

# Die Wälder des norddeutschen Tieflandes unter dem Einfluss aktueller und zukünftiger Risikofaktoren – Beispiele für eine Gefährdungsanalyse

RALF KÄTZEL, STEFAN FLECK, MATTHIAS ALBERT

Die langfristigen Risiken des globalen Wandels, einschließlich der weltweiten Klimaerwärmung, sind heute kaum pauschal einzuschätzen. Zu zahlreich sind die Einflussfaktoren, die sie auslösenden Wirkungen und noch unbestimmter die Vielzahl der Wechselwirkungen – und dies auf ganz verschiedenen Wirkungsebenen. Dennoch ist der Wunsch nach Prognosen oder zumindest Szenarien, die einen Blick in die Zukunft wagen, u. a. um richtungsweisende Entscheidungen zu erleichtern, nur allzu verständlich. Eine Teillösung des Dilemmas liegt in der Beschränkung des betrachteten Raumes, des anvisierten Zeithorizontes, der berücksichtigten Risikofaktoren und der betroffenen Schutzgüter.

Im Rahmen des BMBF-Verbundprojekts *„Nachhaltiges Landmanagement im norddeutschen Tiefland“ (NaLaMa-nT, 2010-2015)* wurde der Versuch unternommen, die potenzielle Schadenswirkung einer begrenzten Anzahl von abiotischen und biotischen Einflussfaktoren für einen Zeitraum bis zum Jahr 2070 nach derzeitigem Wissensstand für vier ausgewählte Modellregionen in Norddeutschland quantitativ abzuschätzen und damit vergleichbar zu machen. Die vier Modellregionen sind die Landkreise Diepholz und Uelzen, der Fläming als länderübergreifende Region zwischen Sachsen-Anhalt und Brandenburg sowie der Landkreis Oder-Spree (LOS), die entlang eines ca. 500 km langen West-Ost-Gradienten quer durch das norddeutsche Tiefland liegen. Die Regionen unterscheiden sich hinsichtlich ihrer historischen Entwicklung, ihrer naturalen und wirtschaftlichen Ressourcen, der Betroffenheit durch den Klimawandel, ihrer bisherigen wirtschaftlichen Schwerpunkte der Landnutzung sowie einer Reihe sozio-ökonomischer Faktoren.

Diese unterschiedlichen Rahmenbedingungen führen zu einer differenzierten, regionalen Betroffenheit. Dies gilt insbesondere für die drei untersuchten Wirtschaftsbereiche Wasser-, Forst- und Landwirtschaft, die in offenen Systemen stattfinden und deren Produktivität maßgeblich von Klima- und Standortfaktoren sowie einem darauf ausgerichteten Management abhängig ist.

Bereits das auf Hans Carl von CARLOWITZ aus dem Jahre 1713 zurückgeführte Prinzip der Nachhaltigkeit hat seinen Ursprung in der Sorge um den Verlust der materiellen Lebensgrundlagen der Bevölkerung in einer vom Bergbau geprägten Region. Mit der Übernutzung der Wälder und dem drohenden Holzangel bestand das reale Risiko den Bergbau in Sachsen aufgeben zu müssen. Dies wäre mit gravierenden Folgewirkungen für die Entwicklung in der Region und ihrer Bewohner verbunden gewesen. Mit einer planmäßigen, auf Regeln beruhenden Waldbewirtschaftung konnte diesen Risiken dauerhaft erfolgreich begegnet werden.

Die durch den globalen Wandel ausgelösten Risiken sind jedoch weitaus schwieriger zu beurteilen als lokale, monokausale Schadensereignisse. Um künftige Handlungsoptionen vergleichend werten zu können, wurden vor dem Hintergrund des Klimaszenariums „RCP 8.5“ (IPCC 2013) drei alternative handlungsleitende Entwicklungspfade (Referenz-, Biodiversität-, Klimaschutzszenarien, s. NW-FVA, 2016 a und b) definiert. Aus dem Blickwinkel der Risikoanalyse war daher zu untersuchen, wie sich die Risiken für die einzelnen Schutzgüter in Abhängigkeit von den drei unterschiedlichen Entwicklungspfaden in den vier Modellregionen ändern würden. Die folgenden Ausführungen fokussieren auf die Risikoanalyse der beiden östlichen Modellregionen Fläming und Landkreis Oder-Spree (LOS) unter Berücksichtigung des forstlichen Referenzszenariums („naturnaher Waldbau“ in Anlehnung an das niedersächsische Regierungsprogramm „LÖWE“, NDS 1991; vgl. auch das Brandenburger Waldprogramm, MLUR 2004).

## Klimaentwicklung und Risikofaktoren in den Modellregionen

Die Modellregionen Fläming und LOS gehören bereits heute zu den trockensten Regionen Deutschlands. Die derzeitige durchschnittliche Jahresniederschlagsmenge (1991-2010) von 572 mm (Fläming) und 585 mm (LOS) würde bei Annahme des durchaus realistischen RCP 8.5 – Szenarios, projiziert mit dem Globalmodell ECHAM6 (STEVENS et al. 2013) und für Deutschland mit dem regionalen Klimamodell STARS (ORLOWSKY et al. 2008) regionalisiert, um weitere 10 % zurückgehen (528 mm). Die Sommermonate (Juni-August) wären von dem Niederschlagsrückgang besonders betroffen. Dagegen nehmen im Winter die Niederschläge weiter zu. Das für das Pflanzenwachstum notwendige Bodenwasser wird aber auch durch den Verdunstungsanspruch der Atmosphäre bestimmt, der bei höheren Temperaturen ansteigt. Durch die infolgedessen ansteigende Evaporation und Transpiration nimmt die klimatische Wasserbilanz zusätzlich ab.

Von 1951 bis 2010 nahmen die Jahresmitteltemperaturen um 1,1 °C zu. Bis zum Jahr 2070 wird eine weitere Zunahme bis zu 2,3 °C erwartet (Abb. 1). Die Anzahl der „Heißen Tage“ wird im Fläming von 13 auf 24 Tage (LOS: 11 auf 21 Tage) zum Ende des 21. Jahrhunderts (Anstieg um 88 %) zunehmen. Die größte Temperaturänderung ist allerdings in den Wintermonaten mit durchschnittlich 2,6 °C (Vgl. Sommer: 1,9 °C) zu erwarten. Trotz des Rückganges der winterlichen Frosttage um 43 % bleibt dennoch die Spätfrostgefahr erhalten (NW-FVA, 2016 a und b). Überraschenderweise hat trotz steigender Temperaturen in den zurückliegenden Jahrzehnten die Sturmhäufigkeit im Osten Deutschlands nicht zugenommen (KALLWEIT 2016).

Aus dem Blickwinkel der Risikoabschätzung sind daher unter den klimatischen Einflussfaktoren Wassermangel und Hitzewellen in der Vegetationsperiode, Spätfröste sowie warme Wintertage als die wichtigsten abiotischen Stressfaktoren zu berücksichtigen. Die Klimafaktoren wirken nicht nur auf Pflanzen, sondern beeinflussen auch die Populationsdynamik von Pflanzenfressern und Phytopathogenen mit indirekten Folgewirkungen auf den Baumbestand.

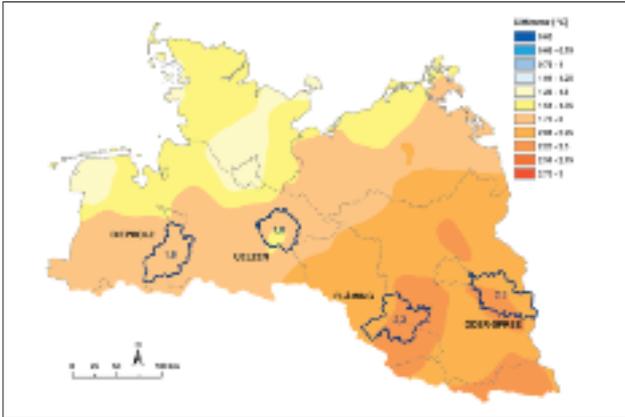


Abb. 1: Änderung der mittleren Jahresmitteltemperatur von 1991 bis 2010 bis zu einer Periode von 2051-2070 (Grundlage IPCC-Szenario „RCP 8.5“) für die vier norddeutschen Modellregionen (Quelle: NW-FVA 2016 a)

**Wie kann man Risiken besser einschätzen?**

Eine objektive Bedrohung durch ein künftiges Schadereignis bezeichnet man in der Regel als *Gefahr* (SCHERZBERG 1993). Wenn Gefahren erkannt und bewertet worden sind, spricht LUHMANN (1993) von *Risiken*.

**Methodische Grundlagen**

Die Risikoanalyse umfasst als Voraussetzung für ein Risikomanagementkonzept folgende Teilziele und Arbeitsschritte:

1. Erfassung und Rangreihung der Risikofaktoren für ein bestimmtes Gebiet
2. Identifizierung betroffener Schutzgüter und ihrer bedrohten (z. B. monetären) Werte und Funktionen
3. Schadensbewertung auf der Grundlage z. B. von Grenzwerten, Verlustkalkulationen (Schadensausmaß=A)
4. Abschätzung der Eintrittswahrscheinlichkeit (W) von Schadwirkungen
5. Berechnung (A x W) und Bewertung der Risiken (aktuell und künftig) auf der Grundlage von Risikowerten (RW) und Risikobereichen (s. Tab. 1)
6. Zuordnung zu Risikotypen (Grundlage z. B. WBGU 1999)
7. Analyse und Bewertung von Wechselwirkungen mit anderen Risikofaktoren

Mathematisch kann die Höhe des Risikos als Funktion der Eintrittswahrscheinlichkeit (W) und des Schadensausmaßes (A) eines Ereignisses beschrieben werden. Sowohl Eintrittswahrscheinlichkeit als auch Schadensausmaß lassen sich in einem Bereich zwischen 0 und 1 abschätzen. Die multiplikative Verknüpfung von Schadensausmaß und Eintrittswahrscheinlichkeit ergibt einen „*Risikowert*“ für ein bestimmtes Ereignis, das ein gewähltes „*Schutzgut*“ schädigen könnte. Je größer das Wirkungsmaß und je höher die Eintrittswahrscheinlichkeit ist, desto bedeutsamer ist der resultierende Risikowert mit einem theoretischen Maximalwert von 1 (Abb. 2b). In Abhängigkeit von der Auflösung in der Beschreibung von A und W ist der stufenrepräsentative Maximalwert dieser Größen geringer als 1, z. B. 0,95 im Falle von 10%-Stufen, so dass dann ein Risiko-Maximalwert von  $0,95 \times 0,95 = 0,9025$  resultiert. Die Verwendung stufenrepräsentativer Mittelwerte berücksichtigt die Ungenauigkeit bei der Einschätzung von A und W.

Der *Wissenschaftliche Beirat der Bundesregierung zu Globalen Umweltveränderungen* (WBGU 1999) empfiehlt die Gruppierung der Risikowerte in drei *Risikobereiche* (Normbereich, Grenzbereich, Hochrisiko- bzw. Verbotsbereich). In Anlehnung an diese Empfehlung unterscheiden sich die drei Bereiche hinsichtlich der in Tabelle 1 angegebenen Risikowerte und Kriterien (Abb. 2a).

Tab. 1: Risikowerte und Kriterien zur Unterscheidung der Risikobereiche (in Anlehnung an WBGU 1999, S. 6-9)

	Normbereich	Grenzbereich	Hochrisikobereich
Risikowert	$AxW < 0,1$	$AxW = 0,1$ bis $0,3$	$AxW > 0,3$
Risiko	gering	mittel	hoch
Ungewissheit	gering	hoch	gering
Schaden (A)	gering	mittel bis hoch	sehr hoch
Wahrscheinlichkeit (W)	gering bis mittel	mittel bis hoch	sehr hoch
Reversibilität	ja	meist ja	nein
Persistenz	gering	hoch	hoch
Ubiquität	gering	hoch	hoch

Je nach Lage der Risiken innerhalb des Diagramms (Abb. 2b) differenziert der WBGU sechs verschiedene *Risikotypen*, deren Bezeichnungen der griechischen Mythologie entliehen wurden (Damokles, Pythia, Zyklop, Pandora, Cassandra, Medusa) (WBGU 1999). So würden z. B. Ereignisse, die zwar mit sehr geringer Wahrscheinlichkeit eintreten werden, aber in diesem Fall enorme Schäden verursachen würden, dem „*Damokles-Typ*“ zugeordnet werden. Dagegen würden Ereignisse mit nur mittlerer Eintrittswahrscheinlichkeit und geringerem Schadensausmaß aber hoher Unsicherheit dem „*Pythia*“-Risikotyp entsprechen, für das die blinde Seherin des Orakels von Delphi namensgebend war. Dramatischer ist der Risikotyp „*Kassandra*“, der Ereignisse mit großem Schadenspotenzial und hoher Eintrittswahrscheinlichkeit repräsentiert. Da deren Schäden aber erst in ferner Zukunft auftreten werden, entfalten die Risiken kaum Betroffenheit in der Gegenwart, so dass Gegenmaßnahmen häufig zu spät einsetzen. Der globale Klimawandel scheint diesem Typ zu entsprechen, da Warnungen, wie im Falle der trojanischen

Seherin Cassandra kein Gehör bei den wichtigsten Akteuren finden (WBGU 1999). Entsprechend der Zuordnung des jeweiligen Risikotyps werden spezifische Handlungsstrategien und Instrumente des Risikomanagements entwickelt.

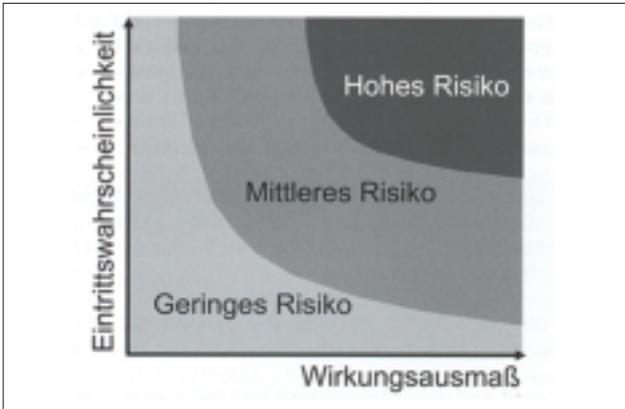


Abb. 2a: Abgrenzung von Risikobereichen als Funktion von Eintrittswahrscheinlichkeit und Wirkungsausmaß eines Schadens (Quelle: WBGU 1999)

W	1	0,05	0,14	0,24	0,33	0,43	0,52	0,62	0,71	0,81	0,90	
	0,9	0,04	0,13	0,23	0,32	0,42	0,51	0,61	0,70	0,80	0,89	
	0,8	0,04	0,12	0,22	0,31	0,41	0,50	0,60	0,69	0,79	0,88	
	0,7	0,03	0,10	0,19	0,28	0,38	0,47	0,56	0,65	0,75	0,84	
	0,6	0,03	0,09	0,17	0,26	0,35	0,44	0,53	0,62	0,71	0,80	
	0,5	0,02	0,07	0,14	0,22	0,30	0,38	0,46	0,54	0,62	0,70	
	0,4	0,02	0,05	0,09	0,14	0,19	0,23	0,27	0,31	0,35	0,39	
	0,3	0,01	0,04	0,06	0,09	0,11	0,14	0,16	0,18	0,21	0,24	
	0,2	0,01	0,02	0,04	0,05	0,07	0,08	0,10	0,11	0,13	0,14	
	0,1	0,01	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	
	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	
		Schadensausmaß A										

Abb. 2b: Ermittlung von Risikowerten (RW) in einer Matrix, die Eintrittswahrscheinlichkeit (W) und Schadensausmaß (A) auf einer normierten Skala von 0 bis 1 verknüpft (Anm.: Die Berechnung von RW erfolgte durch Multiplikation der jeweiligen Stufenmittelwerte, z. B.: 0,25 x 0,45 ≈ 0,11).

**Identifizierung von Schutzgütern**

Unter Schäden versteht man zunächst die Zerstörung oder Beschädigung, d. h. die (möglichst messbare) Veränderung einer konkreten Sache. Die Bewertung von Risiken muss sich daher immer auf definierte, betroffene Schutzgüter beziehen, die zuvor identifiziert wurden. Die allgemeine Risikoabschätzung des „Brandenburger Waldes“ (als allgemeines Schutzgut) z. B. gegenüber Trockenheit ist daher wenig sinnvoll. Vielmehr geht es um die konkrete Beschreibung des avisierten Schutzgutes, z. B. 80jähriger Kiefernreinbestand unter bekannten Standortbedingungen am Forstort „X, Y“ mit der möglicherweise gefährdeten Waldfunktion „Z“.

Die Wahl des zu bewertenden Schutzgutes schlägt sich direkt auf den Risikowert nieder. So ist z. B. die Absterbewahrscheinlichkeit eines Einzelbaumes als Schutzgut durch einen Risikofaktor in einem bestimmten Zeitfenster wesentlich größer (bei Tod=1) als für eine genetisch vielfältige (anpassungsfähigere) Baumpopulation, die bei einer Dauerwaldbewirtschaftung zumindest mittelfristig „unsterblich“ sein könnte.

Da der Mensch als „Bewerter“ von Schäden auftritt, sind die Begriffe subjektiv und anthropozentrisch angelegt. So kann der Wert des Schutzgutes von selbigem Kiefernbestand zwischen unterschiedlichen Betrachtern durchaus differieren, was sich auch in später zu wählenden Maßnahmen des Risikomanagement niederschlagen kann.

Ebenso unterschiedlich sind die Risikowerte bezüglich des betrachteten Schadensausmaßes, das von Wachstums-, Wert- und Erlösminderungen bis zum Totalverlust (Tod) des Schutzgutes reichen kann. So sind z. B. die Risikowerte für Wachstumsminierungen bereits bei moderater Trockenheit in der Vegetationsperiode hoch, für den Totalverlust dagegen gering.

Die Risikoanalyse verlangt daher im Vorfeld eine konkrete Bestimmung des zu untersuchenden Schadensausmaßes für ein definiertes Schutzgut in einem definierten Zeitraum. Entsprechend der Zielstellung des Projektes bezogen sich alle Risikoanalysen (für einzelne Risikofaktoren) auf die Wahrscheinlichkeit des Totalverlustes (Schadensausmaß) eines bestimmten Baumbestandes, resp. des Bestandesvorrates (Schutzgut) innerhalb eines Zeitraumes von 10 Jahren (z. B. 2030 bis 2040) bei einem bestimmten Zukunftsszenario.

**Risikofaktoren**

In der Realität sind Wälder zeitgleich vielfältigen Einflussfaktoren ausgesetzt, die auch wechselseitig wirken und die derzeit weder in der Gänze ihres Auftretens noch in ihren Wirkungen erfassbar sind. Zudem wird die Anpassungskapazität eines lebenden Schutzgutes u. a. durch Vorschäden, Konditionierungen (Lerneffekte nach Stressereignissen) und das Alter mitbestimmt. Um Risikoanalysen dennoch für Waldbestände erproben zu können, wurden für einzelne abiotische (Windwurf, Waldbrand, Trockenheit, N-Eutrophierung) und biotische (div. Kiefern-schadinsekten, Nonne, Kiefern-wurzelschwamm, Borkenkäfer, Prachtkäfer) Risikofaktoren die Risikowerte und ihre (Un)sicherheitsspannen berechnet. Nachfolgend sollen die Ergebnisse für Windwurf, Waldbrand, Trockenheit und Nonnengradationen exemplarisch für die beiden östlichen Modellregionen dargestellt werden.

## Ergebnisse

### Windwurf

Der Risikofaktor „Sturm“ wurde bezüglich des Schadensausmaßes und der Eintrittswahrscheinlichkeit in jeder Modellregion für die Dekaden bis 2010 (2000-2010), 2040 (2030-2040) und 2070 (2060-2070) unter dem waldbaulichen Entwicklungspfad „Referenz“ eingeschätzt. ALBERT et al. (2016) beschreiben dazu detailliert die Waldentwicklung, speziell die Veränderung der Baumartenverteilung und der Altersstruktur.

Das Schadensausmaß wurde mit Hilfe des binären additiven Regressionsmodells mit explizit räumlicher Komponente von SCHMIDT et al. (2010) geschätzt. Dieses Sturmmodell schätzt die Wahrscheinlichkeit eines Windwurfes für einen Einzelbaum auf Basis der Variablen Baumart, Höhe, BHD, eines gegenüber dem Original von SCOTT UND MITCHELL (2005) modifizierten Topex-to-distance-Index, drei Kategorien der Bodenvernässung und der räumlichen Lage als Stellvertretervariable zur Repräsentation des Windfeldes (Windgeschwindigkeit). Das Modell ist parametrisiert für die Baumartengruppen Buche-Eiche, andere Laubholzarten, Fichte, Kiefer-Lärche, Weißtanne-Douglasie. Die Schätzung der Windwurfwahrscheinlichkeiten erfolgte in dieser Untersuchung auf der Grundlage der aktuellen Modellbestände und ihrer zeitlichen Entwicklung. Die spezifische Geländeexposition und -exponiertheit wird für jeden Modellbestand im Zentrum des zugrundeliegenden Stichprobenpunktes bestimmt. Es wird ein Wintersturm mit Orkanstärke aus südwestlicher Richtung unterstellt, der alle Bestände einer Region gleichermaßen trifft. Ferner wird das erste und dritte Quartil der Wahrscheinlichkeitswerte als Spreitung des Schadensausmaßes angenommen.

Die *Eintrittswahrscheinlichkeit* eines Sturmereignisses wird auf Grundlage der beobachteten Ereignisse im Zeitraum 1961 bis 2014 eingeschätzt (Datenquelle DWD). Ein Ereignis ist definiert als das Auftreten von mittleren Windgeschwindigkeiten  $\geq 10$  nach BEAUFORT in den letzten 10 Minuten einer Stunde (=Messperiode). Die Beobachtungen an den DWD-Wetterstationen wurden mit einem Schätzmodell auf die Stichprobenpunkte in den Modellregionen übertragen. Für jede Region wird das erste und dritte Quartil der Häufigkeitswerte als Spreitung für die Anzahl von Ereignissen in einer 10-Jahresperiode angenommen. Es wird unterstellt, dass sich die Sturmhäufigkeiten im Projektionszeitraum nicht ändern (vgl. auch KALLWEIT 2016). Insgesamt nimmt die geschätzte Eintrittswahrscheinlichkeit eines Sturmereignisses von Orkanstärke deutlich von West nach Ost ab. In Diepholz würde im Mittel ein Sturm alle 20 Jahre auftreten, in Uelzen beträgt die Zeitspanne für ein Orkanereignis bereits ca. 40 Jahre und in den beiden östlichen Regionen Fläming und Oder-Spree liegt die Eintrittswahrscheinlichkeit bei unter 10 %. Die Höhe des Schadensausmaßes in einer Region ist stark von der Baumartenzusammensetzung und dem Altersaufbau abhängig. Bei der Interpretation des projizierten Windwurftrisikos ist deshalb auch zu beachten, dass der skizzierte zeitliche Verlauf im Schadensausmaß voraussetzt, dass die Wälder in vorhergehenden Perioden keinen Schaden erlitten haben. Des Weiteren wird bei der Aggregation des Kalamitätsholzes auf die Regionsebene angenommen, dass der Sturm alle Bestände der entsprechenden Region gleichermaßen treffen würde.

Die beiden kieferndominierten Modellregionen Fläming und LOS haben bei Eintritt eines Sturmereignisses fast ausschließlich Verluste in den Kiefernbeständen zu befürchten. Allerdings würde es bei den hier seltenen Baumarten Fichte, Lärche und Douglasie häufig zu Totalverlusten kommen. Das potenzielle aktuelle Schadensausmaß beträgt im Fläming gegenwärtig bis zu 50 %, wobei 94 % des Kalamitätsholzes auf Grund ihrer großen Dominanz in der Baumartenverteilung von der Kiefer kommen würden. Noch etwas geringer fällt das Schadensausmaß laut Sturmschadensmodell für die Region LOS aus und liegt gegenwärtig zwischen 30 und 50 %. Hierbei ist vor allem die Kiefer mit 97 % des Kalamitätsholzes gefährdet. Weiterhin sind die gesamten Lärchen- und Fichtenvorräte bedroht, die jedoch nur jeweils 1 % zum Sturmholz beitragen würden.

Die Unsicherheit bei der Schätzung des Schadensausmaßes für die Zeitscheibe bis 2040 weist im Fläming eine Spreitung von 10 bis 60 % auf. Der Anteil des Kiefernvorraates am Kalamitätsholz steigt gegenüber heute auf 97 % an. Dies entspricht 76 % des gesamten Kiefernvorraates. Für die Region LOS wird der maximale Verlust auf 50 % des stehenden Vorrates geschätzt. Der Anteil der Kiefer ist mit 96 % am Kalamitätsholz nahezu unverändert und neben den Lärchen- und Fichtenbeständen steuert die Douglasie ebenfalls 1 % zum potenziellen Sturmholz bei.

Für die Dekade bis 2070 wird ein Rückgang des Schadensausmaßes auf maximal 40 % des stehenden Vorrates projiziert. Entsprechend der Waldentwicklungsdynamik unter dem Referenzszenario reduziert sich der Kiefernanteil am Kalamitätsholz auf 89 %, während der komplette Douglasienvorrat sturmwurfgefährdet ist und 8 % beitragen würde. Im LOS sinkt das Schadensausmaß in der Dekade bis 2070 auf maximal 40 %, wobei sich der Anteil der Lärche und Douglasie auf jeweils 2 % erhöht und der Kiefernanteil bei 95 % liegt.

Die Risikowerte (RW) sind für beide ostdeutschen Regionen sehr gering und liegen je nach Dekade zwischen 0,012 und 0,020. Grund hierfür ist trotz des potenziell relativ hohen Schadens die geringe Eintrittswahrscheinlichkeit von Stürmen in einer Dekade. Weiterhin muss beachtet werden, dass bei einem Sturmereignis wahrscheinlich nicht die ganze betrachtete Region gleichermaßen betroffen wäre, d. h. der „wahre“ Wert des Schadensausmaßes würde sicherlich in einer Region noch niedriger ausfallen.

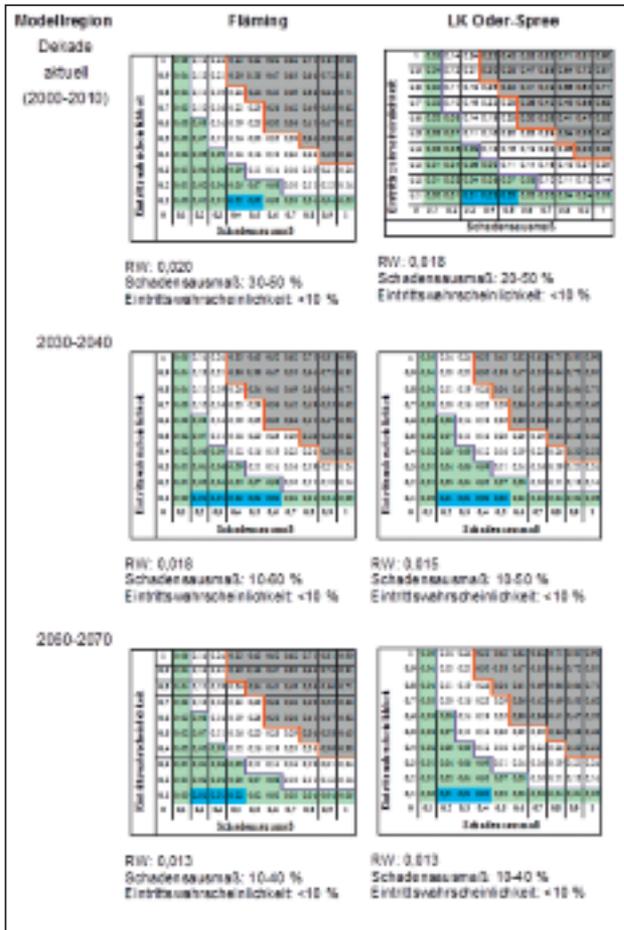


Abb. 3 (a-f): Risikodiagramme für Windwurf in den Regionen Fläming und Landkreis Oder-Spree für die drei Dekaden bis 2010, 2040 und 2070 (RW=Risikowert, Bezugsebene: Bestand, Schutzgut: Bestandesvorrat)

**Waldbrand**

Für die vollständige Vernichtung eines Waldbestandes durch Feuer besteht derzeit das höchste Risiko mit weitreichenden Folgewirkungen für das gesamte Ökosystem (Biodiversität, Wasserspeicherfähigkeit, Nährstoffvorrat u.v.a.). Es wären nicht nur das materielle Schutzgut „Waldbestand“ sondern auch seine Waldfunktionen gefährdet.

Zur Abschätzung des Waldbrandrisikos wurden der international weit verbreitete *Forest Fire Weather Index* (FWI, VAN WAGNER 1987) und der M68-Waldbrandindex (KÄSE 1969) berechnet. Der FWI ermittelt das Brandrisiko tageweise aus den Klimabedingungen um 13.00 Uhr und der Materialfeuchte von Streu, Humus und oberster Bodenschicht unter Verwendung unterschiedlicher Gleichgewichtsfeuchten für Austrocknung und Befeuchtung des Materials. Die Anwendbarkeit des FWI auf die Verhältnisse im norddeutschen Tiefland wurde zuvor anhand von Monitoringdaten überprüft. Für den M68-Waldbrandindex wurde erhöhtes Waldbrandrisiko bei Überschreitung eines berechneten Waldbrandkennzifferwerts von 4000 unterstellt (KÄSE 1969). Für den Zeitraum von 1991 bis 2010 wurden beide Waldbrandindices für das gesamte Projektgebiet berechnet, um die regionale Verteilung des Waldbrandrisikos zu quantifizieren.

Hinsichtlich der absoluten Zahl von Risikotagen ergeben sich mit dem M68-Index weniger extreme Werte als beim FWI, so dass in den Hauptrisikogebieten etwas niedrigere und in den ungefährdeten Bereichen etwas höhere Werte resultieren. Demzufolge wird die regionale Verteilung der Waldbrandgefährdung durch den FWI stärker kontrastierend dargestellt. Mit 20-25 Risikotagen/Jahr sind die beiden westlichen Modellregionen nur gering bis mittelmäßig waldbrandgefährdet. Dagegen befindet sich der Landkreis Oder-Spree in einem Gebiet sehr hohen Waldbrandrisikos (40-45 Risikotage nach FWI bzw. 35-40 Tage/Jahr nach M68-Index). Die Modellregion mit der größten Waldbrandgefährdung ist der Fläming und zwar insbesondere die östliche Hälfte der Region, die nach Berechnungen mit dem FWI zu den am stärksten gefährdeten Gebieten im Norddeutschen Tiefland zählt (45-50 Risikotage pro Jahr) und auch bei Verwendung des M68 teilweise Werte aus der höchsten Gefährdungskategorie (40-45 Tage) aufweist.

Für die Ermittlung der Risikowerte für Waldbrände ist darauf hinzuweisen, dass es sich bei den Berechnungen der Waldbrandindices nur um das klimatische Waldbrandrisiko handelt. Das Zusammenwirken mit menschlichen Aktivitäten als dem eigentlichem Auslöser von Bränden in den klimatisch prädisponierten Wäldern kann hier nur mittelbar zur Geltung kommen, ebenso kann der fehlende Zusammenhang zwischen der Anzahl der Brände und der Größe der Brandfläche und die Tatsache, dass nur ein Drittel der Waldbrände Vollbrände sind, nicht allein durch die Index-Berechnungen abgebildet werden. Die überwiegend geringe Waldbrandfläche ist auch deshalb so gering, weil die Waldbrandüberwachung und Brandbekämpfung so gut funktionieren. Aus diesen Gründen wurde aufbauend auf den Berechnungen des Waldbrandindex FWI auch das tatsächliche Auftreten von Waldbränden einbezogen. Die für einen 10-Jahreszeitraum in Sachsen-Anhalt empirisch ermittelte Beziehung zwischen dem Waldbrandindex FWI und den tatsächlich aufgetretenen Waldbränden (als Flächenanteil an der Gesamtwaldfläche einer Region) wurde zu dem Zweck auf die Modellregionen im Norddeutschen Tiefland übertragen.

Das Waldbrandrisiko ist in den beiden östlichen Modellregionen schon heute relativ hoch. Gemäß den Ergebnissen der Modellrechnungen sind heute im Fläming 0,027 % der Waldfläche (ca. 25 ha) (LOS: 20 ha = 0,02 %) jährlich durch Waldbrände stark gefährdet. Nach einer leichten Abnahme das Waldbrandrisiko in der näheren Zukunft (bis 2030) wird das Risiko bis zum Ende des Beobachtungszeitraums (2070) deutlich ansteigen. Bei Fortführung der bisher üblichen Wirtschaftsweise (Referenz) errechnet sich zu diesem Zeitpunkt ein durchschnittlicher Verlust von rund 69 ha im Fläming (LOS: 60 ha/Jahr). Somit würde sich das klimabedingten Waldbrandrisiko bis 2070 mindestens verdoppeln. Bezogen auf die gesamte Modellregion bleiben die Eintrittswahrscheinlichkeiten aber insgesamt auf einem niedrigen Niveau. Da das Schadensausmaß bereits heute bei 100 % bei einem Vollbrand und bei ca. 40 % bei einem Bodenbrand liegt, ändern sich die Risikowerte zwischen den Regionen und Dekaden kaum (Abb. 4 a-f, Risikobereiche blau markiert).

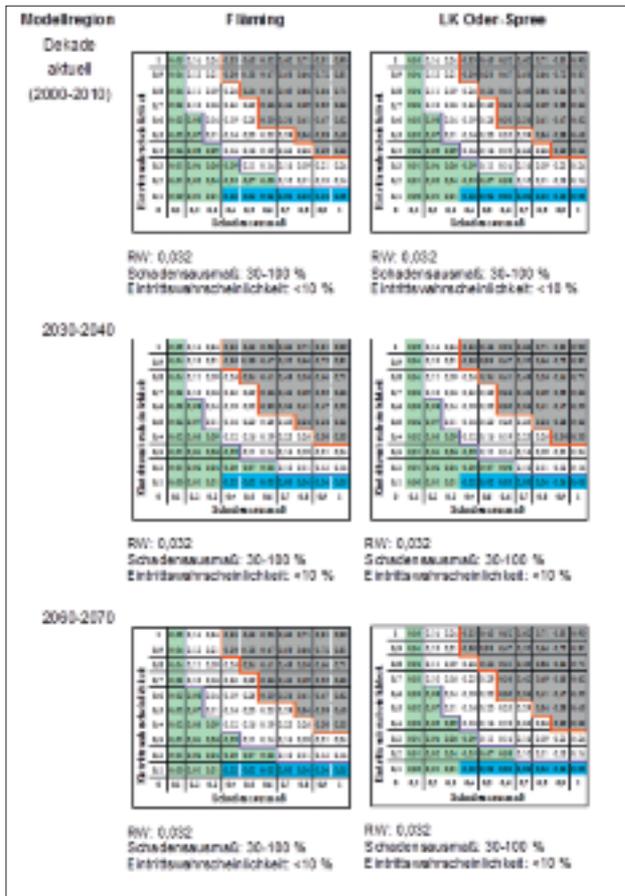


Abb. 4 (a-f): Risikodiagramme für Entzündungsempfindlichkeit von Oberboden und Streu in Abhängigkeit von der Dauer von Hitzeperioden und Trockenheitsperioden in den Regionen Fläming und Landkreis Oder-Spree für die drei Dekaden bis 2010, 2040 und 2070 (RW=Risikowert, Bezugsebene: Bestand, Schutzgut: Waldbestand in allen seinen Funktionen (Holzproduktion und a. Ökosystemdienstleistungen))

**Wassermangel während der Vegetationsperiode in Eichen- und Buchenbeständen**

Bei Pflanzen entsteht Trockenstress durch verringertes Wasserangebot, durch höheren Wasserverbrauch oder durch eine Kombination von beidem. Ob dieser Belastungszustand eintritt, ist jedoch von einer Vielzahl von Begleitfaktoren (z. B. Alter, Akklimatisation, Vorschädigungen, Verhältnis Gesamt-Blattoberfläche zur Aufnahmekapazität der Wurzel, Oberflächen-Volumen-Verhältnis u. v. a.) und nicht zuletzt vom Genotyp abhängig. So unterscheiden sich Individuen, Populationen und Ökotypen unterhalb der Artebene teilweise erheblich. Trockenstressexperimente zeigen, dass die Resilienz von Buche und Eiche gegenüber Wassermangel in der Vegetationsperiode weitaus geringer ist als die der untersuchten Nadelbaumarten (Kiefer, Douglasie) (CHOAT et al. 2012, KÄTZEL et al. 2015). Gleichzeitig werden die Laubbaumarten seit mehr als zwei Jahrzehnten durch die Waldumbauprogramme der Länder gefördert, so dass ihr Anteil weiter zunehmen wird. Es lohnt daher die Wirkung des Risikofaktors „Wassermangel“ auf die beiden Laubbaumarten näher zu betrachten.

Durch die große Variabilität zwischen den beiden Arten resp. Artengruppen Rot-Buche und Trauben-/bzw. Stiel-Eiche,

innerhalb der Arten und der durch sie besiedelten Lebensräume in den Modellregionen ist ein breites Spektrum der Reaktionsmöglichkeiten gegeben. Dies ist der Grund dafür, dass auch durch Stresstests keine genauen Grenzen der Anpassung auf Artebene bestimmt werden können, wie dies bei standardisierten technischen Geräten im Zuge von Qualitätskontrollen, Crashtests usw. üblich ist (KÄTZEL et al. 2015).

Die nachfolgenden Abschätzungen können daher nur generalisierte Aussagen mit Bezug auf die häufigsten Standorte und regionalen Gegebenheiten berücksichtigen. Grundlage für die Abschätzung der Risikowerte für die aktuelle Dekade waren neben den klimatischen Entwicklungen die Kronenzustände von fünf Untersuchungsjahren (2010-2014), die Kreisflächenzuwächse der Jahrringanalysen, insbesondere die Resistenz-, Resilienz- und Recoveryindices der genauer analysierten Trockenstressjahre 1947, 1976 und 2003, stressrelevante Biomarker der Blattanalysen der Untersuchungsjahre 2010-2014 sowie bekannte sekundäre Stressfaktoren (z. B. Stickstoffbelastung) (LLORET et al. 2011, KÄTZEL et al. 2016).

Das Schadensausmaß wurde nach dem prozentualen Anteil der von den Vitalitätsminderungen (Kronenverlichtung, Zuwachsverluste, erhöhte Prädisposition) betroffenen Bestandteile abgeschätzt. Trockenstressexperimente zeigen, dass 10-20 % der Bäume einer Population eine (ggf. genetisch determinierte) überdurchschnittlich hohe Anpassungsfähigkeit besitzen. Das maximale Schadensausmaß wurde daher auf 0,8 begrenzt. (Annahme: Schadensausmaß 1,0 würde allen Individuen eines Bestandes nach einem Trockenstressereignis innerhalb von einen Zeitraum von 10 Jahren entsprechen.) Da die Trockenstresstoleranz von Nadelbäumen deutlich höher ist, und das aktuelle Schadensausmaß auf eine Untergrenze des Schadensausmaßes von 0,2 geschätzt wurde, ordnen sich die räumlichen und zeitlichen Varianten in diesen Grenzen ein.

Die Eintrittswahrscheinlichkeit wurde ebenfalls jeweils auf einen Zeitraum von zehn Jahren auf der Grundlage der Klimaszenarien und der Sensitivität resp. Anpassungskapazität der Baumarten geschätzt. Sekundäre Einflussfaktoren, z. B. Bestandesalter, Stickstoffbelastungen, können sowohl die Eintrittswahrscheinlichkeit als auch das Schadensausmaß erhöhen.

Für die walddreiche Region Fläming besteht ein deutlich erhöhtes Trockenstressrisiko. Daher wurde die Eintrittswahrscheinlichkeit für Trockenstressereignisse höher eingeschätzt, als in den beiden westlichen Modellregionen, mit stetig steigender Tendenz für die nächsten Jahrzehnte. Im Fläming erreichen die beiden Laubbaumarten einen Anteil von nahezu 19 %.

Der mittlere Kronenverlichtungsgrad der Rot-Buche (14 %) und der Trauben-Eiche (30 %) war hier am geringsten von allen Modellregionen. Der radiale Kreisflächenzuwachs der Rot-Buche unterliegt seit dem Trockenstressweiserjahr 1974 erheblichen Schwankungen (hohe Sensitivität, ggf. in Kombination mit Durchforstungsmaßnahmen). Allerdings waren gleichfalls die Resilienz- und Recovery-Indices nach den Trockenstressereignissen der Jahre 1974 und 2003 von allen Regionen am höchsten. D. h. die Rot-Buche zeigte hier eine hohe Anpassungsfähigkeit.

Dagegen sind die Resilienz- und Resistenz-Indices der Trauben-Eiche für beide Weiserjahre am geringsten, verglichen mit den Eichenbeständen der anderen Regionen. Dennoch wächst die Eiche hier stetig auf niedrigem Niveau zu und hat in den letzten Jahren höhere Zuwachsraten als in anderen Regionen erreicht. Eine Ursache hierfür könnte in der Zunahme der Stickstoffeinträge liegen. Die Arginin- und Stickstoffgehalte der Blätter sind deutlich erhöht. Stressindikatoren wie die Ascorbatgehalte der Blätter waren in den Untersuchungsjahren nur leicht erhöht und lagen unterhalb der beiden westlichen Modellregionen.

Die unterschiedlichen Anpassungsmuster beider Baumarten führen zu einer größeren Prognoseunsicherheit, was sich in einer größeren Spreitung der Risikowerte widerspiegelt.

Für die östlichste und waldreichste Modellregion LOS ist die Eintrittswahrscheinlichkeit von Trockenstressereignissen am größten. Die Region wird durch die Kiefer dominiert. Die Laubwaldanteile sind hier am geringsten und konzentrieren sich auf besser wasser- und nährstoffversorgte Standorte, wie z. B. im Schlaubetal. Selbst in witterungsbedingt günstigen Jahren, zeigen beide Laubbaumarten auf physiologischer Ebene bereits Anpassungsreaktionen an Wassermangelbedingungen. Trotz der hohen Anpassungsfähigkeit werden beide Gehölzarten langfristig nur auf wasserbegünstigten Standorten mit hoher Vitalität und Wuchsleistung überleben können.

Dies bestätigen auch Szenariorechnungen und multivariat-statistische Regionalisierungsmodelle von RIEK UND RUSS (2014) am Beispiel der Buche für drei Dekaden (2005, 2055, 2095). Während die Buchenareale zwischen den Dekaden 2005 und 2055 regional noch ansteigen könnten, würden sie dann aber bis zur Dekade 2095 insgesamt sehr deutlich abnehmen. Trockenheitsbedingt ist von der Abnahme insbesondere der Südosten Brandenburgs betroffen.

Bereits jetzt waren die durchschnittlichen Kronenverlichtungsgrade der Untersuchungsbestände mit 35 % (Trauben-Eiche) und 26 % (Rot-Buche) überdurchschnittlich hoch. Die Buchenbestände erreichen auf den besseren Standorten und in niederschlagsreichen Jahren erhebliche Zuwächse mit ebenso großen Schwankungen. Die Trauben-Eiche wächst auch hier stetig auf niedrigem Niveau zu. Dies spiegelt sich auch in mittleren Werten für die Resilienz- und Resistenz-Indizes wider. Eine Stickstoffbelastung besteht für beide Baumarten nicht. Stressindikatoren wie die Ascorbatgehalte der Blätter waren in den Untersuchungsjahren nur leicht erhöht und lagen auf ähnlichem Niveau wie im Fläming. Beide Baumarten hatten in allen Untersuchungsjahren die höchsten Osmolalitätswerte, was sowohl den angespannten Wasserhaushalt selbst in Jahren mit überdurchschnittlichen Sommerniederschlägen als auch die hohe Anpassungsfähigkeit belegt. Die Unsicherheit der Risikoprognose wird noch verstärkt, da es sich hier eher um trockenheitstolerante Populationen handelt, die unter Wassermangelbedingungen weniger sensitiv reagieren als bisher gut wasserversorgte Bestände. Die Amplitude der Faktoränderung könnte sich hier stärker auswirken als das tatsächliche Wasserangebot.

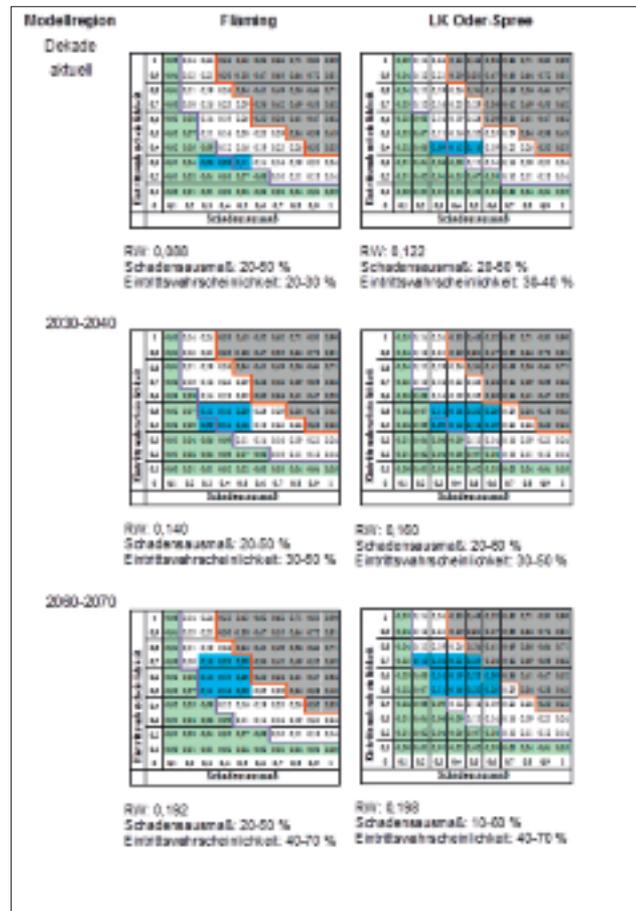


Abb. 5 (a-f): Risikodiagramme für Trockenstress von mittelalten Laubholzreinbeständen in den Regionen Fläming und Landkreis Oder-Spree für die drei Dekaden 2005, 2040 und 2076 (RW=Risikowert, Bezugsebene Bestand, Schutzgut: Vitalität, Zuwachs)

### Kalamitäten durch den Fraß der Nonne

Kiefernwälder des Norddeutschen Tieflandes, häufig in strukturarmen Reinbeständen bewirtschaftet, gelten regionalspezifisch als anfällig für phyllophage Insekten mit wiederkehrenden Massengradationen. Diese Gradationen können über den Nadelverlust zu Zuwachsverlusten mit ökonomischen Folgewirkungen und bei ungünstigen klimatischen Bedingungen nach starkem oder wiederholtem Fraß zu erhöhter Mortalität und Bestandesverlust führen. Das Risiko für die Entstehung einer Massenvermehrung, sowie die Einordnung der Einflussstärke – über den Faktor „Populationsdichte“ – wurden aus den Ergebnissen der retrospektiven Analyse und der aktuell zu beobachtenden Entwicklungen und Erfahrungen für die Kiefern großschädlinge berechnet (GRÄBER et al. 2012, RAY et al. 2016).

gegenüber dem Norden verzeichnet. Dieser Trend könnte mit zunehmenden Temperaturen anhalten. Die modellierte Eintrittswahrscheinlichkeit für eine Massengradation steigt in der Dekade bis 2040 im Fläming an. Eine Abnahme der Populationen bei heiß-trockenen Bedingungen, wie es für die dritte Zeitscheibe bis 2060 prognostiziert wird, kann aufgrund der artspezifischen Ansprüche regional erwartet werden. Der unter dem Referenzszenario angestrebte Waldumbau mit zunehmend gemischten Beständen und einem ansteigendem Laubholzanteil (vgl. ALBERT et al. 2016) könnte langfristig ebenfalls zu einer Abschwächung des Kamalitätsrisikos führen.

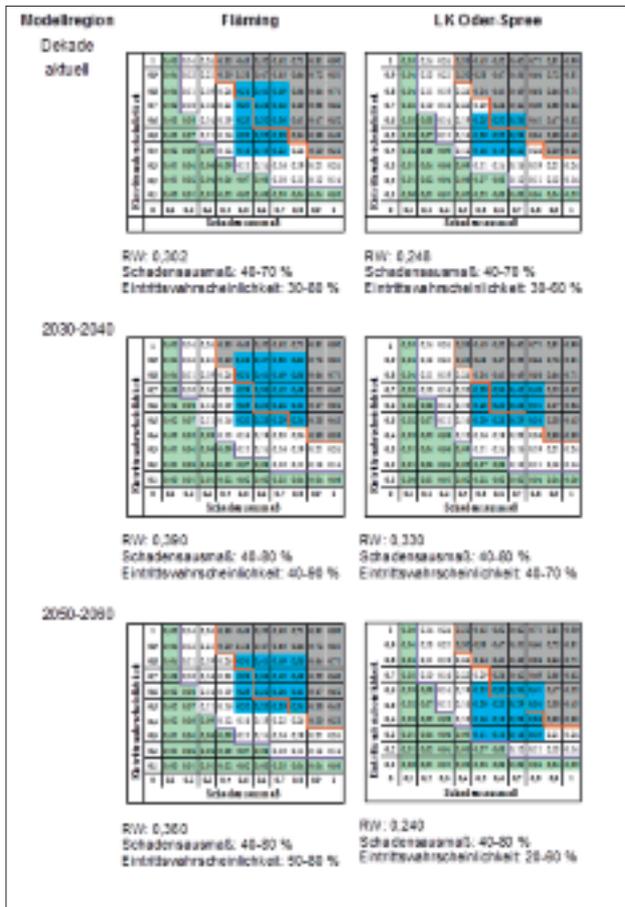


Abb. 6 (a-f): Risikodiagramme für fraßbedingte Schäden ausgelöst durch die Nonne (*Lymantria monacha*) in den Regionen Fläming und Landkreis Oder-Spree für die drei Dekaden bis 2010, 2040 und 2070 (RW=Risikowert, Bezugsebene Bestand)

### Zusammenfassung

Im Rahmen des BMBF-Forschungsverbundes "Nachhaltiges Landmanagement im norddeutschen Tiefland" (NaLaMa-nT) wurden in den Jahren 2010 bis 2015 u. a. die Grundlagen für eine Risikoabschätzung von norddeutschen Wäldern erarbeitet. Das Projekt befasste sich zunächst mit den theoretischen Verfahren der Risikoanalyse als Voraussetzung für konkrete Anwendungen z. B. in Modellen über Zukunftsszenarien für ein hiervon abgeleitetes Risikomanagement. Ein vom Wissenschaftlichen Beirat für Globale Umweltveränderungen (WBGU 1999) vorgeschlagener Ansatz zur Ermittlung von Risikowerten auf der Grundlage zuvor abgeschätzten Eintrittswahrscheinlichkeiten

und Schadenswirkungen für konkrete monokausale Risikofaktor-Schutzgut-Beziehungen wurde beispielhaft für ausgewählte abiotische und biotische Risikofaktoren in vier Modellregionen (LK Diepholz, Uelzen, Oder-Spree und Fläming) erprobt. Dabei werden Risikowerte (RW) durch die Multiplikation von abgeschätzten Eintrittswahrscheinlichkeiten von Risikofaktoren und deren Schadensausmaß in einer Dekade für einen definierten Modellbestand in einem Variablenbereich zwischen 0 und 1 errechnet. Risikowerte >0,3 lassen ein hohes Risiko erwarten.

Die in einem ca. 500 km langen West-Ost-Gradienten angeordneten Modellregionen unterscheiden sich sowohl in ihrer Exposition bzgl. möglicher Witterungsextreme als auch in ihrer Verwundbarkeit durch unterschiedliche Wald- und Baumartenanteile sowie Waldstrukturen. So sinkt z. B. das Sturmrisiko von West nach Ost, während das Trockenstress- und Waldbrandrisiko in gleicher Richtung ansteigt. Die dynamische Veränderung von Risiken wurde dekadeweise bis zum Jahr 2070 vor dem Hintergrund dreier waldbaulicher Entwicklungsszenarien (Referenz-, Biodiversitäts- und Klimaschutzszenario) unter Annahme des Emissionsszenarios RCP 8.5 geschätzt. Die vorliegenden Ausführungen beschränken sich auf die Risikoentwicklung in den beiden östlichen Modellregionen Fläming und den Landkreis Oder-Spree (LOS) für das Referenzszenario. Hierbei wird unterstellt, dass die naturnahe Waldbewirtschaftung in ihren aktuellen Schwerpunktsetzungen beibehalten wird. Vorge stellt wird die Entwicklung der Risikowerte für die Gefährdung der Wälder durch Sturm, Waldbrand, Wassermangel und Massengradationen der Nonne (*Lymantria monacha*).

Mit Risikowerten zwischen 0,012 (LOS in der Dekade 2060-2070) und 0,02 (Fläming in der Dekade 2000-2010) ist die Sturmgefährdung der Bestände generell sehr gering. Dagegen bewirkt u. a. der hohe Kiefernanteil in Verbindung mit Hitzeextremen und Trockenheit eine zunehmend hohe Waldbrandgefährdung im Sommer. Die Modellregion mit der größten Waldbrandgefährdung ist der Fläming und zwar insbesondere die östliche Hälfte der Region, die nach Berechnungen mit dem *Forest Fire Weather Index* (FWI) zu den am stärksten gefährdeten Gebieten im Norddeutschen Tiefland zählt (45-50 Risikotage pro Jahr).

Der hohe Kiefernanteil bewirkt andererseits eine hohe Trockenstresstoleranz, die mit zunehmendem Laubholzanteil sinken wird. Für die betrachteten Laubholzbestände (Trauben-Stiel-Eiche, Rot-Buche) steigt das Trockenstressrisiko in LOS von aktuell RW=0,12 auf 0,198 am Ende des Betrachtungszeitraumes bis 2070. Deutlich höher sind jedoch die Risiken für die Nonnengradationen, die im Fläming am höchsten sind (RW aktuell =0,30) und in der Mitte des 21. Jahrhunderts auf 0,39 ansteigen werden.

Die auf Bestandesebene ermittelten Risikowerte entsprechen für die nächsten fünf Jahrzehnte überwiegend den Norm- und Grenzbereichen (RW<0,3). Die meisten monokausal betrachteten Schadenswirkungen erwiesen sich für die betrachtete Zeitspanne als langfristig reversibel im Sinne des Schutzgutes (Einzelbestand).

So erscheinen die für den Forstbereich anstehenden und von globalem Wandel ausgelösten Probleme in dem betrachteten Zeithorizont bis 2070 grundsätzlich lösbar. Al-

lerdings darf nicht übersehen werden, dass es sich in der Realität um komplexe Ursache-Wirkungs-Beziehungen mit vielen Unbekannten handelt. Die gleichzeitige oder eng aufeinanderfolgende Wirkung multipler Risikofaktoren ist noch weitgehend unverstanden. Ebenso sind die modellierten Zeiträume für ein strategisches, forstliches Handeln im Rahmen eines nachhaltigen Risikomanagements noch zu kurz. Die Weiterentwicklung von Risikomodelle auf der Grundlage eines soliden Waldmonitorings und repräsentativer Forschungsergebnisse bleibt eine Herausforderung.

## Literatur

ALBERT, M., LEEFKEN, G., NUSKE, R., AHRENDTS, B., SUTMÖLLER, J., SPELLMANN, H., 2016: Auswirkungen von klimatischer Unsicherheit auf die Forstplanung am Beispiel von vier Regionen im norddeutschen Tiefland. Allgemeine Forst und Jagdzeitung 12/2016; 187(9/10).

CHOAT, B.; JANSEN, S.; BRODRIBB, T.J.; COCHARD, H.; DELZON, S.; BHASKAR, R.; BUCCI, S.J.; FEILD, T.S.; GLEASON, S.M.; HACKE, U.G.; JACOBSEN, A.L.; LENS, F.; MAHERALI, H.; MARTÍNEZ-VILALTA, J.; MAYR, S.; MENCUCCINI, M.; MITCHELL, P.J.; NARDINI, A.; PITTERMANN, J.; PRATT, R.B.; SPERRY, J.S.; WESTOBY, M.; WRIGHT, I.J.; ZANNE, A.E. (2012): Global convergence in the vulnerability of forests to drought. *Nature* 491 (7426): 752–755.

GRÄBER, J.; ZIESCHE, T.; MÖLLER, K.; KÄTZEL, R. (2012): Gradationsverlauf der Kiefern-schadinsekten im Norddeutschen Tiefland. *AFZ-Der Wald* 9: 35-38.

IPCC (2013): *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex und P.M. Midgley (Hrsg.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: 1535 S.

KALLWEIT, R. (2016): Klimaänderung und Witterungsdynamik in Brandenburg. *AFZ-Der Wald* 3: 15-18.

KÄSE, H. (1969): Ein Vorschlag für eine Methode zur Bestimmung und Vorhersage der Waldbrandgefährdung mit Hilfe komplexer Kennziffern. *Abhandlungen des meteorologischen Dienstes der Deutschen Demokratischen Republik* 94 (13).

KÄTZEL, R.; KALLWEIT, R.; LÖFFLER, S.; MÖLLER, K.; BECK, W.; SCHRÖDER, J. (2016): Zur Klimaplastizität der Wälder in Brandenburg – Eine retrospektive Betrachtung aus Sicht des Waldmonitorings. *AFZ-Der Wald* 3/2016: 19-24.

KÄTZEL, R.; ZANDER, M.; LÖFFLER, S. (2015): Wenn der Durst kommt – Eiche, Buche, Kiefer, Douglasie im Trockenstresstest. *Eberswalder Forstliche Schriftenreihe, Band 55*: 40-54.

LLORET, F.; KEELING E. G.; SALA A. (2011): Components of tree resilience: effects of successive low-growth episodes in old ponderosa pine forests. *Oikos* 120 (12): 1909–1920.

LUHMANN, N. (1993): Risiko und Gefahr. In: KROHN, W. und KRÜCKEN, G. (Hrsg.): *Risikante Technologien: Reflexion und Regulation*. Frankfurt/M., Suhrkamp: 138-185.

MLUR (Ministerium für Landwirtschaft, Umweltschutz und Raumordnung, Hrsg.) (2004): *Brandenburger Waldprogramm*, 20 S.

NW-FVA (Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt, Hrsg.) (2016a): *Nachhaltiges Landmanagement Modellregion Oder-Spree - Entwicklung der Landnutzung, Schlussfolgerungen*. 39 S.

NW-FVA (Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt, Hrsg.) (2016b): *Nachhaltiges Landmanagement Modellregion Fläming - Entwicklung der Landnutzung, Schlussfolgerungen*. 39 S.

ORLOWSKY, B., GERSTENGARBE, F-W UND WERNER, PC (2008): A resampling scheme for regional climate simulations and its performance compared to a dynamical RCM. *Theor. Appl. Climatol.* 92(3-4): 209-223.

RAY, D.; PEACE, A.; MOORE, R.; PETR, M.; GRIEVE, Y.; CONVERY, C.; ZIESCHE, T. (2016) Improved prediction of the climate-driven outbreaks of *Dendrolimus pini* in *Pinus sylvestris* forests. *Forestry* 1-15 (doi:10.1093/forestry/cpw007)

RIEK, W., RUSS, A. (2014): Regionalisierung des Bodenwasserhaushalts für Klimaszenarien als Grundlage für die forstliche Planung. In: *Wissenstransfer in die Praxis - Beiträge zum 9. Winterkolloquium am 27. Februar 2014 in Eberswalde*, Eberswalder Forstliche Schriftenreihe, Bd. 55. Landesbetrieb Forst Brandenburg - Landeskompetenzzentrum Forst Eberswalde (LFE), S. 20–30. URL <http://www.mil.brandenburg.de/sixcms/detail.php/bb1.c.231253.de>.

SCHERZBERG, A. (1993): Risiko als Rechtsproblem. *Verwaltungs-Archiv* Bd. 84: 484-513.

SCHMIDT, M. ; HANEWINKEL, M.; KÄNDLER, G.; KUBLIN, E.; KOHNLE, U. (2010): An inventory-based approach for modeling single-tree storm damage – experiences with the winter storm of 1999 in southwestern Germany. *Can J For Res* 40: 1636-1652. doi: 10.1139/X10-099.

SCOTT, R.E., MITCHELL, S. J. (2005): Empirical modelling of windthrow risk in partially harvested stands using tree neighbourhood and stand attributes. *For Ecol Manage* 218: 193-209. Doi: 10.1016/j.foreco.2005.07.012.

STEVENS, B. M. GIORGETTA, M. ESCH, T. MAURITSEN, T. CRUEGER, S. RAST, M. SALZMANN, H. SCHMIDT, J. BADER, K. BLOCK, R. BROKOPF, I. FAST, S. KINNE, L. KORNBLUEH, U. LOHMANN, R. PINCUS, T. REICHLER UND E. ROECKNER (2013): Atmospheric component of the MPI-M Earth System Model: ECHAM6, *J. Adv. Model. Earth Syst.*, 5: 146–172, doi:10.1002/jame.20015.