährigen Szenariosimulation ergibt sich für alle drei Nutzungsszenarien gegenüber dem Referenzjahr 2011 eine deutliche Veränderung in den Baumartenanteilen (Abb. 3). Insbesondere wird dies im Rückgang des Fichtenanteils und in der Zunahme von Douglasie und Alh (primär Bergahorn (*Acer pseudo-platanus* L.)) deutlich. Der Anteil des Nadelholzes liegt in allen drei Szenarien bei über 60% und damit immer noch deutlich über den langfristig angestrebten Anteilen.

Tab. 6

Mischungsanteile der Baumarten im Jahr 2011 sowie der langfristig angestrebte Mischungsanteil in den drei Szenariosimulationen stratifiziert in risikoarme Standorte und Risikostandorte (Alh = Edellaubbäume, Aln = Weichlaubhölzer).

Proportion of tree species in the reference year 2011 along with the expected long-term composition in three scenario simulations stratified into low risk and key risk sites. (Alh = valuable broadleaved trees, Aln = broadleaved softwoods).

Art	langfristig angestrebter Mischungsanteil [%]											
	Referenz 2011			naturnah			R_min			N_max		
	gesamt	Risikostandort ja	Risikostandort nein	gesamt	Risikostandort ja	Risikostandort nein	gesamt	Risikostandort ja	Risikostandort nein	gesamt	Risikostandort ja	Risikostandort nein
Ei	1	2	0	1	1	0	8	11	2	1	1	0
Bu	21	26	9	47	48	44	45	45	44	34	34	34
Alh	2	4	2	7	8	5	7	7	5	6	6	4
Aln	1	1	1	12	12	12	11	11	11	13	13	11
Fi	72	64	86	19	17	22	7	2	15	11	9	14
Ta	0	0	0	0	0	0	6	4	10	8	7	9
Dgl	1	1	1	13	12	15	11	13	9	25	31	14
Lä	2	2	1	2	3	0	5	6	3	5	0	14
Laubholz	25	33	12	66	68	62	71	75	63	52	54	50
Nadelholz	75	67	88	34	32	38	29	25	37	48	46	50

Die Unterschiede in den Baumartenanteilen am Ende des Simulationszeitraumes sind zwischen den einzelnen Nutzungsszenarien geringer als die Unterschiede dieser Endzustände zum Referenzjahr (Abb. 3). Im Szenario R\_min wird der Fichtenanteil am stärksten reduziert und gegenüber dem Bezugsjahr nahezu halbiert. Der Anteil anderer Nadelhölzer (Weißtanne, Douglasie und Lärche) wird auf etwa 25% ausgebaut und liegt damit deutlich über dem Anteil dieser Baumarten im naturnahen Szenario. Der Laubholzanteil in diesen beiden Szenarien ist annähernd gleich und wird gegenüber dem Jahr 2011 um insgesamt etwa 15% erhöht. Das Szenario N\_max hat mit knapp 70% den höchsten Nadelholzanteil. Die Douglasie ist daran mit etwa 15% vertreten.

Der Buchenanteil verändert sich gegenüber 2011 nur wenig. Die gegenüber dem Ausgangszustand dennoch zu verzeichnende Laubholzzunahme wird von steigenden Edellaubholz- und Weichlaubholzanteilen getragen.

### 3.2 Die Entwicklung von Nutzung, Vorrat und Gesamtzuwachs

#### 3.2.1 Nutzung

Im Verlauf der 50-jährigen Szenariosimulation steigt das jährlich genutzte Volumen in allen drei Nutzungsszenarien zunächst stark an (Abb. 4). Die drei Szenarien unterscheiden sich vorerst deutlich, bevor sie gegen Ende der Simulation vergleichbare Nutzungssätze annehmen.

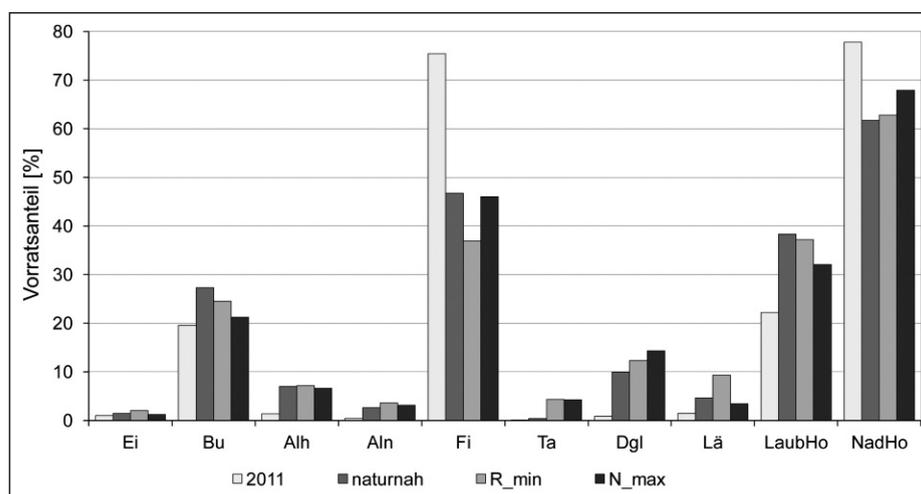


Abb. 3

Vorratsanteile der Baumarten im Bezugsjahr 2011 und für die drei Nutzungsszenarien am Ende der 50-jährigen Simulation.

Percentage of growing stock in the reference year 2011 and for the three scenarios at the end of a 50-year simulation.

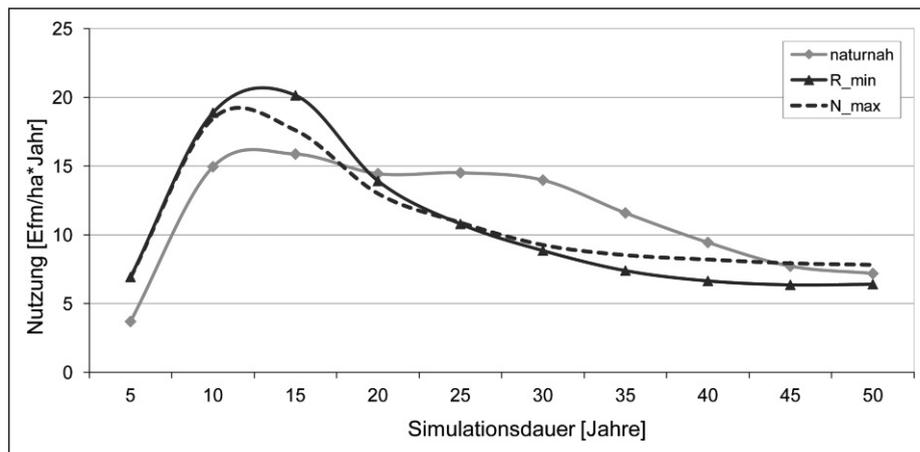


Abb. 4

Entwicklung des jährlichen Nutzungssatzes der drei Waldentwicklungsszenarien über alle Baumarten für den Simulationszeitraum 2011 bis 2061.

Development of planned yearly cuts in three forest development scenarios for all tree species in the simulation period 2011 to 2061.

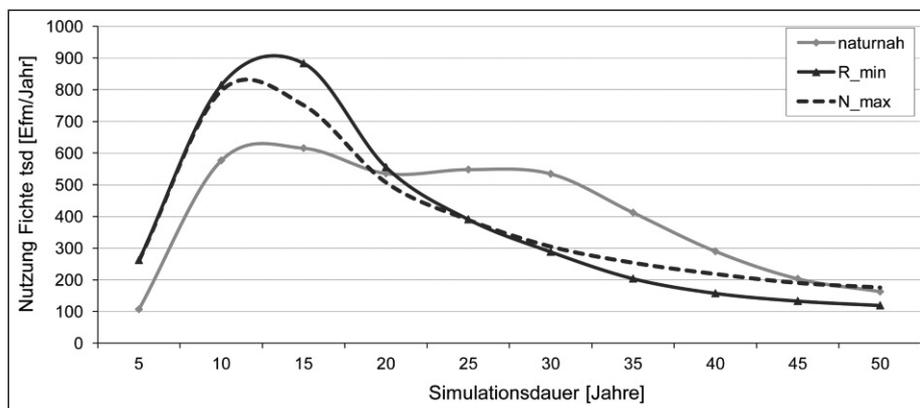


Abb. 5

Entwicklung der jährlichen Nutzung an Fichtenholz für die drei Waldentwicklungsszenarien.

Development of the yearly harvest of Norway spruce timber in three forest development scenarios.

Nach einem zehnjährigen starken Anstieg bleibt im naturnahem Szenario das jährlich genutzte Holzvolumen von etwa 15 Efm/ha über 20 Jahre annähernd konstant und fällt danach bis zum Ende der Simulation stetig auf etwa 7 Efm/ha ab. Die jährlichen Nutzungen der Szenarien R\_min und N\_max steigen im Vergleich zum naturnahen Szenario zunächst noch stärker an und erreichen Maxima von etwa 20 Efm/ha. Nach 15 Jahren gehen die Nutzungen dieser beiden Szenarien stark zurück und unterschreiten nach 20 Jahren das Niveau des naturnahen Szenarios. Nach 35 Jahren bleiben die jährlichen Nutzungen der Szenarien R\_min und N\_max annähernd konstant. Am Ende des Simulationszeitraumes liegt die jährliche Nutzung des Szenarios N\_max mit etwa 8 Efm/ha um 1,5 Efm/ha über dem Wert des Szenarios R\_min und um 0,6 Efm/ha über dem naturnahen Szenario.

Die jährlichen Nutzungen der Fichte (Abb. 5) bestimmen im Wesentlichen den Verlauf des Gesamtnutzungs-

satzes und weisen im Vergleich zu diesem sehr ähnliche zeitliche und szenariobedingte Verläufe auf. In der ersten Phase der Simulation liegen die jährlichen Einschlagsmengen der Szenarien R\_min und N\_max mit etwa 850.000 bzw. 775.000 Efm um 30 bzw. 23% über dem naturnahen Szenario. Nach 25 Jahren liegt das naturnahe Szenario für 15 Jahre um 150.000 bis 200.000 Efm über den beiden alternativen Szenarien. Am Ende der Simulation resultieren für das Szenario R\_min um etwa 30% geringere Fichtennutzungen als für die Szenarien naturnah und N\_max.

Die Nutzungen der Buche (Abb. 6) steigen in den ersten zehn Jahren zunächst stark an und verharren dann bis zum Ende des Simulationszeitraumes weitestgehend auf dem erreichten Niveau. Die Unterschiede zwischen den Nutzungsszenarien sind nur geringfügig. Stets die höchsten Nutzungen in der Buche weist das Szenario N\_max auf. Im Szenario R\_min liegt die Nutzung der Buche in den ersten 35 Jahren über der des

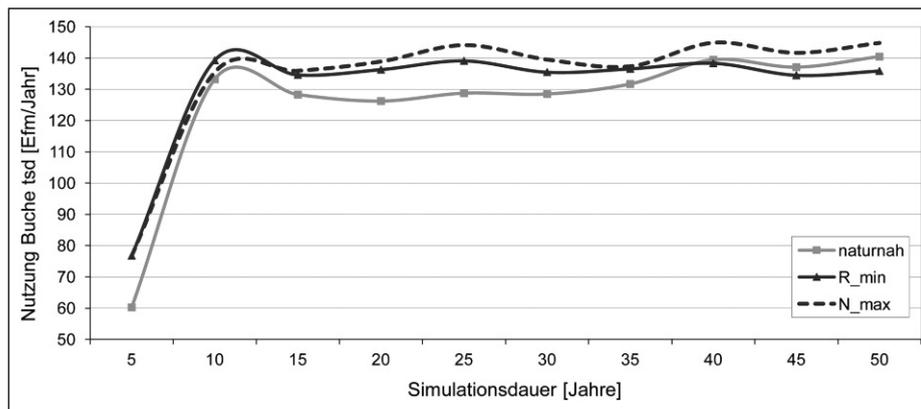


Abb. 6

Entwicklung der jährlichen Nutzung an Buchenholz für die drei Waldentwicklungsszenarien.

Development of the yearly harvest of beech timber in three forest development scenarios.

naturnahen Szenarios. Am Ende des Simulationszeitraumes macht die Buchennutzung für das Szenario N\_max einen Anteil von ca. 35% des Nutzungssatzes aus. Für die Szenarien naturnah und R\_min beträgt dieser Anteil sogar etwa 40%.

### 3.2.2 Vorratsentwicklung und Gesamtwuchsleistung

Die gegenwärtig in der Modellregion stockenden hohen Durchschnittsvorräte von über 350 Vfm/ha kennzeichnen den Ausgangszustand der Waldentwicklungssimulationen. Das naturnahe Szenario baut diesen Vorrat über einen Zeitraum von 40 Jahren kontinuierlich auf etwa 225 Vfm/ha ab (Abb. 7). Am Ende der Simulation deutet sich wieder eine steigende Tendenz in der Vorratsentwicklung an. Die Szenarien R\_min und N\_max senken dagegen den Vorrat zunächst deutlich schneller ab. Sie erreichen ein Minimum von nur etwa 200 Vfm/ha im Szenario R\_min bzw. 250 Vfm/ha im Szenario N\_max bereits nach 30 Jahren. Früher als im naturnahen Szenario beginnt anschließend ein erneuter Vorratsaufbau, der sich im Szenario R\_min vom absolut niedrigsten Niveau kommend am schnellsten vollzieht. Gegen Ende

der Simulation liegt der Durchschnittsvorrat aller drei Szenarien in einer vergleichbaren Größenordnung von 235 bis 260 Efm/ha.

Bei einer baumartenspezifischen Betrachtung der Vorratsstruktur nach dg-Klassen am Ende des Simulationszeitraumes wird offensichtlich, dass der Vorrat an starkem Fichtenholz in allen drei Nutzungsszenarien verhältnismäßig hoch ist (Abb. 8). Der Fichtenvorrat der dg-Klasse > 50 cm repräsentiert zu einem wesentlichen Teil Habitatbäume, die aus ökologischen Gründen nicht genutzt werden. Die einzelnen Szenarien unterscheiden sich nur geringfügig in der Vorratsstruktur der dg-Klassen > 50 cm wie auch im Vorrat an Buche aller dg-Klassen. In den dg-Klassen ≤ 30 cm fällt der höhere Gesamtvorrat der Szenarien R\_min und N\_max gegenüber dem naturnahen Szenario auf. Dieser resultiert primär aus den höheren Vorräten an Douglasie und anderen Nadelholzbaumarten (aNho, Weißtanne und Lärche).

Der periodische Gesamtwuchs ergibt sich aus der Veränderung des Vorrates zwischen den Bezugsjahren 2011 und 2061 zuzüglich der zwischenzeitlichen Holz-

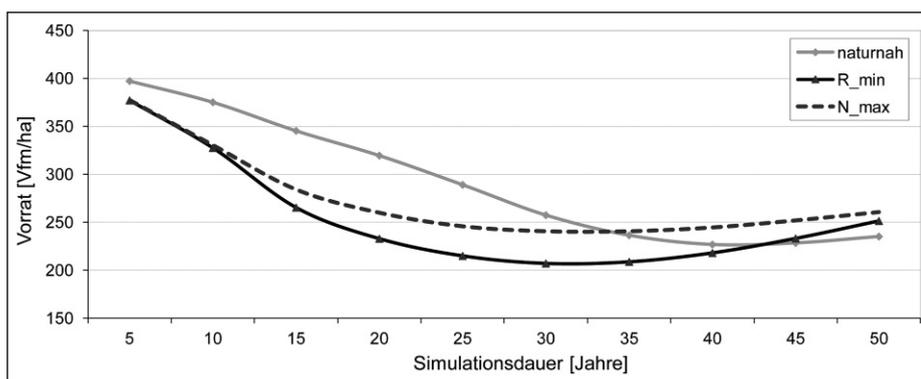


Abb. 7

Entwicklung des Gesamtvorrates während der 50-jährigen Szenariosimulationen.

Development of total growing stock during the 50-year scenario simulation.

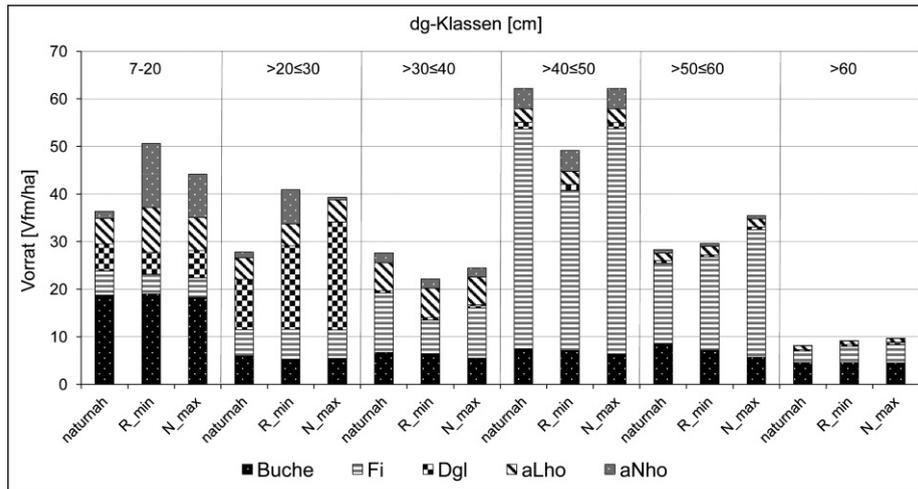


Abb. 8

Vorrat im Hauptbestand einzelner Baumarten der drei Nutzungsszenarien am Ende des Simulationszeitraumes über dg-Klassen (aLho = anderes Laubholz, aNho = anderes Nadelholz).

Growing stock in dg-classes (aLho = other broadleaved trees, aNho = other coniferous trees) in main crop of different tree species for the three scenarios at the end of the simulation period.

nutzungen (Tab. 7) und ist im Szenario N\_Max bezogen auf alle Baumarten mit 588 Vfm/ha am höchsten. Der periodische Gesamtzuwachs der Fichte liegt im Szenario R\_min etwa 10% unter dem der Szenarien naturnah und N\_max. Der periodische Gesamtzuwachs der Buche liegt in den Szenarien R\_min und N\_Max geringfügig über dem des naturnahen Szenarios.

### 3.3 Effizienzanalyse

Im Bezugsjahr 2011 beträgt der Fichtenanteil auf Risikostandorten etwa 96% (Tab. 8). In allen drei Szenariosimulationen wird der Anteil der Fichte auf Risikostandorten im Vergleich zu Standorten mit geringeren Risiken überproportional stark auf Werte zwischen 42% (R\_min)

Tab. 7

**Vorrat, Nutzung und periodischer Gesamtzuwachs der drei Szenariosimulationen (Mittelwerte/ha, bezogen auf die Holzbodenfläche der Modellregion).**  
**Growing stock, harvest and periodical total growth in the three scenario simulations (means/ha, related to forest land in model area).**

	Szenarien											
	naturnah				R_min				N_max			
	Fi	Bu	andere	alle	Fi	Bu	andere	alle	Fi	Bu	andere	alle
Vfm/ha 2011	263	70	19	352	263	70	19	352	263	70	19	352
Vfm/ha 2061	111	69	55	235	99	68	84	251	122	62	76	261
Nutzung [Vfm/ha]	479	150	44	673	457	157	51	665	462	161	56	679
period. Gesamtzuwachs [Vfm/ha]	327	149	80	556	293	155	116	564	321	153	113	588

Tab. 8

**Vorratsanteile von Fichte und Buche auf Standorten unterschiedlicher Risikobeurteilung sowie deren Differenz zum Referenzjahr 2011.**  
**Percentage of growing stock of Norway spruce and beech at sites varying in risk classification and differences to the reference year 2011.**

Art und Standort	2011	Anteil [% , Vorrat] am Ende des Simulationszeitraumes					
		naturnah		R_min		N_max	
		Differenz		Differenz		Differenz	
Fi Risiko	96.4	60.3	-36.1	42.3	-54.1	49.2	-47.2
Fi kein Risiko	56.4	37.8	-18.6	32.5	-23.9	43.5	-12.9
Bu Risiko	24.3	30.6	6.3	24.2	-0.1	22.8	-1.5
Bu kein Risiko	17.1	25.4	8.3	24.7	7.6	20.4	3.3

und 60% (naturnah) gesenkt. In den Szenarien R\_min und N\_max ist die Differenzierung zwischen den beiden Standortskategorien „Risiko“ und „kein Risiko“ deutlich stärker ausgeprägt als im naturnahen Szenario. So beträgt beispielsweise der Rückgang des Fichtenanteils auf Risikostandorten im Szenario R\_min 54% und auf Standorten mit geringem Risiko nur knapp 24%.

Der Buchenanteil auf Standorten, deren Risiko durch Wasserdefizit am Ende des Simulationszeitraumes als mittel bzw. hoch geschätzt wird, beträgt im Bezugsjahr 2011 etwa 24% (Tab. 8). In den Szenarien R\_min und N\_max wird der Mischungsanteil der Buche auf diesen Standorten verringert und auf für sie risikoarmen Standorten erhöht. Im naturnahen Szenario wird der Buchenanteil unabhängig von der Risikoeinschätzung in einer vergleichbaren Größenordnung ausgebaut.

## 4. DISKUSSION

### 4.1 Datengrundlagen und Methodik

Die verwendeten Klimadaten zur Parametrisierung der Risikomodelle basieren auf einem einzigen globalen Zirkulationsmodell und auf einem einzigen Lauf eines Regionalmodells. Klimamodelle unterscheiden sich zum Teil erheblich in ihren Projektionen (JACOB et al., 2007) und die Auswahl eines bestimmten Klimamodells kann einen großen Teil der Unsicherheit von Wirkungsmodellen ausmachen (MBOGGA und HAMANN, 2008). Um diese Unsicherheit besser abbilden und kommunizieren zu können, sollten zukünftig Ensemble-Projektion auf der Basis mehrerer Klimamodelle angewendet werden.

Waldbauliche Anpassungsstrategien an den Klimawandel wurden auf der Grundlage von Modellen entwickelt, welche mit hoch auflösenden Standorts- und Bestandesdaten parametrisiert und initialisiert wurden (Tab. 2). Hierdurch ist es möglich, Standorte hinsichtlich ihrer Vulnerabilität miteinander zu vergleichen und Regeln auf der Ebene von forstlichen Planungseinheiten zu formulieren. Weiterhin wird in der hier vorliegenden Studie neben der klimatischen Wasserbilanz auch die Temperatursumme in der Vegetationsperiode berücksichtigt. Zusätzlich fließen Witterungsextreme, die einen entscheidend Einfluss auf die Vitalität von Beständen haben können (BOLTE und IBISCH, 2007), in die Risikobeurteilung ein, indem das Risiko durch Wasserdefizit nicht über Mittelwerte, sondern über Häufigkeiten innerhalb einer Periode definiert wird. Dieser Ansatz stellt eine Verbesserung gegenüber der von KÖLLING et al. (2010) gewählten Methodik dar, in der als einzige Klimavariablen die Jahresdurchschnittstemperatur verwendet wird. Zudem führt eine Risikobeurteilung von Baumarten unter Verwendung von Präsenz/Absenz Daten (HANEWINKEL et al., 2010; KÖLLING et al., 2010) stets zu einem Gesamtrisiko der jeweiligen Art. Spezifische und damit effektive waldbauliche Anpassungsmöglichkeiten sind mit einem solchen Ansatz nicht möglich. In der hier vorliegenden Studie werden Risiken im Bezug auf Wasserdefizit, Borkenkäferbefall und Windwurf separat von einander beschrieben. Dies ermöglicht waldbauliche Anpassungsmaßnahmen entsprechend spezifischer Risikoprofile (Tab. 3, 4 und 5). Beispielsweise können hohe Entnahmemengen in der Zielstärkennutzung zu einer

Destabilisierung der Bestände führen (BURSCHEL, 1981), sodass auf Standorten mit hohem Windwurfisiko ein Totalausfall nicht auszuschließen ist. Saumschläge können hier Risiko mindernd wirken. Demgegenüber kann die Zielstärkennutzung auf Standorten mit erhöhtem Risiko durch Wasserdefizit für den verbleibenden Bestand zu einer Entlastung führen (KÖHLER et al., 2010). Durch die Möglichkeit, spezifisch auf Risikoprofile reagieren zu können, kann ein effizienter Einsatz von Ressourcen eher gewährleistet werden, als dies über Präsenz/Absenz-Modellierungen (HANEWINKEL et al., 2010; KÖLLING et al., 2010) möglich ist.

Für die Fichte, als bedeutsamste Art in der Modellregion Harz können die wesentlichen Risiken wie Wasserdefizit, Borkenkäferbefall und Windwurf (SCHELHAAS et al., 2003; HANEWINKEL et al., 2008) quantifiziert werden, hieraus ergibt sich, dass sie auch am stärksten von waldbaulichen Anpassungsmaßnahmen betroffen ist. Für die Buche, als weitere wichtige Baumart der Modellregion fungiert das Risiko durch Wasserdefizit als Proxy für differenziertere biotische Risikomodelle. Für Baumarten, die in der Szenariosimulation an Bedeutung gewinnen, wie Douglasie, Weißtanne, Eiche und Lärche kann bislang nur das Windwurfisiko quantifiziert werden. Auf der Grundlage einer Literaturliteraturauswertung wurde daher unterstellt, dass diese Baumarten hinsichtlich des Risikos durch Wasserdefizit und Borkenkäferbefall weniger anfällig sind als Buche bzw. Fichte (ROLOFF und GRUNDMANN, 2008; LÜPKE, 2009; SPELLMANN, 2011) und sich das Gesamtrisiko der Modellregion durch die Etablierung dieser Baumarten verringert hat. Eine quantitative Bilanzierung der Effekte waldbaulicher Anpassungsmaßnahmen auf das Gesamtrisiko der Modellregion ist auf dieser Basis noch nicht möglich. Zukünftig sollten daher für alle Hauptbaumarten Modelle entwickelt werden, die deren wesentliche Risiken charakterisieren. Darüber hinaus sollten die Wirkungsmodelle im Sinne eines Risikomanagement Konzepts (HOLTHAUSEN et al., 2004) optimiert werden, sodass zusätzlich zur Eintrittswahrscheinlichkeit auch das Schadausmaß quantifiziert werden kann. Hierdurch können Ressourcen noch effizienter eingesetzt und Risiken zusätzlich auch monetarisiert und damit vergleichbar gemacht werden.

### 4.2 Szenariosimulationen

Mit Hilfe der Szenariosimulationen ist es möglich, den Einfluss unterschiedlicher waldbaulicher Anpassungsstrategien an den Klimawandel auf die Baumartenverteilung, die Vorratsstruktur und die langfristigen Nutzungsmöglichkeiten zu prognostizieren. Die hier beispielhaft simulierten Nutzungsszenarien beschränken sich auf eine Modellregion und berücksichtigen in besonderer Weise prognostizierte Risiken. Für einen Forstbetrieb sind darüber hinaus gesamtstrategische Überlegungen zu beachten. Hierbei müssen neben den Möglichkeiten der Realisierung zusätzlich Aspekte der Nachhaltigkeit und die Kontinuität der Finanzströme mit einbezogen werden.

Die gegenwärtig in den Wäldern des Harzes stockenden hohen Vorräte und ein durchschnittliches Alter von

etwa 80 Jahren kennzeichnen den Ausgangszustand der Szenariosimulationen. Diese Rahmenbedingungen führen zunächst zu stark steigenden Nutzungen, in deren Folge auf großer Fläche ein Waldumbau realisiert wird. Hieraus resultiert die erhebliche Veränderung in den Baumartenanteilen innerhalb des Simulationszeitraumes (Abb. 3). Es kann angenommen werden, dass sich diese Diversifizierung positiv auf die Stabilisierung der Waldfunktionen auswirkt (WAGNER, 2004; LÜPKE, 2009). Bei Betrachtung der realisierten Waldbaumaßnahmen wird weiterhin deutlich, dass selbst unter den idealisierten Bedingungen der Szenariosimulationen Veränderungen in den Baumartenanteilen von Fichte und Buche (Abb. 3) bei Weitem nicht so deutlich ausfallen, wie in der langfristigen Planung vorgesehen (Tab. 6). Dies ist vermutlich auf den lange prägenden Einfluss der Ausgangsbestockung und auf den begrenzten Betrachtungszeitraum zurück zu führen.

Die Fichte gilt im Hinblick auf Veränderungen in Folge des Klimawandels als besonders gefährdet (HANEWINKEL et al., 2008; KÖLLING et al., 2009). Innerhalb des naturnahen Szenarios vollzieht sich der Waldumbau dieser Baumart am langsamsten. Dies resultiert primär aus der Vernachlässigung der modellbasierten Risikoeinschätzungen und den damit verbundenen undifferenziert hohen Zieldurchmessern und einer ausschließlich einzelstammweisen Nutzung. Dies hat den Aufbau von risikoreichen Starkholzvorräten zur Folge (Abb. 3, 8). Die gestreckte Abnutzung der Starkholzvorräte innerhalb des naturnahen Szenarios (Abb. 7) ist aus waldbaulicher Sicht differenziert zu beurteilen, da sich hierdurch zum einen stärker strukturierte und damit stabile Bestände entwickeln lassen (SPELTMANN, 1999) zum anderen wird es aber schwieriger lichtbedürftige Pionierbaumarten zu etablieren, welche die Resilienz von Beständen erhöhen können (LÜPKE, 2009). Weiterhin ergeben sich aus dem naturnahen Szenario gegenüber den beiden alternativen Szenarien geringere maximale Hiebssätze und ein über lange Zeiträume weitgehend gleichbleibendes Nutzungsniveau (Abb. 4, 5). Dies ist aus Sicht eines Forstbetriebes mit Blick auf Arbeitsauslastung, Investitionsplanung und Absatzmöglichkeiten positiv zu beurteilen, da die Betriebsabläufe weitestgehend konstant bleiben. In Folge relativ hoher Fichtenanteile auf Risikostandorten (Tab. 8) ist jedoch auch mit einem größeren Anteil unplanmäßiger Nutzungen zu rechnen, der die vermeintlich konstanten Betriebsabläufe konterkarieren könnte. Insgesamt betrachtet bleibt das naturnahe Szenario hinter den Möglichkeiten einer klimasensitiven Waldbaustrategie zurück.

Die beiden alternativen Szenarien zeigen gegenüber dem naturnahen Szenario mögliche waldbauliche Handlungsoptionen auf. Sie führen bei einer weiteren Reduzierung des Risikos (Tab. 8) zu einem höheren periodischen Gesamtzuwachs (Tab. 7) und einem hohem Entwicklungspotenzial (Abb. 8). In wie weit diese simulierten Anpassungsmaßnahmen in der Praxis zu verwirklichen sind, wurde nicht untersucht. Es ist jedoch offensichtlich, dass deren Umsetzung erhebliche Anstrengungen im gesamten Betriebsablauf erfordern würde, zumal neben Hiebsvorbereitung, Ernte und Ver-

marktung, auch neue Kulturen in erheblichem Umfang zu begründen wären, deren Etablierung bei der aktuellen Schalenwildichte kaum gewährleistet werden kann. Daher ist anzunehmen, dass die in den Szenariosimulationen umgesetzten Waldbaustrategien in der Praxis kaum in vollem Umfang realisiert werden können. In Folge dessen sollten waldbauliche Anpassungsmaßnahmen auf hoch risikobehaftete Bereiche konzentriert werden. Hierfür ist es notwendig Schwellenwerte zu analysieren, ab denen ein waldbauliches Eingreifen für den Forstbetrieb zwingend notwendig wird. Weiterhin wird deutlich, dass auf Grund der Trägheit des Ökosystems Wald und des hohen Arbeitspotenzials mit der Integration waldbaulicher Anpassungsstrategien in die aktuelle Waldbauplanung jetzt begonnen werden sollte.

Es wurde eine Methodik vorgestellt, wie spezifische Risiken in Folge veränderter Klimabedingungen in waldbauliche Anpassungsstrategien umgesetzt werden können und wie sich diese auf die Struktur der Wälder auswirken. Der vorgestellte Ansatz kann dazu genutzt werden, Defizite in aktuellen Waldbaurichtlinien aufzuzeigen und zukünftige strategische Waldbauplanungen zu optimieren. Damit kann ein Beitrag geleistet werden, die Erfüllung der Waldfunktionen auch in Zukunft zu sichern.

## 5. ZUSAMMENFASSUNG

Natürliche Anpassungsprozesse von Waldökosystemen können die Auswirkungen des projizierten Klimawandels nicht hinreichend kompensieren, sodass die Waldfunktionen mittelfristig durch adaptierte waldbauliche Maßnahmen aktiv gesichert werden müssen.

Anhand einer 50-jährigen Simulation des bestehenden Waldbauprogramms der Niedersächsischen Landesforsten und zwei kontrastierenden Nutzungsszenarien werden die Auswirkungen unterschiedlicher Anpassungsmaßnahmen auf die Struktur des Waldes projiziert, sowie ihre Effizienz im Hinblick auf eine Risikominde- rung analysiert.

Für die Modellregion niedersächsischer Harz werden Risiken durch Wasserdefizit, Borkenkäferbefall und Windwurf unter Verwendung statistischer Modelle auf Bestandesebene quantifiziert. Durch die differenzierte Schätzung einzelner Risikokomponenten können standortsabhängige Risikoprofile unterschieden werden. Anschließend wird eine Methodik vorgestellt, wie Risikoprofile in konkrete waldbauliche Anpassungsmaßnahmen umgesetzt werden können.

Alle drei Nutzungsszenarien führen gegenüber heute zu stabileren Bestandesstrukturen. Die beiden alternativen Nutzungsszenarien haben im Vergleich zum bestehenden Waldbauprogramm eine weitere Reduzierung des Risikos und einen höheren periodischen Gesamtzuwachs zur Folge. Unter den idealisierten Bedingungen der Szenariosimulation ist es möglich, die strukturarmen Fichtenwälder der Modellregion innerhalb von 50 Jahren zu diversifizieren und dadurch zu stabilisieren. Maßnahmen zur Verringerung des Risikos, wie beispielsweise die Reduzierung der Zielstärke führen in den ersten 20 Jahren der Simulation zu sehr hohen Nutzungssätzen und erheblichen Eingriffen in die

Vorratsstruktur. Demgegenüber würde ohne adaptierte Maßnahmen der Aufbau risikoanfälliger Stark- und Altholzvorräte an Fichte stehen. Durch die Szenariosimulationen wird offensichtlich, dass eine großräumige Umwandlung der Fichtenbestände innerhalb von 50 Jahren auf Grund des hohen Arbeitsvolumens nur mit sehr hohem Aufwand zu realisieren ist. Um Risiken, die sich aus dem Klimawandel ergeben, zu verringern, sollten daher waldbauliche Anpassungsmaßnahmen auf hoch risikobehaftete Bereiche konzentriert werden.

Der vorgestellte Ansatz dient als konzeptionelle Grundlage zur Überprüfung bisheriger Waldbaustrategien und erweitert zukünftige strategische Waldbauplanungen um quantitative Komponenten im Bereich der Risikoerfassung.

## 6. SUMMARY

Title of the paper: *Model-based simulation of silvicultural strategies in adapting forests to climate change in the Harz Mountains in Lower Saxony, Germany.*

Natural adaptation processes in forest ecosystems cannot sufficiently offset the impact of projected climate change. Thus, active silvicultural measures are imperative in order to maintain forest functions.

Based on a 50-year simulation of silviculture policies as practised by the Lower Saxon State Forest, along with two contrasting scenarios, the consequences of diverse corrective measures on forest structure are projected and their ability to minimize risks are analyzed.

Using the Harz Mountains in Lower Saxony as a model area, statistical models are applied to quantify potential risks at stand level such as water shortage, bark beetle infestation and windthrow. By estimating individual risk components, site-specific risk profiles are obtained. A method is introduced demonstrating how risk profiles can be transferred into concrete silvicultural adaptive measures.

Compared to the current situation, all three simulation scenarios result in more stable silvicultural structures. Compared to the currently practised silvicultural regime the two alternative scenarios reduce the risks even further (Tab. 8) and yield a higher periodical total growth (Tab. 7). These idealized scenario simulation conditions encourage diversification in Norway spruce forests with low species diversity in the model area within 50 years (Fig. 3, 8) and lead, thus, to more stability. Measures designed to reduce risks, for example a reduction in girth limit, lead to very high planned cuts and considerable impacts on standing crop structure in the first 20 years of the simulation (Fig. 4, 5, 7). If no adaptation measures are taken, consequently the amount of risk-susceptible old Norway spruce stands will increase (Fig. 8, Tab. 8).

The simulation scenario demonstrates that achieving extensive restructuring of Norway spruce stands within 50 years is possible only with great effort. In order to minimize risks resulting from climate change, adaptive measures should therefore concentrate on high-risk areas.

The approach presented in this paper can be used as a conceptual framework to review current silvicultural practices as well as to complement future strategic silvicultural planning by quantitative risk components.

## 7. RÉSUMÉ

Titre de l'article: *Simulation, basée sur un modèle, des stratégies sylvicoles d'adaptation au changement climatique dans l'exemple du Harz de Basse-Saxe.*

Les processus naturels d'adaptation des écosystèmes forestiers ne peuvent pas compenser suffisamment les effets du changement climatique préfiguré, si bien que les fonctions forestières doivent être activement sécurisées à moyen terme par des mesures sylvicoles adaptées.

Basées sur une simulation de 50 ans de l'actuel programme sylvicole des forêts d'Etat de Basse-Saxe et sur deux scénarii d'exploitation, les effets sur la structure de la forêt, de différentes mesures d'adaptation, sont préfigurés de même que leur efficacité à minimiser les risques sont analysés.

Pour la région du modèle, celle de la montagne du Harz en Basse-Saxe, les risques de déficits hydriques, de mortalité par scolytes et par chablis, sont quantifiés. Par l'estimation différenciée de chaque composant de risque, les profils de risques peuvent être mis en évidence en relation avec la mosaïque stationnelle. Enfin une méthodologie est présentée, de manière à ce que les profils de risques puissent être traduits en mesures sylvicoles d'adaptation concrètes.

Tous les trois scénarii d'exploitation conduisent jusqu'ici à des structures de peuplements plus stables. Les deux scénarii alternatifs d'exploitation ont conduit, en comparaison avec le programme sylvicole existant, à une réduction plus accentuée du risque et à un accroissement total périodique plus élevé. Dans les conditions idéales de la simulation de scénario, il est possible de diversifier les pessières structurellement pauvres de la région du modèle, en l'espace de 50 ans, et par suite de les stabiliser. Des mesures prises pour la diminution du risque, comme par exemple la réduction du diamètre d'exploitabilité, conduisent dans les vingt premières années de la simulation à des volumes exploités très élevés et à d'importantes interventions dans la structure du peuplement sur pied. Sinon, sans mesures adaptées, il y aurait la formation d'un peuplement d'épicéa de volumes en gros et vieux bois vulnérables en cas de risque. Par les simulations de scénarii il devient évident qu'une conversion radicale des peuplements d'épicéa s'impose dans le délai de 50 ans mais uniquement avec une très grande dépense en raison du volume de travail important. Pour diminuer les risques qui découlent du changement climatique, des mesures sylvicoles d'adaptation doivent être concentrées sur des domaines à hauts risques.

L'approche présentée ici sert de base conceptuelle au contrôle des stratégies sylvicoles prises jusqu'ici et élargit la planification sylvicole stratégique future à des composantes quantitatives dans le domaine de l'appréhension des risques.

## 6. DANKSAGUNG

Wir bedanken uns beim Niedersächsischen Ministerium für Wissenschaft und Kultur für die Finanzierung im Rahmen des Verbundprojektes Klimafolgenforschung in Niedersachsen (KLIFF) sowie den Niedersächsischen Landesforsten und dem Niedersächsischen Forstplanungsamt für die Bereitstellung der Daten. Ausdrücklich möchten wir uns auch bei den beiden anonymen Gutachtern für ihre wertvollen Anmerkungen bedanken.

## 9. LITERATUR

- ABETZ, P. (1976): Reaktionen auf Standraumerweiterung und Folgerungen für die Auslesedurchforstung bei Fichte. *Allg. Forst- u. Jagd-Ztg.* **147**, 72–75.
- BENGTSSON, J., S. G. NILSSON, A. FRANCO und P. MENOZZI (2000): Biodiversity, disturbances, ecosystem function and management of European forests. *Forest Ecol. Manage.* **132**, 39–50.
- BEUG, H. J., I. HENRION und A. SCHMÜSER (1999): Landschaftsgeschichte im Hochharz. Die Entwicklung der Wälder und Moore seit dem Ende der letzten Eiszeit. Papierflieger, Clausthal-Zellerfeld.
- BOLTE, A. und P. L. IBISCH (2007): Neun Thesen zu Klimawandel, Waldbau und Naturschutz. *AFZ-Der Wald* **11**, 572–576.
- BOLTE, A., C. AMMER, M. LÖF, P. MADSEN, G. J. NABUURS, P. SCHALL, P. SPATHELF und J. ROCK (2009): Adaptive forest management in central Europe: Climate change impacts, strategies and integrative concept. *Scandinavian Journal of Forest Research* **24**, 473–482.
- BURSCHEL, P. (1981): Neue Erziehungskonzepte für Fichtenbestände. *AFZ-Der Wald* **51/52/53**, 1386–1395.
- GEBHARDT, T., C. SCHULZ, R. MATYSSEK und C. AMMER (2010): Die Fichte im Zeichen des Klimawandels – Beugen Durchforstungseingriffe Trockenschäden vor? *Forstarchiv* **81**, 86–87.
- GRIESS, V. C., R. ACEVEDO, F. HARTL, K. STAUPENDAHL und T. KNOKE (2012): Does mixing tree species enhance stand resistance against natural hazards? A case study for spruce. *Forest Ecol. Manage.* **267**, 284–296.
- HANEWINKEL, M., J. BREIDENBACH, T. NEEFF und E. KUBLIN (2008): Seventy-seven years of natural disturbances in a mountain forest area – the influence of storm, snow, and insect damage analysed with a long-term time series. *Can. J. For. Res.* **38**, 2249–2261.
- HANEWINKEL, M., S. HUMMEL und D. A. CULLMANN (2010): Modelling and economic evaluation of forest biome shifts under climate change in Southwest Germany. *Forest Ecol. Manage.* **259**, 710–719.
- HANSEN, J. H. (2011): Modellbasierte Entscheidungsunterstützung für den Forstbetrieb. Dissertation, Fakultät für Forstwissenschaften und Waldökologie der Georg-August-Universität Göttingen.
- HOLTHAUSEN, N., M. HANEWINKEL und J. HOLECY (2004): Risikomanagement in der Forstwirtschaft am Beispiel des Sturmrisikos. *Forstarchiv*, **75**, 149–157.
- IPCC, INTERNATIONAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (2000): IPCC special report emissions scenarios. <http://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/spm/sres-en.pdf>, 7. Aug. 2012.
- JACOB, D., L. BÄRRING, O. B. CHRISTENSEN, J. H. CHRISTENSEN, S. HAGEMANN, M. HIRSCHI, E. KJELLSTRÖM, G. LENDERINK, B. ROCKEL, C. SCHÄR, S. I. SENEVIRATNE, S. SOMOT, A. VAN ULDEN und B. VAN DEN HURK (2007): An inter-comparison of regional climate models for Europe: Model performance in present day climate. *Climatic Change* **81**, 31–52, doi: 10.1007/s10584-006-9213-4.
- JACOB, D., E. NILSON, L. TOMASSINI und K. BÜLOW (2009): REMO A1B SCENARIO RUN, BFG PROJECT, 0.088 DEGREE RESOLUTION. World Data Center for Climate. CERA-DB „REMO\_BFG\_A1B\_MM“. <http://cera-www.dkrz.de/WDCC/ui/Project.jsp?proj=REMO-BFG>, 21. Feb. 2012.
- JANSEN, M., C. DÖRING, B. AHRENDTS, A. BOLTE, T. CZAIKOWSKI, O. PANFEROV, M. ALBERT, H. SPELLMANN, J. NAGEL, H. LEMME, M. HABERMANN, K. STAUPENDAHL, B. MÖHRING, M. BÖCHER, S. STORCH, M. KROTT, R. NUSKE, J. C. THIELE, J. NIESCHULZE, J. SABOROWSKI und F. BEESE (2008): Anpassungsstrategien für eine nachhaltige Waldbewirtschaftung unter sich wandelnden Klimabedingungen – Entwicklung eines Entscheidungsunterstützungssystems „Wald und Klimawandel“ (DSS-WuK). *Forstarchiv* **79**, 131–142.
- JENSSEN, M. (2009): Der klimaplastische Wald – ökologische Grundlagen einer Anpassungsstrategie. *Forst und Holz* **10**, 1–21.
- KÖHL, M., R. HILDEBRANDT, K. OLSCHOFKY, R. KÖHLER, T. RÖTZER, T. METTE, H. PRETZSCH, M. KÖTHKE, M. DIETER, M. ABIY, F. MAKESCHIN und B. KENTER (2010): Combating the effects of climatic change on forests by mitigation strategies. *Carbon Balance and Management*, **5**: 8 doi:10.1186/1750-0680-5-8.
- KÖLLING, C., T. KNOKE, P. SCHALL und C. AMMER (2009): Überlegungen zum Risiko des Fichtenanbaus in Deutschland vor dem Hintergrund des Klimawandels. *Forstarchiv* **80**, 42–54.
- KÖLLING, C., B. BEINHOFER, A. HAHN und T. KNOKE (2010): Wie soll die Forstwirtschaft auf neue Risiken im Klimawandel reagieren? *AFZ-Der Wald* **5**, 18–22.
- KÖHLER, M., J. SOHN, G. NÄGELE und J. BAUHUS (2010): Can drought tolerance of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) be increased through thinning? *European Journal of Forest Research* **129**, 1109–1118.
- LECKEBUSCH, G. und U. ULBRICH (2004): On the relationship between cyclones and extreme windstorm events over Europe under climate change. *Global and Planetary Change* 181–193.
- LÜPKE, B. VON (2009): Überlegungen zu Baumartenwahl und Verjüngungsverfahren bei fortschreitender Klimaänderung in Deutschland. *Forstarchiv* **80**, 67–75.
- MBOGGA, M. und A. HAMANN (2008): What influences results of bioclimate envelope models? A sensitivity analysis for five sources of uncertainty. *Adaptation to Climate Change*, Umea, 26<sup>th</sup> August.
- MUDELSEE, M., D. CHIRILA, T. DEUTSCHLÄNDER, C. DÖRING, J. O. HAERTER, S. HAGEMANN, H. HOFFMANN, D. JACOB, P. KRAHE, G. LOHMANN, C. MOSELEY, E. NILSON, O. PANFEROV, T. RATH und B. TINZ (2010): Climate Model Bias Correction und die Deutsche Anpassungsstrategie. *Mitteilungen DMG* **3**, 2–7.
- MÜLLER, J. (2006): Effects of drought on the water balance of selected forest sites and the evaluation of drought risk. *In: J. EICHORN (Hrsg.). Schriften aus der Forstlichen Fakultät der Universität Göttingen und der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt* **142**, 142–148.
- NAGEL, J. (2009): Waldwachstumssimulation mit dem Softwarepaket TreeGrOSS – Neuerungen, Erweiterungsmöglichkeiten und Qualitätsmanagement. *In: RÖMISCH, K., NOTHDURFT, A., WUNN, U. (Hrsg.). Tagungsband der gemeinsamen Jahrestagung der Sektion Forstliche Biometrie und Informatik im DVFFA (20. Tagung) und der AG Ökologie u. Umwelt in der Intern. Biometr. Gesell., 22.–24.09.2008 in Freiburg. Die Grüne Reihe*, 174–178.

- NDS.MFDLRELV, NIEDERSÄCHSISCHES MINISTERIUM FÜR DEN LÄNDLICHEN RAUM, ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND VERBRAUCHERSCHUTZ (2004): Aus dem Walde Schriftenreihe Waldentwicklung in Niedersachsen. Langfristige, ökologische Waldentwicklung. Richtlinie zur Baumartenwahl **54**, Wolfenbüttel.
- NOSS, R. F. (2001): Beyond Kyoto: Forest management in a time of rapid climate change. *Conservation Biology* **15**, 578–590.
- OLCHEV, A., A. IBROM, J. PRIESS, S. ERASMIE, C. LEEMHUIS, A. TWELE, K. RADLER, H. KREILEIN, O. PANFEROV und G. GRAVENHORST (2008): Effects of land use changes on evapotranspiration of tropical rain forest margin area in Central Sulawesi (Indonesia): modeling study with a regional Svat model. *Ecological Modelling* **212**, 131–137.
- OTTO, H.-J. (1989): Aus dem Walde Schriftenreihe Waldentwicklung in Niedersachsen. Langfristige, ökologische Waldbauplanung für die Niedersächsischen Landesforsten 42, 1. Niedersächsisches Ministerium für den ländlichen Raum, Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (Hrsg.), Rinteln.
- OTTO, H.-J. (1991): Aus dem Walde Schriftenreihe Waldentwicklung in Niedersachsen. Langfristige, ökologische Waldbauplanung für die Niedersächsischen Landesforsten 43, 2. Niedersächsisches Ministerium für den ländlichen Raum, Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (Hrsg.), Wolfenbüttel.
- OTTO, H.-J. (1994): Waldökologie. Ulmer, Stuttgart.
- OVERBECK, M., M. SCHMITT, CH. FISCHER, J. EVERS, A. SCHULZE, T. HÖVELMANN und H. SPELLMANN (2011): Ein statistisches Modell zur Regionalisierung der nutzbaren Feldkapazität von Waldstandorten in Niedersachsen. *Forstarchiv* **82**, 92–100.
- OVERBECK, M. und M. SCHMIDT (2012): Modelling infestation risk of Norway spruce by *Ips typographus* (L.) in the Lower Saxon Harz Mountains (Germany). *Forest Ecol. Manage.* **266**, 115–125.
- PIANI, C., G. P. WEEDON, M. BEST, S. M. GOMES, P. VITERBO, S. HAGEMANN und J. O. HAERTER (2010): Statistical bias correction of global simulated daily precipitation and temperature for the application of hydrological models. *Journal of Hydrology* **395**, 199–215.
- PINTO, J. G., U. ULBRICH, G. C. LECKEBUSCH, T. SPANGEHL, M. REYERS und S. ZACHARIAS (2007): Changes in storm track and cyclone activity in three SRES ensemble experiments with the ECHAM5/MPI-OM1 GCM. *Climate Dynamics*, 195–210.
- ROECKNER, E., G. BAEUML, L. BONAVENTURA, R. BROKOPF, M. ESCH, M. GIORGETTA, S. HAGEMANN, I. KIRCHNER, L. KORNBLUEH, E. MANZINI, A. RHODIN, U. SCHLESE, U. SCHULZWEIDA und A. TOMKINS (2003): The Atmospheric General Circulation Model ECHAM5. Part 1. Model Description. MPI-Berichte, 349. Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg.
- ROECKNER E., R. BROKOPF, M. ESCH, M. GIORGETTA, S. HAGEMANN, L. KORNBLUEH, E. MANZINI, U. SCHLESE und U. SCHULZWEIDA (2004): The Atmospheric General Circulation Model ECHAM5. Part 2. Sensitivity of Simulated Climate to Horizontal and Vertical Resolution. MPI-Berichte, 354. Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg.
- ROLOFF, A. und B. GRUNDMANN (2008): Baumartenwahl im Klimawandel. Bewertung von Waldbaumarten anhand der KlimaArtenMatrix. *AFZ-Der Wald* **20**, 1086–1088.
- ROUAULT, G., J.-N. CANDAU, F. LIEUTIER, L.-M. NAGELEISEN, J.-C. MARTIN und N. WARZEE (2006): Effects of drought and heat on forest insect populations in relation to the 2003 drought in Western Europe. *Ann. For. Sci.* **63**, 613–624.
- SCHELHAAS, M.J., G. J. NABUURS und A. SCHUCK (2003): Natural disturbances in the European forests in the 19<sup>th</sup> and 20<sup>th</sup> centuries. *Global Change Biology* **9**, 1620–1633.
- SCHMIDT, M., M. HANEWINKEL, G. KÄNDLER, E. KUBLIN und U. KOHNLE (2010a): 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**, 1636–1652.
- SCHMIDT, M. (2010 b): Ein standortsensitives, longitudinales Höhen-Durchmesser-Modell als eine Lösung für das Standort-Leistungs-Problem in Deutschland. *In: NAGEL, J. (Hrsg.). Tagungsbericht der Sektion Ertragskunde im Deutschen Verband forstlicher Forschungsanstalten, 17.-19. 05. 2010 in Körbecke am Möhnesee*, 131–152.
- SCOTT, R. E. und S. J. MITCHELL (2005): Empirical modeling of wind throw risk in partially harvested stands using tree neighbourhood and stand attributes. *Forest Ecol. Manage.* **218**, 193–209.
- SEPPÄLÄ, R. (2009): A global assessment on adaptation of forests to climate change. *Scandinavian Journal of Forest Research* **24**, 469–472.
- SPELLMANN, H. und J. NAGEL (1996): Zur Durchforstung von Fichte und Buche. *Allg. Forst- u. Jagd-Ztg.* **167**, 6–15.
- SPELLMANN, H. (1999): Überführung als betriebliche Aufgabe. *Forst und Holz* **4**, 110–116.
- SPELLMANN H., J. SUTMÖLLER und H. MEESENBURG (2007): Risikovorsorge im Zeichen des Klimawandels. *AFZ-Der Wald* **23**, 1246–1249.
- SPELLMANN, H., M. ALBERT, M. SCHMIDT, J. SUTMÖLLER und M. OVERBECK (2011): Waldbauliche Anpassungsstrategien für veränderte Klimaverhältnisse. *AFZ-Der Wald* **11**, 19–23.
- STAUPENDAHL, K. und B. MÖHRING (2011): Integrating natural risks into silvicultural decision models: A survival function approach. *Forest Policy and Economics* **13**, 496–502.
- VANOMSEN, P. (2006): Der Einfluss der Durchforstung auf die Verankerung der Fichte hinsichtlich ihrer Sturmresistenz. Dissertation ETH Zürich, 16532.
- WAGNER, S. (2004): Klimawandel – einige Überlegungen zu waldbaulichen Strategien. *Forst und Holz* **8**, 394–398.
- WAGNER, S. (2008): Klimawandel – Überlegungen zu waldbaulichen Strategien. *AFZ-Der Wald* **20**, 1104–1107.
- WERMELINGER, B. (2004): Ecology and mangement of the spruce bark beetle *Ips typographus*: a review of recent research. *Forest Ecol. Manage.* **202**, 67–82.
- WERNER, P. C., F.-W. GERSTENGARBE, K. FRAEDRICH und H. OESTERLE (2000): Recent climate change in the North Atlantic/European sector. *Internat. J. Climatol.* **20**, 463–471.
- WOLLBORN, P. und T. BÖCKMANN (1998): Ein praktikables Modell zur Strukturierung des Vorrats aus Ertragstafelschätzung. *Forst und Holz* **18**, 547–550.