

# Wachstum von Eiche, Buche, Fichte und Kiefer im Klimawandel

Matthias Schmidt, Jan Schick und Thorsten Zeppenfeld

<https://doi.org/10.5281/zenodo.5569190>

Zur Abschätzung der Folgen des Klimawandels auf den Wald wurden an der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt Standort-Leistungs-Modelle (SLM) entwickelt, mit denen sich die Wuchsleistung wichtiger Baumarten im Klimawandel projizieren lässt. Diese SLM stellen eine wichtige Ergänzung zu Modellen zur Gefährdungseinschätzung durch Trockenstress, Stürme oder Borkenkäfer dar. Letztere ermöglichen die Abschätzung des Totalverlustes von Bäumen und Beständen, die SLM erlauben die Abschätzung des Risikos von Zuwachsverlusten.

## Methodik

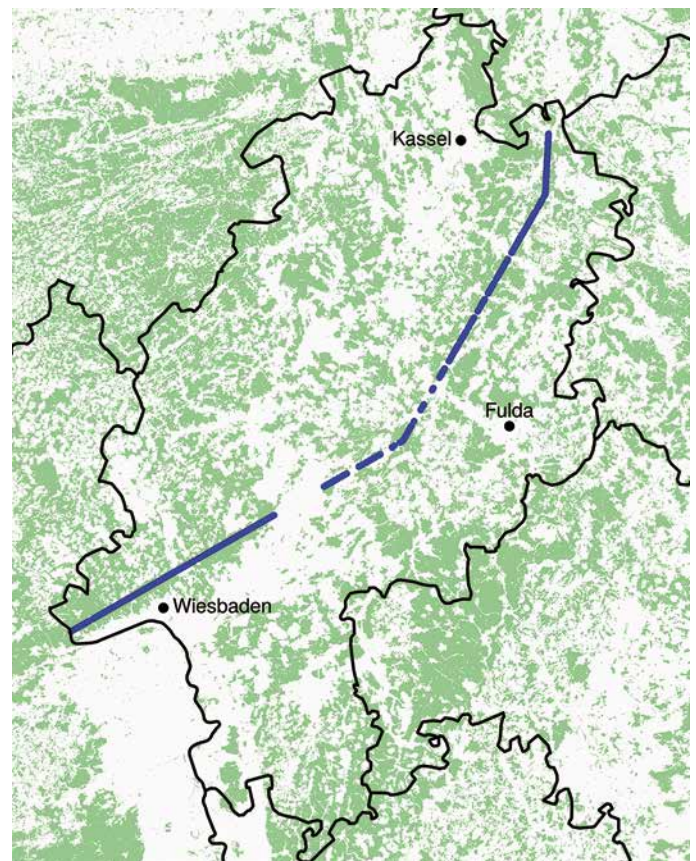
Die SLM sind als standortssensitive Bonitätsfächer konzipiert, mit denen sich die Entwicklung der Mittelhöhe (Hg) über dem Alter in Abhängigkeit von wichtigen Standortfaktoren einschätzen lässt (Schmidt 2020). Diese Faktoren sind die Temperatur- (TSum) und Niederschlagssumme (NSum) in der Vegetationszeit, die jährliche Stickstoffdeposition (NDep) sowie die Wasserhaushalts- (WHZ) und Nährstoffziffer (NZ) entsprechend der forstlichen Standortkartierung. Die edaphischen Standortfaktoren WHZ und NZ gehen statisch und die Klima- und Depositionsparameter dynamisch in die Leistungsschätzung ein. Dynamisch bedeutet in diesem Zusammenhang, dass die Standortfaktoren TSum, NSum und NDep als Mittelwerte für den Zeitraum berechnet werden, der für die Projektion der Mittelhöhe relevant ist. Soll beispielsweise die Mittelhöhe im Alter 100 (absolute Mittelhöhenbonität) im Jahr 2050 projiziert werden, so werden die 100 jahresspezifischen Werte für TSum, NSum und NDep von 1950 bis 2050 gemittelt und als Prädiktoren im Modell verwendet. Durch diese Vorgehensweise werden exakt die Klima- bzw. Depositionsbedingungen berücksichtigt, die für die spezifische Mittelhöhen-Entwicklung auf einem gegebenen Standort im betreffenden Zeitraum relevant sind. Bei den Klimaparametern handelt es sich bis 2020 um aggregierte und regionalisierte (räumlich interpolierte) Messdaten der Stationen des Deutschen Wetterdienstes. Für Projektionen in die Zukunft werden ab 2020 regionalisierte Werte aus Klimaprojektionen genutzt, wobei an der NW-FVA derzeit die 7 Klimäläufe des ReKliEs-De-Kernensembles auf Basis des RCP 8.5 Klimaszenarios verwendet werden (Hübener et al. 2017). Die Grundlage für die Regionalisierung der NDep bilden flächendeckende Berechnungen mit dem prozessorientierten LOTUS-EUROS Modell (Schaap et al. 2015), auf deren Basis Zeitreihen der retrospektiven Deposition generiert werden (Wellbrock et al. 2019). Die ertragskundliche Datengrundlage der SLM umfasst die Bundeswaldinventur I, II und III (Riedel et al. 2017) sowie Daten der Landeswaldinventur Brandenburg und von Betriebsinventuren der Niedersächsischen Landesforsten und von HessenForst. Durch diese sehr umfangreiche Datenbasis werden sowohl große Gradienten der dynamischen Standortfaktoren als auch edaphische Extremstandorte abgedeckt. Insbesondere die Erfassung der unter den aktuellen Klimabedingungen wärmsten und niederschlagsärmsten Standorte in Deutschland ist von großer Bedeutung, um möglichst realistische Projektionen unter den Bedingungen eines veränderten Klimas zu ermöglichen. Dabei wird angenommen, dass Wälder in Nordwestdeutschland zukünftig ähnliche Wuchsleistungen zeigen wie derzeitige Wälder auf den aktuell wärmsten und niederschlagsärmsten Standorten, wenn sich das Klima in Richtung dieser Standorte verändert (Analogieschluss).



Foto: J. Evers

## Ergebnisse

Im Folgenden werden Projektionen der absoluten Mittelhöhenbonität und der Leistungsklasse (LKL = dGZmax) für die Jahre 2000 und 2100 entlang eines Transektes von Witzenhausen (Werra) über den Meißner, den Vogelsberg, die Wetterau und den Hohen Taunus bis zum Rhein bei Rüdesheim für die Baumarten Eiche, Buche, Fichte und Kiefer dargestellt. Um die klimaabhängigen Trends entlang des Transektes klarer erkennen zu können, wurde die tlw. starke, durch kleinräumige Standortunterschiede bedingte Streuung der projizierten Bonitäten durch einen Glättungsalgorithmus reduziert. Hier werden nur



Transect von Witzenhausen (Werra) über den Meißner, den Vogelsberg, die Wetterau und den Hohen Taunus bis zum Rhein bei Rüdesheim. Für diesen Transect wird die Wuchsleistung für die Jahre 2000 und 2100 projiziert. Der Transect beinhaltet ausschließlich Waldflächen.

# Wachstum von Eiche, Buche, Fichte und Kiefer im Klimawandel

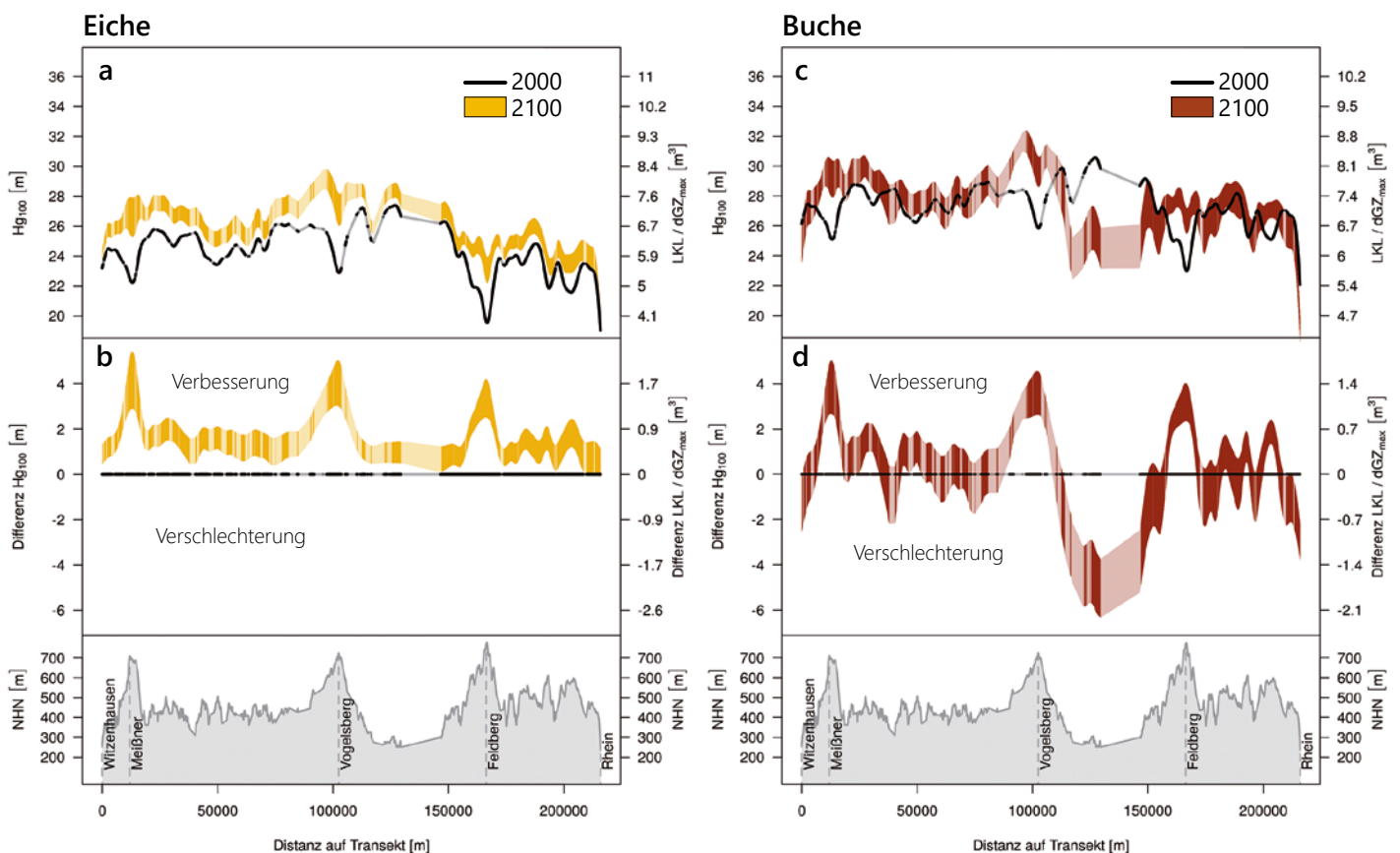
die Höhenbonitäten detaillierter analysiert. Bei einer Analyse der Leistungsklassen wäre zu beachten, dass die Volumenzunächse der Baumarten bei gleicher Höhenbonität deutliche Unterschiede aufweisen. Für die Eiche weisen die Schätzungen für das Jahr 2000 in den Hochlagen von Meißner, Vogelsberg und Taunus eine höhere Unsicherheit auf, da sie im Randbereich der Daten liegen, die die Grundlage des SLM bilden. In den Gebieten mit aktuell schon hohen Temperatur- und niedrigen Niederschlagssummen liegen die Projektionen für das Jahr 2100 in Abhängigkeit von den verschiedenen Klimäläufen und baumartenspezifischen Datengrundlagen mehr oder weniger stark im Extrapolationsbereich, sodass die Modellvorhersagen auch in diesem Bereich weniger sicher sind.

Zusätzlich werden die Veränderungen zwischen dem Jahr 2000 und 2100 abgebildet, um die unterschiedlichen Reaktionen der Baumarten auf den projizierten Klimawandel bzgl. der Wuchseistung zu analysieren.

Für das Jahr 2000 zeigen die Modellanschätzungen für **Eiche** ein Muster, dass deutlich durch die Höhenlage bestimmt wird (Abb. unten, **Eiche a**). So weisen die Hochlagen von Meißner, Vogelsberg und Taunus die geringsten Bonitäten auf. Die höchsten aktuellen Bonitäten werden für Höhenlagen zwischen 300-400 m im Bereich der Wetterau projiziert. Die Bonitäten auf osthessischen Buntsandsteinstandorten sind bei gleicher Höhenlage etwas geringer und auf den Schieferstandorten des Hohen Taunus deutlich geringer. Auffällig sind zudem die geringen Bonitäten, die für Standorte in Rheinnähe projiziert werden. Der Vergleich mit den Projektionen für das Jahr 2100 zeigt

für die Eiche ausnahmslos Bonitätsverbesserungen, wobei die Klimäläufe im Bereich der geringsten Seehöhen des Transektes nur sehr geringe Zunahmen zeigen, die bis 500 m auf 2,5 m ansteigen (Abb. unten, **Eiche b**). Oberhalb von 500 m werden starke Bonitätsverbesserungen mit Maximalwerten von 5,5 m am Meißner, von 5,2 m am Vogelsberg und 4,2 m am Feldberg erreicht. Dabei zeigt sich ein deutlicher Nord-Süd-Gradient. So werden beispielsweise auf 750 m Seehöhe am Meißner höhere Bonitätsverbesserungen erreicht als auf 750 m am Vogelsberg und im Taunus.

Für die **Buche** weisen die Schätzungen für das Jahr 2000 ein ähnliches Muster wie bei Eiche auf. Allerdings liegen die Bonitäten erwartungsgemäß deutlich höher als bei Eiche (Abb. unten, **Buche c**). Bei der Projektion für das Jahr 2100 zeigen sich jedoch große Unterschiede zwischen den beiden Laubbaumarten, da bei der Buche in relativ weiten Höhenbereichen des Mittelgebirges auch Klimäläufe mit Bonitätsverschlechterungen auftreten. Im Taunus werden erst ab 550 m ausnahmslos Bonitätsverbesserungen projiziert, in Nordosthessen wird dieser Bereich bereits ab 400 m erreicht. Die Hochlagen von Meißner, Vogelsberg und Taunus weisen wie bei der Eiche ausnahmslos deutliche Bonitätsverbesserungen mit Maximalwerten von 5 m am Meißner, von 4,5 m am Vogelsberg und 4 m am Feldberg auf. Im starken Kontrast zur Eiche zeigen die Projektionen für die Buche in der Wetterau jedoch Bonitätsverschlechterungen von bis zu 6,2 m (Abb. unten, **Buche d**). Damit sind die Standorte betroffen, auf denen die Buche aktuell die besten Bonitäten erreicht (Abb. unten, **Buche c**).



Projektionen der absoluten Mittelhöhenbonität ( $Hg_{100}$ ) und der Leistungsklasse ( $LKL/dGZ_{max}$ ) für Eiche (a) und Buche (c) für das Jahr 2000 (schwarze Linien) und für das Jahr 2100 und die 7 Klimäläufe des ReKliEs-De-Kernensembles auf Basis des RCP 8.5 Klimaszenarios (farbige Bänder) entlang des in der Abb. Seite 34 dargestellten Transektes von Witzenthausen (Werra) bis zum Rhein. Die Veränderungen zwischen den Projektionen für 2000 und 2100 zeigen die Diagramme b (Eiche) und d (Buche). Für Punkte außerhalb der Waldfläche, die am hellerem Farbton erkennbar sind, wurde zwischen den Projektionen benachbarter Waldflächen interpoliert. Die unteren Graphiken beschreiben das Profil der Seehöhe (NHN) entlang des Transektes.

# Wachstum von Eiche, Buche, Fichte und Kiefer im Klimawandel

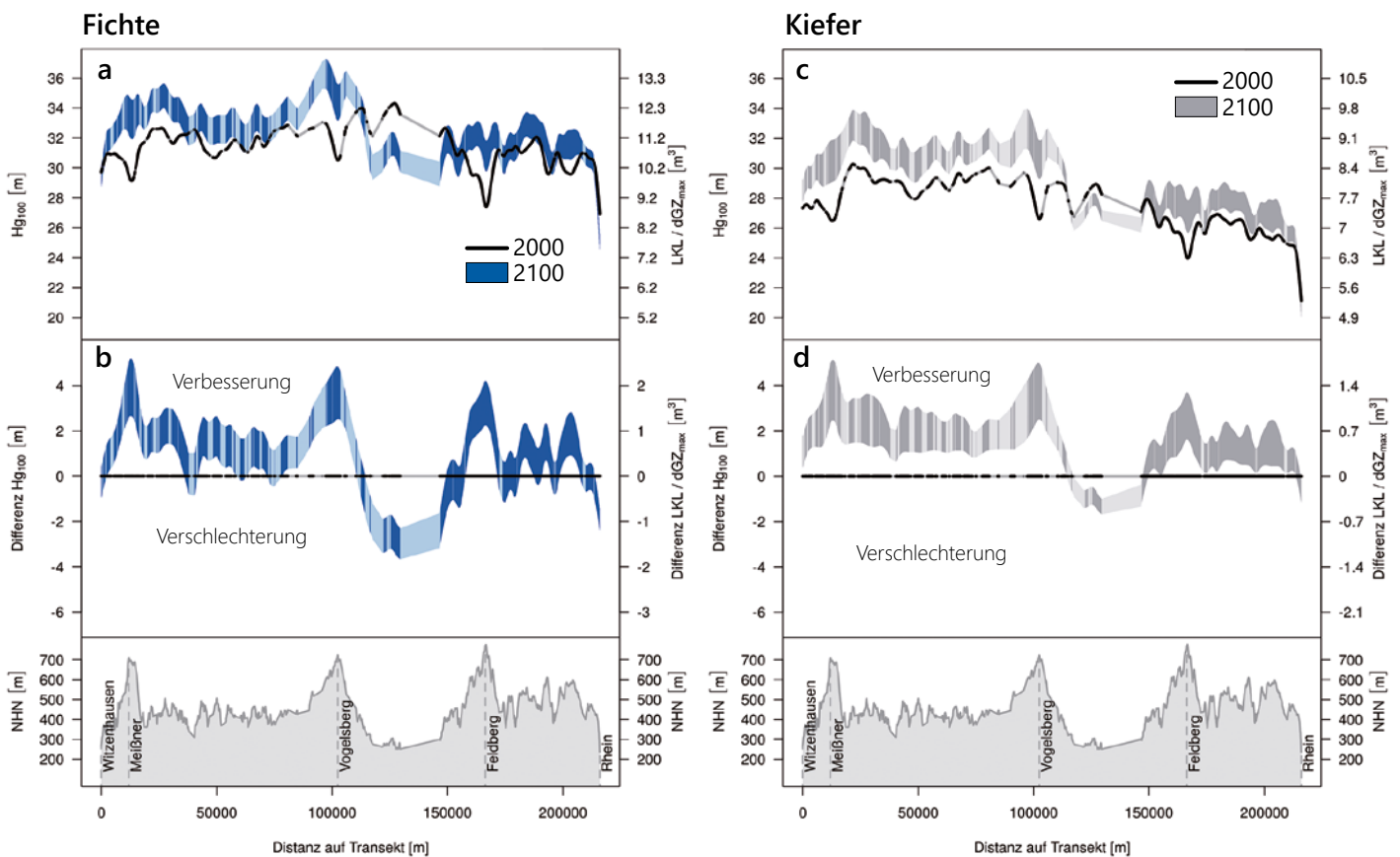


Foto: M. Spielmann

Für die **Fichte** weisen die Schätzungen für das Jahr 2000 ein ähnliches Muster wie bei Buche und Eiche auf. Allerdings liegen die Bonitäten – auch hier erwartungsgemäß – noch einmal deutlich höher als bei Buche (Abb. unten, **Fichte a**). Aufgrund ihrer geringen Ansprüche bzgl. der Temperatursumme sind die relativen Bonitätsveränderungen zwischen den mittleren Höhenlagen und den Hochlagen geringer als bei Buche und

Eiche. Bzgl. der Projektionen für das Jahr 2100 zeigt die Fichte ein ähnliches Muster wie die Buche und unterscheidet sich damit ebenfalls deutlich von der Eiche. So verschlechtern sich die Bonitäten in der Wetterau wie bei der Buche ausnahmslos, allerdings sind die Rückgänge von bis zu 3,5 m nicht ganz so deutlich. In den Mittelgebirgen treten analog zur Buche einzelne Klimälufe mit Bonitätsverschlechterungen auf. Es sind aber weniger Standorte betroffen, da in Nordosthessen bereits oberhalb von 350 m und im Taunus oberhalb von 450 m ausschließlich Bonitätsverbesserungen projiziert werden. Der für Eiche beschriebene Nord-Süd-Klimagradient tritt auch bei Buche und Fichte auf. So zeigt sich auch hier, dass die Bonitätsverbesserungen bei gleicher Höhenlage vom Meißner über den Vogelsberg zum Taunus hin abnehmen (Abb. Seite 35, **Buche d** / Abb. unten, **Fichte b**).

Die Schätzungen für die **Kiefer** für das Jahr 2000 (Abb. unten, **Kiefer c**) liegen in etwa auf dem Niveau der Buche. Allerdings liegen die Bonitäten im Osthessischen Bergland deutlich über den Werten, die im Taunus geschätzt werden. Daraus ergibt sich, dass die aktuellen Bonitäten der Kiefer im Osthessischen Bergland über und im Taunus unter denen der Buche liegen. Ein auffälliger Unterschied zu den anderen Baumarten besteht darin, dass die besten aktuellen Bonitäten nicht in der Wetterau, sondern im osthessischen Bergland geschätzt werden. Für das Jahr 2100 weist die Kiefer ein Muster auf, das zwischen dem der Eiche und dem der Fichte liegt (Abb. unten, **Kiefer d**). Es treten sowohl Klimälufe mit Bonitätsverbesserungen als auch -verschlechterungen auf, die Verschlechterungen



Projektionen der absoluten Mittelhöhenbonität ( $Hg_{100}$ ) und der Leistungsklasse ( $LKL/dGZ_{max}$ ) für Fichte (a) und Kiefer (c) für das Jahr 2000 (schwarze Linien) und für das Jahr 2100 und die 7 Klimälufe des ReKliEs-De-Kernensembles auf Basis des RCP 8.5 Klimaszenarios (farbige Bänder) entlang des in der Abb. Seite 34 dargestellten Transektes von Witzshausen (Werra) bis zum Rhein. Die Veränderungen zwischen den Projektionen für 2000 und 2100 zeigen die Diagramme b (Fichte) und d (Kiefer). Für Punkte außerhalb der Waldfläche, die am hellerem Farbton erkennbar sind, wurde zwischen den Projektionen benachbarter Waldflächen interpoliert. Die unteren Graphiken beschreiben das Profil der Seehöhe (NHN) entlang des Transektes.

# Wachstum von Eiche, Buche, Fichte und Kiefer im Klimawandel

rungen werden allerdings ausschließlich für den Bereich der Wetterau und in der Nähe des Rheins projiziert und sind vergleichsweise gering. Für beide Bereiche projizieren allerdings alle 7 Klimäläufe Bonitätsverschlechterungen.

Als allgemeines Muster lässt sich für alle Baumarten festhalten, dass für die Hochlagen von Meißner, Vogelsberg und Taunus, wo aktuell die Temperatursumme der begrenzende Wachstumsfaktor ist, deutliche Bonitätsverbesserungen projiziert werden. In den tieferen Lagen der Mittelgebirge werden je nach Baumart nur geringere Verbesserungen und teilweise Verschlechterungen projiziert. Im Taunus werden zukünftig bei gleicher Höhenlage häufiger Verschlechterungen auftreten als im Osthessischen Bergland. Im Bereich der Wetterau werden für die Eiche nur relativ geringe Bonitätsverbesserungen und für Kiefer, Fichte und Buche ausnahmslos Verschlechterungen projiziert. Als Ursache sind sehr hohe zukünftige Temperatursummen oberhalb der Optimalbereiche und vor allem sehr geringe zukünftige Niederschlagssummen zu nennen, die das Wachstum begrenzen.

Projektionen für die gesamte Waldfläche erlauben eine summarische Analyse der Hauptbaumarten bzgl. der zukünftig zu erwartenden Veränderungen der Wuchsleistung. Für einen Vergleich werden die Ergebnisse für alle Trägerländer der NW-FVA aufgeführt (Tab. unten).

*Anteile an der Gesamtwaldfläche für die Trägerländer der NW-FVA mit ausschließlich Bonitätsverbesserungen bzw. -verschlechterungen in allen 7 Klimäläufen bzw. mit indifferenter Entwicklung für die Hauptbaumarten*

Schleswig-Holstein			
Baumart	Bonitätsverbesserungen [%]	Bonitätsverschlechterungen [%]	Indifferent [%]
Eiche	100,0	0,0	0,0
Buche	26,4	0,6	73,0
Fichte	78,3	0,0	21,7
Kiefer	99,9	0,0	0,1
Niedersachsen			
Baumart	Bonitätsverbesserungen [%]	Bonitätsverschlechterungen [%]	Indifferent [%]
Eiche	98,5	0,0	1,5
Buche	13,1	44,6	42,3
Fichte	21,4	26,1	52,5
Kiefer	69,4	0,0	30,6
Hessen			
Baumart	Bonitätsverbesserungen [%]	Bonitätsverschlechterungen [%]	Indifferent [%]
Eiche	84,0	0,0	16,0
Buche	23,8	36,0	40,2
Fichte	37,3	29,0	33,7
Kiefer	63,7	16,1	20,2
Sachsen-Anhalt			
Baumart	Bonitätsverbesserungen [%]	Bonitätsverschlechterungen [%]	Indifferent [%]
Eiche	91,2	0,0	8,8
Buche	13,1	77,6	9,3
Fichte	16,7	66,0	17,3
Kiefer	16,1	5,3	78,6



Foto: M. Spielmann

Für eine umfassende Bewertung des Anpassungspotenzials der Baumarten im Rahmen einer multifunktionalen Waldwirtschaft müssen die Projektionen der Wuchsleistung mit der Einschätzung wichtiger abiotischer und biotischer Risiken wie Trockenstress-, Sturm- und Borkenkäferschäden im Klimawandel kombiniert werden. So kann eine deutliche Zunahme der Risiken dazu führen, dass unveränderte oder sogar verbesserte Wuchsleistungen, die sich nach den hier vorgestellten Modellen theoretisch ergeben müssten, nicht realisiert werden.

## Literatur

- Hübener H, Bülow K, Fooker C, Früh B, Hoffmann P, Höpp S, Keuler K, Menz C, Mohr V, Radtke K, Ramthun H, Spekat A, Steger C, Tousseint F, Warrach-Sagi K, Woldt M 2017: Ergebnisbericht REKLIES-DE – Regionale Klimaprojektionen Ensemble für Deutschland. 76 S., <http://rekli.es.hlnug.de/fileadmin/tmpl/rekli/es/dokumente/ReKliEs-De-Ergebnisbericht.pdf>
- Riedel T, Hennig P, Kroihner F, Polley H, Schmitz F, Schwitzgebel F 2017: Die dritte Bundeswaldinventur (BWI 2012): Inventur- und Auswertemethoden, 124 S
- Schaap M, Kruit RW, Hendriks C, Kranenburg R, Segers A, Bultjes P 2015: Atmospheric deposition to German natural and semi-natural ecosystems during 2009. Umweltforschungsplan Projekt No. (FKZ) 371263240-1 UBA-FB00. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, Berlin
- Schmidt M 2020: Standortsensitive und kalibrierbare Bonitätsfächer: Wachstumspotenziale wichtiger Baumarten unter Klimawandel (Site-sensitive, calibratable site index curves: The growth potential of important tree species under climate change). AFJZ 190(5/6):136-160. DOI: 10.23765/afjz0002043
- Wellbrock N, Ahrends B, Bögelein R, Bolte A, Eickenscheidt N, Grüneberg E, König N, Schmitz A, Fleck S, Ziche D 2019: Concept and Methodology of the National Forest Soil Inventory. In: Wellbrock N., Bolte A. (eds) Status and Dynamics of Forests in Germany. Ecological Studies (Analysis and Synthesis), vol 237. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-15734-0\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-030-15734-0_1)