

Die Anfälligkeit der Wälder Deutschlands gegenüber dem Klimawandel

C. Kölling, L. Zimmermann

Zusammenfassung Der Klimawandel stellt selbst in seiner schwächsten vorhergesagten Form eine starke Einwirkung auf die Wälder Deutschlands dar. Glücklicherweise sind nicht alle Baumarten gleich anfällig gegenüber diesen Einwirkungen, die sich vor allem in Temperaturerhöhung und Niederschlagsverminderung ausdrücken. Je nach ihrem natürlichen Verbreitungsschwerpunkt verlieren oder gewinnen Waldbaumarten an Übereinstimmung mit den für sie günstigen Klimabedingungen. Die Mehrzahl der standortsheimischen Laubbaumarten wie Buche, Eiche, Ahorn und Esche wird vom Klimawandel wahrscheinlich weitaus weniger betroffen sein als die in Deutschland bevorzugt angebaute Nadelbaumarten Fichte, Kiefer und Lärche. Im klimagerechten Waldumbau versucht die Forstwirtschaft, sich durch den Wechsel zu weniger anfälligen Baumarten an die zukünftigen geänderten Bedingungen anzupassen.

Vulnerability of German forests to climate change

Abstract The impact of climate change on forests is expected to be strong, even if modest emission scenarios are assumed. Fortunately not all tree species are equally vulnerable to these impacts which mainly express themselves in elevated temperatures and reduced overall precipitation. Depending on their natural foci of distribution, tree species gain or lose congruence with their favourable climatic conditions. Most of native German deciduous tree species like European beech, oak, maple and ash are likely to be less affected by climate change than the widely cultivated conifers Norway spruce, Scots pine and European larch. A main goal of forestry is to adapt German forests to future climatic conditions by altering tree species composition.

1 Einleitung

Wie in vielen Vegetationsformen ist auch in Wäldern die Artenzusammensetzung hochgradig von klimatischen Größen bestimmt. Die Abfolge der Vegetationsgürtel in Europa von nordeuropäischen borealen Nadelwäldern, mitteleuropäischen temperaten Falllaubwäldern und südeuropäischen Hartlaubwäldern ist zum größten Teil das Produkt der mit abnehmender geografischer Breite zunehmenden Temperatur. Man ist sich in der Vegetationsgeografie einig, dass die großräumige Verbreitung der Pflanzenarten eine Funktion klimatischer Größen darstellt (z. B. [1 bis 3]). Erst auf der regionalen und noch mehr auf der lokalen Maßstabebene üben weitere ökologische Größen, wie z. B. die Bodenqualität oder die Konkurrenz, verstärkt Einfluss auf die natürliche Artenzusammensetzung der Pflanzendecke aus. Selbst vom Menschen gegenüber dem Naturzustand stark veränderte Bestände aus land- oder forstwirtschaftlichen Nutzpflanzen lassen diese großräumige Abhängigkeit von klimatischen Größen noch erkennen. Man denke z. B. an die Anbaugren-

zen der Getreidearten, Wein- und Obstsorten oder eben auch der forstlich genutzten Baumarten.

In der Forstwirtschaft sind die Anbaumöglichkeiten der Waldbäume in ganz besonderem Maße von der klimatischen Umgebung abhängig. Zum einen sind, anders als in den übrigen Land nutzenden Wirtschaftszweigen, bei dieser extensiven Form der Landnutzung die Möglichkeiten der Bewässerung, Klimatisierung, Düngung oder Bodenbearbeitung beschränkt, zum anderen ist zumindest in Mitteleuropa der Genpool der meisten angebaute Baumarten züchterisch nur wenig verändert [4]. Lange Generationszeiträume von zum Teil weit über 100 Jahren erschweren eine Optimierung des Anbaus nach dem Prinzip „Versuch und Irrtum“ und eine rasche Anpassung an eintretende Umweltveränderungen. Forstwirtschaft kann so mit gewissem Recht als „Freiluftveranstaltung mit Überlänge“ bezeichnet werden.

Selbst bei Annahme günstiger Emissionsszenarien scheint ein weiterer Anstieg der globalen Mitteltemperatur um mindestens 2 °C gegenüber dem Bezugszeitraum am Ende des vorigen Jahrhunderts unvermeidlich zu sein [5]. Für die Regionen Mitteleuropas ergeben die regionalen Klimamodelle eine wahrscheinliche Temperaturerhöhung in ähnlicher Größenordnung bei einer moderaten Verminderung der Niederschläge [6]. Das wahre Ausmaß einer Temperaturerhöhung um die gering erscheinende Differenz von 2 °C verdeutlicht der geografische Vergleich zu Regionen, die schon heute diese höhere Jahresmitteltemperatur aufweisen. Entsprechend warme Regionen liegen zum Teil mehrere 100 km entfernt, im Gebirge sind Verschiebungen der Höhengrenzen um 500 bis 400 Höhenmeter realistisch.

Mit wachsender Sorge beobachtet man daher besonders in der Forstwirtschaft den Klimawandel [7 bis 10]. Die Planungszeiträume in diesem Wirtschaftszweig umfassen teilweise die gesamte Laufzeit der Klimaszenarien. Bäume, die in der Gegenwart gepflanzt werden, werden wahrscheinlich in einer deutlich veränderten Umwelt geerntet und es ist in vielen Fällen fraglich, ob das vorgesehene Erntealter überhaupt erreicht wird. Wachsen die Wälder in eine für sie ungünstige klimatische Umgebung hinein, so steigt die Anfälligkeit gegenüber biotischen und abiotischen Schäden. Insbesondere das Gleichgewicht zwischen Wirt- und Parasitenpopulationen ist in hohem Grade vom Klima abhängig.

Dr. Christian Kölling, Dr. Lothar Zimmermann,
Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, Freising.

Danksagung



Der Druck dieses Artikels wurde gefördert vom Förderverein Waldforschung in Bayern e. V., Am Hochanger 11, 85354 Freising. Der Zweck des gemeinnützigen Vereins ist die Förderung von Wissenschaft und Forschung sowie Bildung und Erziehung. Die für den Vereinszweck erforderlichen Geldmittel werden vorwiegend aus den regelmäßigen Jahresbeiträgen der Mitglieder und durch Spenden gewonnen.

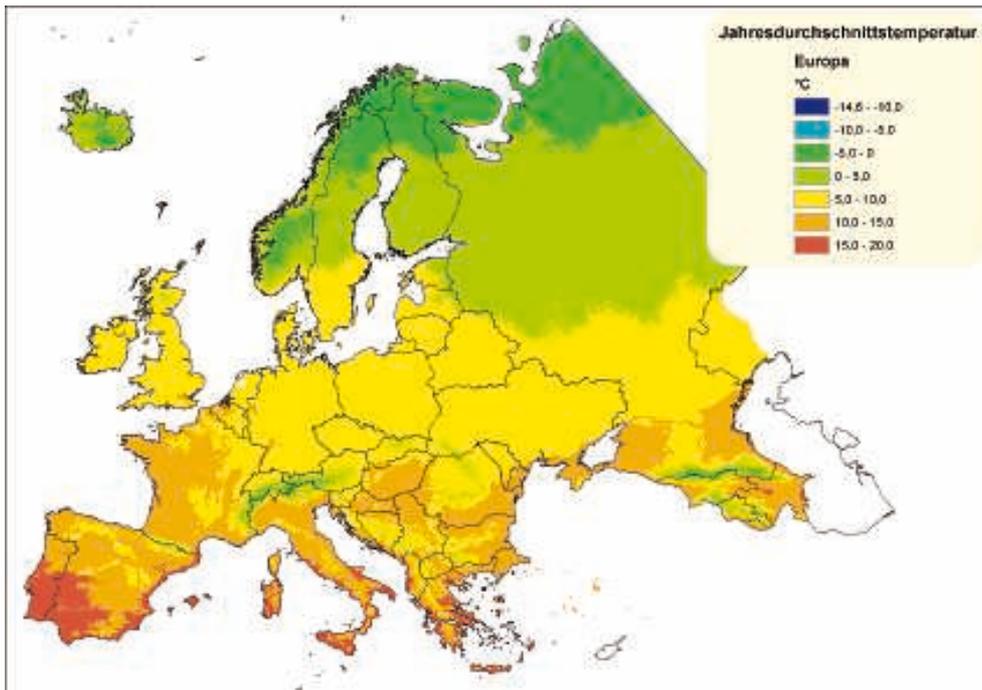


Bild 1. Gegenwärtige (1950 bis 2000) Jahresmitteltemperaturen in Europa [12].

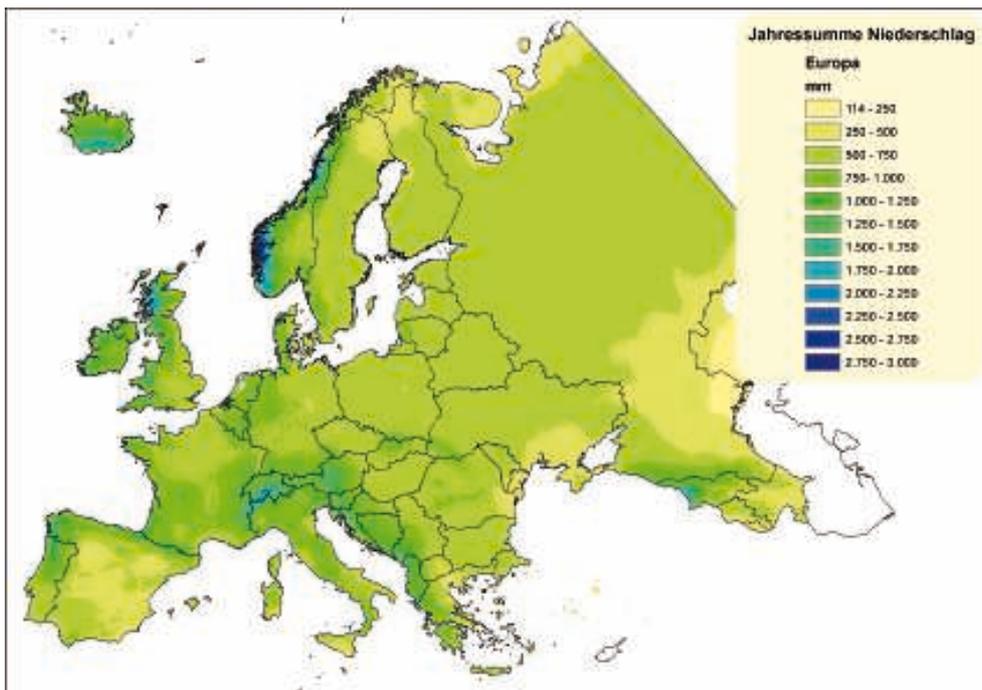


Bild 2. Gegenwärtige (1950 bis 2000) Jahresniederschlagssummen in Europa [12].

Wenn bei einer Zunahme der Temperaturen künftig auch mehr Dürreperioden auftreten, kann dies gleichzeitig die Waldbäume schwächen und die Forstschädlinge stärken. Erste Vorboten solcher Entwicklungen sind die in den letzten Jahren beobachteten intensiven Massenvermehrungen von Rinden brütenden Borkenkäfern an der Fichte [11]. Glücklicherweise sind nicht alle in Deutschland angebaute Waldbaumarten gleich anfällig gegenüber den Einwirkungen des Klimawandels, weil ihre Verbreitungsgebiete sich unterschiedlich weit in den warm-trockenen Klimabereich hinein erstrecken. Solche Unterschiede in der Anfälligkeit sind die wichtigsten Ansatzpunkte für erfolgreiche Anpas-

sungsstrategien in der Forstwirtschaft. Im klimagerechten Waldumbau versucht man, den Anteil der anfälligen Baumarten zu vermindern und den der weniger anfälligen Baumarten zu erhöhen. Auf diese Weise hofft man, die Auswirkungen des Klimawandels auf die Wälder auf ein erträgliches Maß zu begrenzen.

2 Methodik

Grundlage unserer Betrachtung der Anfälligkeit der Waldbaumarten gegenüber dem Klimawandel ist die Abhängigkeit ihres Vorkommens von klimatischen Größen. Grundsätzlich gilt: Das Auftreten einer Baumart auf der überregionalen Maßstabsebene ist eine Funktion verschiedener Klimaparameter. Ändern sich die Klimaparameter, ändert sich auch das Vorkommen (oder die Anbaumöglichkeit) von Waldbäumen.

Für einen ersten Überblick wurden die robusten Klimaparameter Jahresmitteltemperatur und Jahresniederschlagssumme aus der Weltklimakarte [12] gewählt. Diese Klimakarten (**Bilder 1 und 2**) wurden den Verbreitungsgebieten von 16 Waldbaumarten (**Tabelle 1**) gegenübergestellt. Bis auf eine Ausnahme (Douglasie) sind diese aus dem Werk der Vegetationskarte von Europa [13] extrahiert. Für jede natürliche Waldgesellschaft in Europa sind in diesem Werk sowohl die Verbreitung in Europa als auch die

Zusammensetzung der Baumschicht angegeben. Die Angaben der Vegetationskarte von Europa weisen ein hohes Maß an Zuverlässigkeit auf, weil sie das Wissen vieler nationaler Experten zur natürlichen Verbreitung der Baumarten zusammenfasst. Beispiele für aus den Angaben der Vegetationskarte von Europa generierte Verbreitungskarten finden sich in den **Bildern 3 und 4**.

Die Angaben zu Jahresmitteltemperatur und Jahresniederschlagssumme wurde in Form eines Diagramms neu zusammengestellt. So sind in **Bild 5** alle in Europa vorkommenden Kombinationen dieser beiden Klimaparameter mit ihrer Häufigkeit (in % der Gesamtfläche) zusammengestellt. In

Baumart	Verbreitungsschwerpunkt
<i>Abies alba</i> (Weißtanne)	mitteleuropäisch-präalpin
<i>Acer platanoides</i> (Spitzahorn)	mitteleuropäisch-boreal
<i>Acer pseudoplatanus</i> (Bergahorn)	mitteleuropäisch
<i>Betula pendula</i> (Hängebirke)	mitteleuropäisch-boreal
<i>Castanea sativa</i> (Esskastanie)	submediterran
<i>Fagus sylvatica</i> (Rotbuche)	mitteleuropäisch
<i>Fraxinus excelsior</i> (Gemeine Esche)	mitteleuropäisch
<i>Larix decidua</i> (Europäische Lärche)	alpin
<i>Picea abies</i> (Gemeine Fichte)	boreal-alpin
<i>Pinus sylvestris</i> (Waldkiefer)	mitteleuropäisch-boreal
<i>Pseudotsuga menziesii</i> (Douglasie)	Nordwest-Amerika
<i>Quercus petraea</i> (Traubeneiche)	mitteleuropäisch
<i>Quercus pubescens</i> (Flaumeiche)	submediterran
<i>Quercus robur</i> (Stieleiche)	mitteleuropäisch-osteuropäisch
<i>Tilia cordata</i> (Winterlinde)	mitteleuropäisch-osteuropäisch
<i>Tilia platyphyllos</i> (Sommerlinde)	mitteleuropäisch

Tabelle 1. Untersuchte Baumarten und ihr Verbreitungsschwerpunkt.

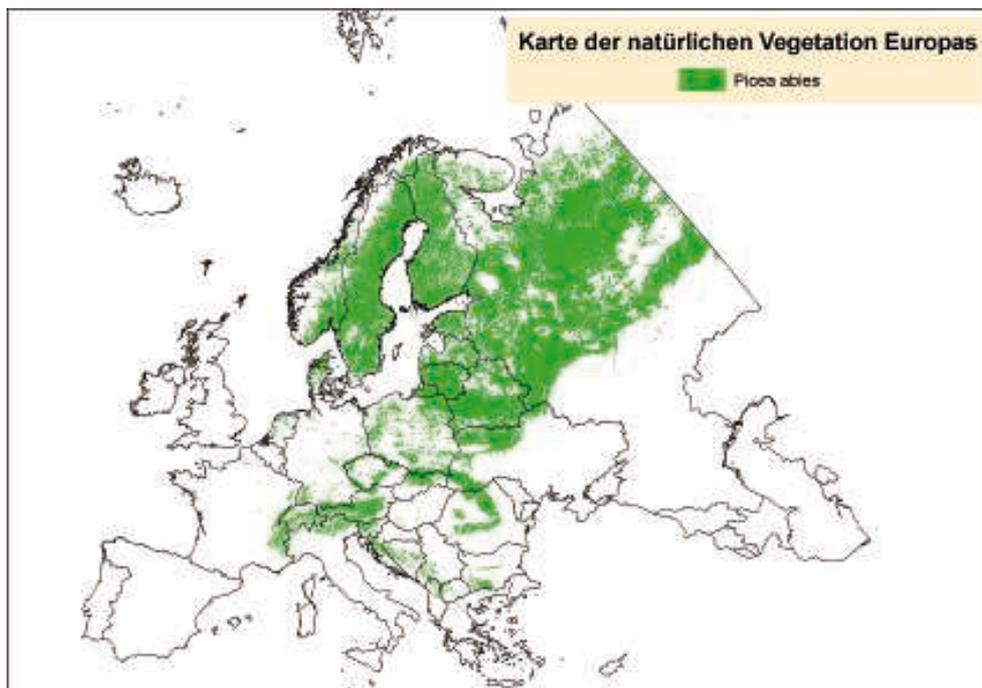


Bild 3. Verbreitungsgebiet der boreal-alpinen Baumart Fichte [13].

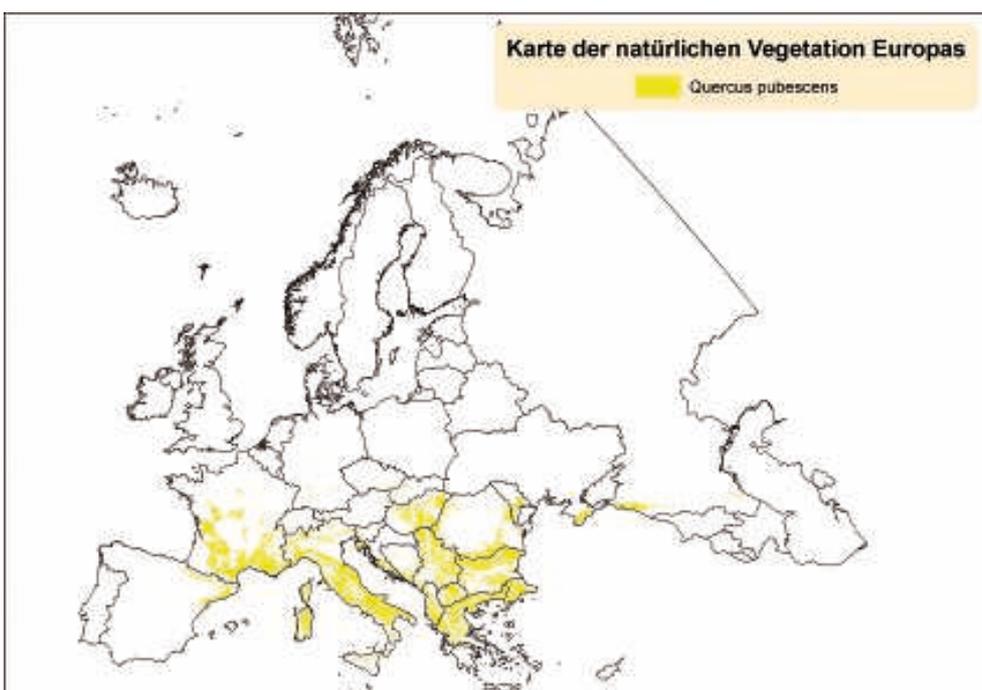


Bild 4. Verbreitungsgebiet der submediterranen Baumart Flaumeiche [13].

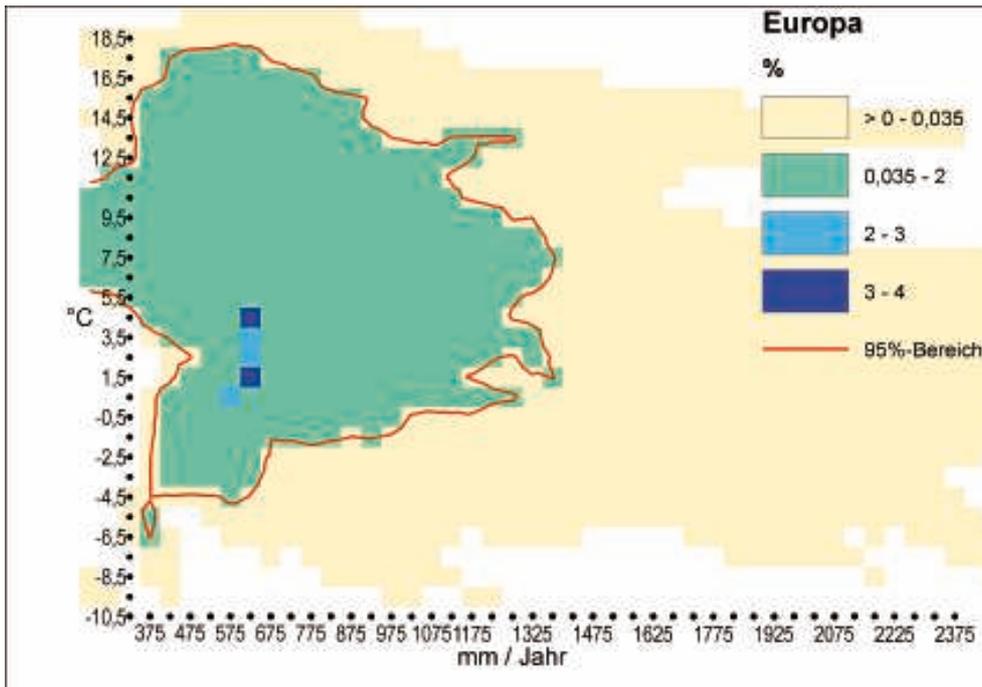


Bild 5. Klimahülle für Europa (trockenste Bereiche nicht dargestellt)

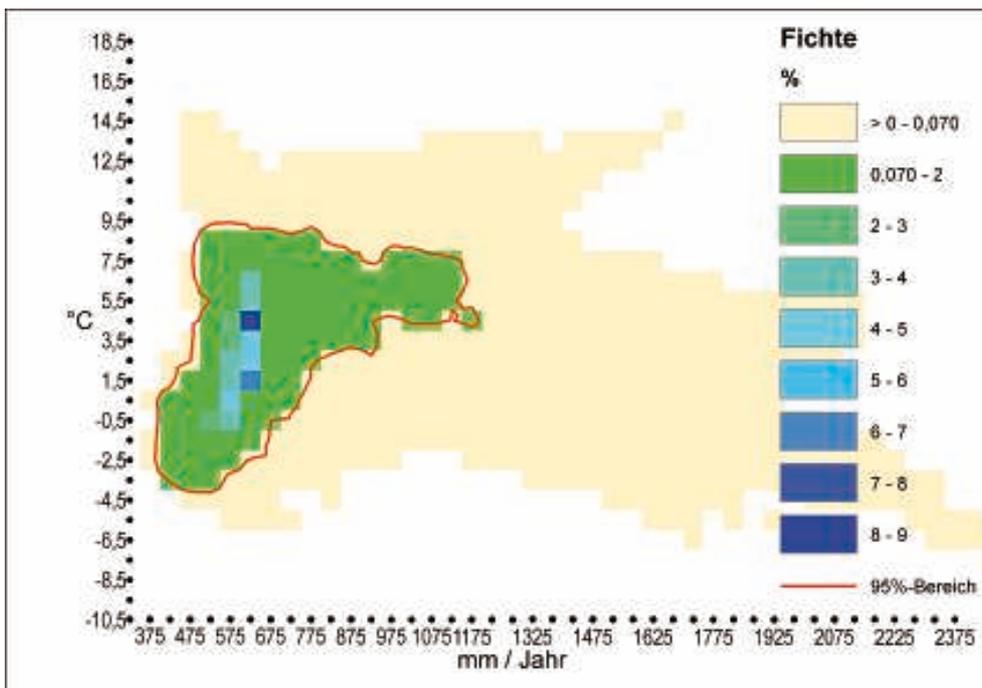


Bild 6. Klimahülle der Baumart Fichte.

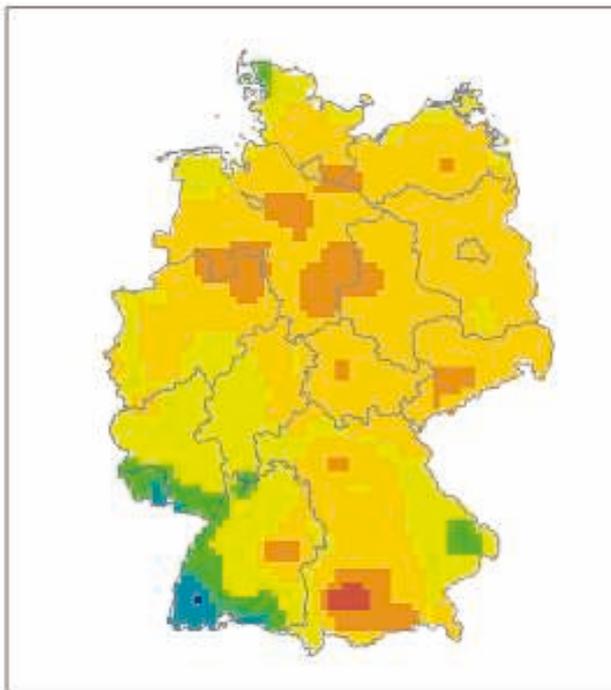
Anlehnung an den Begriff „Bioclimate Envelope“ [5; 14; 15] nennen wir diese Darstellung „Klimahülle“. Sie symbolisiert im Fall von Bild 5 die Vielfalt und die Häufigkeit aller im Gebiet Europas realisierten Klimabedingungen. Um Seltenheiten und Ungenauigkeiten in den verwendeten Kartengrundlagen zu eliminieren, wurde bevorzugt der engere Bereich mit 95 % der häufigsten Werte (rote Linie in Bild 5) verwendet und die 5 % seltenste Kombinationen von Jahresmitteltemperatur und Jahresniederschlagssumme (hellbraune Felder in Bild 5) ausgeblendet.

Auch für die nach der Vegetationskarte von Europa [13] ermittelten Verbreitungsgebiete der in Tabelle 1 genannten Baumarten wurden nach dem oben beschriebenen Verfahren Klimahüllen erstellt. Ausgewählt wurden die in Deutsch-

land vorkommenden bzw. angebaute Baumarten mit mitteleuropäischem, submediterranean, borealem und alpischem Verbreitungsschwerpunkt. Für die aus dem westlichen Nordamerika stammende Baumart Douglasie wurde als Eichareal zum einen das gesamte Areal der grünen Küstenherkünfte westlich der Kaskaden von Nordkalifornien bis zum südwestlichen Britisch-Kolumbien, zum anderen nur das Gebiet der angebaute Herkünfte aus den Erntegebieten für den Import verwendet ([16], Ruetz, mdl. Mitt. 2007).

In Bild 6 ist beispielhaft die Klimahülle der Fichte (*Picea abies*) dargestellt. Deutlich sind ein borealer (trocken-kalter) und ein alpischer (feucht-kalter) Ast erkennbar.

Aus der Klimahülle von Europa (Bild 5) lassen sich beliebige Klimahüllen für die Staaten und Regionen herauschneiden.



Temperaturerhöhung

2100 zu 2000

°C

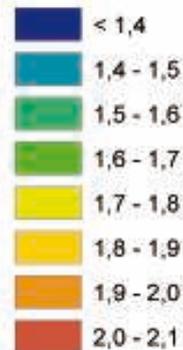
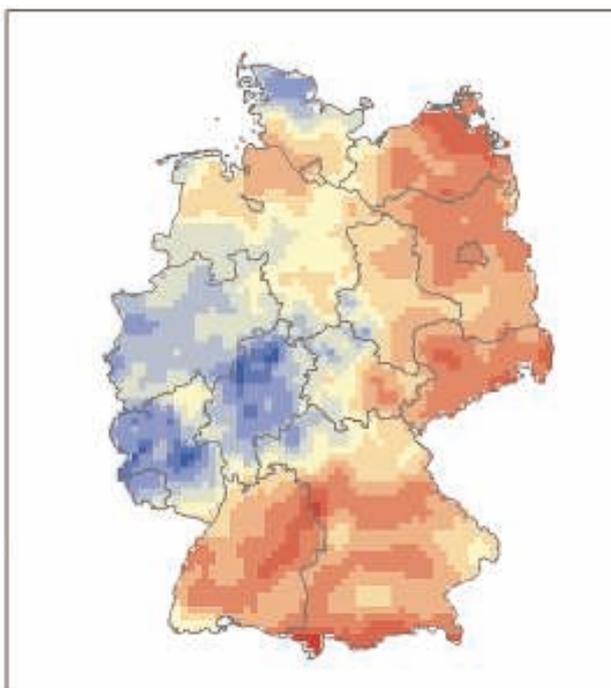


Bild 7. Erhöhung der Jahresmitteltemperatur (2071 bis 2100 zu 1961 bis 1990, SRES B1, Mittel aus zehn Realisationen [18]).



Veränderung der Niederschlagssumme

2100 zu 2000

%

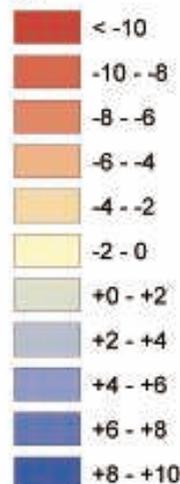


Bild 8. Veränderung der Jahresniederschlagssumme (2071 bis 2100 zu 1961 bis 1990, SRES B1, Mittel aus zehn Realisationen [18]).

Für die Darstellung im Zusammenhang dieser Arbeit wurden das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland und das Gebiet Bayerns (jeweils nur die bewaldete Fläche von 10,5 bzw. 2,4 Mio. ha nach dem CORINE-Landnutzungsdaten [17]) verwendet. Die durch den Klimawandel verursachten erwarteten Veränderungen von Jahresmitteltemperatur und -niederschlagssumme wird in Form der Ergebnisse für das optimistische Emissionsszenario B1 des regionalen Klimamodells WETTREG berücksichtigt [6; 18]. In den **Bildern 7** und **8** sind die Veränderungen dieser beiden Klimaparameter für Deutschland dargestellt. Die Veränderungswerte sind mit den ursprünglichen Daten der Klimakarten (Bilder 1 und 2) verrechnet. Damit erhält man eine weitere Klimahülle mit den Daten des am Ende des Jahrhunderts in Deutschland möglicherweise herrschenden Klimas.

Die Übereinstimmung der Klimahüllen der 16 untersuchten Baumarten mit den jeweiligen Klimahüllen für das gegenwärtige und zukünftige Klima in Deutschland ergibt sich durch Aufsummieren derjenigen einzelnen Häufigkeitswerte innerhalb der 100-%-Klimahüllen Deutschlands, die zugleich in der 95-%-Klimahülle der betrachteten Baumart liegen. In ähnlicher Weise wurden Gewinne und Verluste für warme und kalte Regionen Deutschlands berechnet, wobei eine Trennungslinie von 8,5 °C als häufigster Wert der gegenwärtigen Temperaturverteilung Deutschlands verwendet wurde. Die Berechnungen enthalten stets auf volle Grad gerundete Temperatur- und auf 50 mm gerundete Niederschlagswerte.

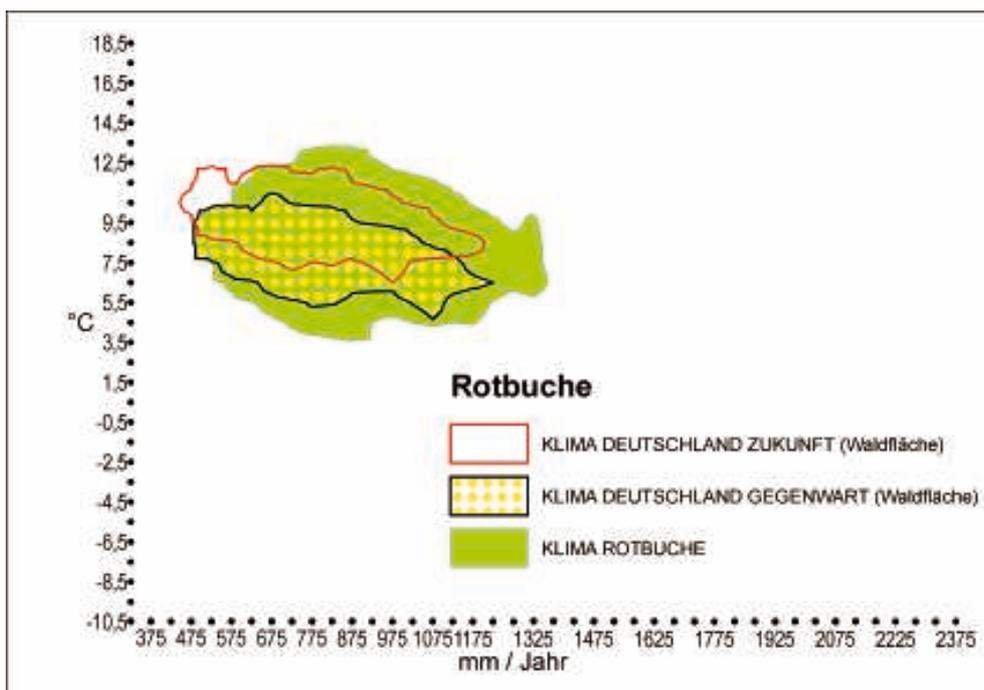


Bild 9. Klimahülle einer Baumart mit mitteleuropäischer Verbreitung (Rotbuche) im Vergleich mit der gegenwärtigen und einer möglichen zukünftigen Klimahülle von Deutschland.

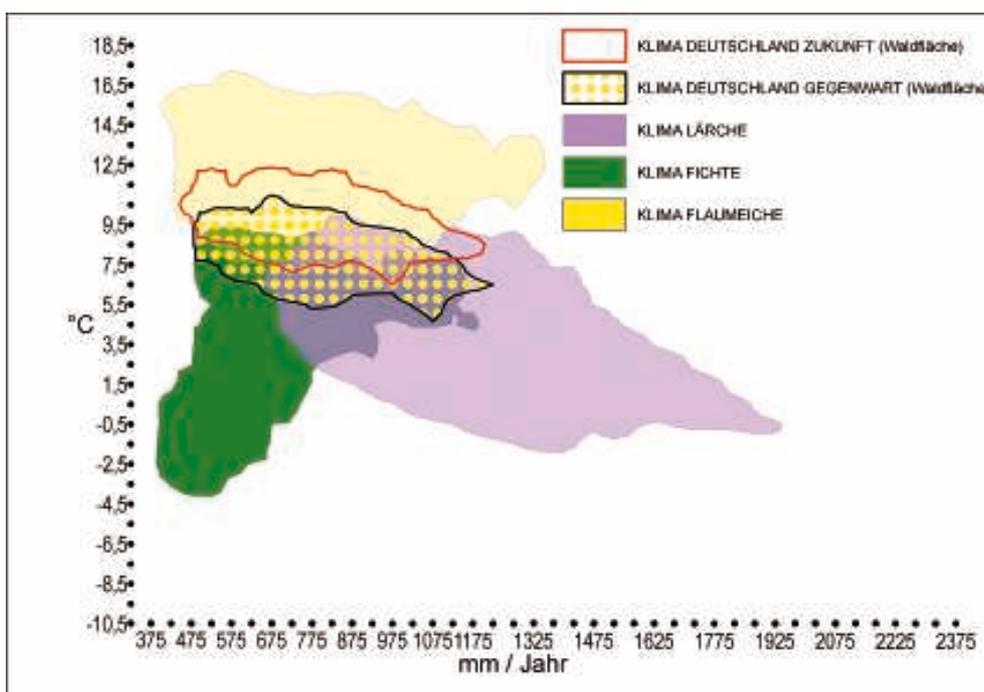


Bild 10. Klimahüllen von Baumarten mit borealer (Fichte), alpischer (Lärche) und submediterranean (Flaumeiche), Verbreitung im Vergleich mit der gegenwärtigen und einer möglichen zukünftigen Klimahülle von Deutschland.

3 Ergebnisse

Die unterschiedliche Anfälligkeit von Baumarten mit verschiedenem Arealcharakter gegenüber dem für das Gebiet Deutschland erwarteten Klimawandel geht aus den **Bildern 9 und 10** hervor. Baumarten mit mitteleuropäischem Verbreitungsschwerpunkt wie die Rotbuche zeigen erwartungsgemäß gegenwärtig eine hervorragende Übereinstimmung der Klimahüllen. Auch nach den erwarteten Veränderungen bleibt die Übereinstimmung häufig hoch, weil die Klimahüllen dieser Baumarten häufig noch ein wenig in den warm-trockenen Bereich ausgreifen. Baumarten mit anderem Verbreitungsschwerpunkt zeigen, wie in Bild 10 demonstriert, weniger Übereinstimmung mit der gegenwärtigen Klimahülle für Deutschland. So ragen die Klimahülle der Fichte

vor allem vom trocken-kalten Flügel, die der Europäischen Lärche vom feucht-kalten Flügel und die der Flaumeiche vom trocken-warmen Flügel der Klimahülle Europas in die gegenwärtige Klimahülle Deutschlands hinein. So verwundert es auch nicht, wenn sich für die beiden erstgenannten Baumarten der Bereich der Übereinstimmung durch den Klimawandel empfindlich verkleinert. Bei der submediterran verbreiteten Flaumeiche hingegen wächst durch die Veränderung des Klimas in Richtung auf warm-trockene Bedingungen die Übereinstimmung der Klimahüllen. Der erste visuelle Eindruck aus der Interpretation des Klimahüllenvergleichs lässt sich durch die Berechnung der Veränderungsflächen weiter objektivieren. Den in **Bild 11** dargestellten Veränderungen der Übereinstimmung zwischen der Klimahülle der Winterlinde und der gegen-

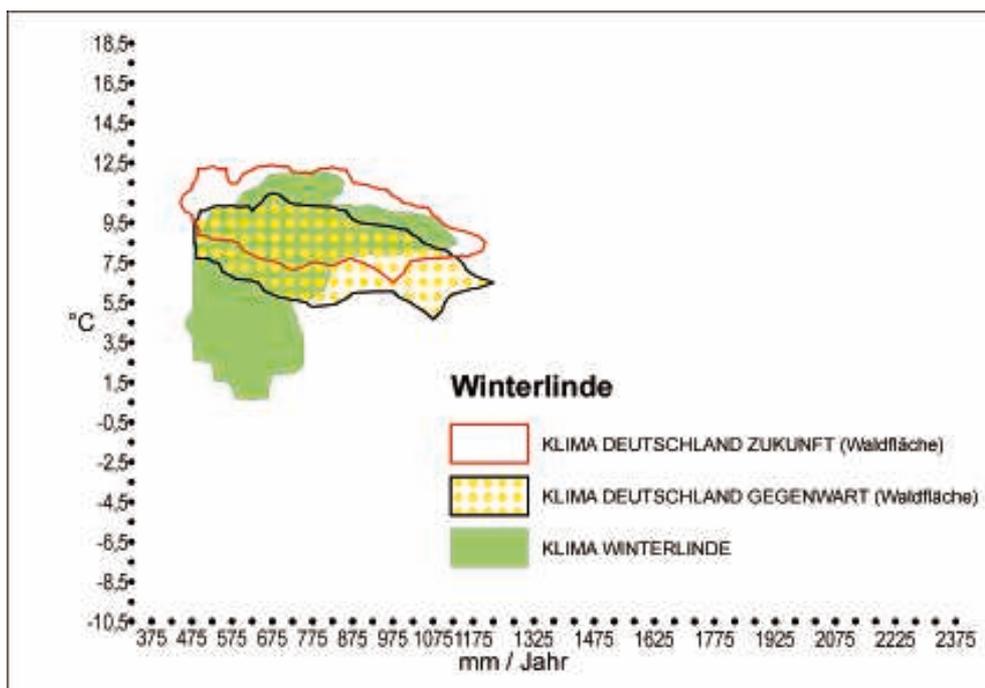


Bild 11. Klimahülle der Winterlinde im Vergleich mit der gegenwärtigen und einer möglichen zukünftigen Klimahülle von Deutschland. In bislang kühl-feuchten Regionen kommt es zur Mehrung der Übereinstimmung von 17 %, in den warm-trockenen Regionen zu einer Minderung um 27 %. Netto sinkt die Übereinstimmung in Deutschland um 10 %.

Tabelle 2. Gewinne und Verluste an Übereinstimmung der Klimahüllen von 16 Waldbaumarten mit einer möglichen Klimahülle Deutschlands nach Klimawandel. In der letzten Spalte zum Vergleich die Nettoverluste und -gewinne für das Gebiet Bayerns.

¹⁾ Klimahülle hergeleitet für das gesamte Gebiet der Küstenherkünfte

²⁾ Klimahülle hergeleitet für die zugelassenen Erntegebiete für den Import ([16], Ruetz, mdl. Mitt. 2007)

Baumart	Gewinne kalte Regionen in %	Verluste, Gewinne warme Regionen in %	Nettoverlust, -gewinn in %	Anfälligkeit	Nettoverlust, -gewinn Bayern in %
<i>Abies alba</i>	0	-36	-36	Hoch	-18
<i>Acer platanoides</i>	6	-10	-4	Gering	9
<i>Acer pseudoplatanus</i>	0	-14	-14	Gering	1
<i>Betula pendula</i>	12	-21	-9	Gering	15
<i>Castanea sativa</i>	6	2	8	Keine	9
<i>Fagus sylvatica</i>	1	-14	-13	Gering	2
<i>Fraxinus excelsior</i>	5	-0	5	Keine	9
<i>Larix decidua</i>	4	-40	-36	Hoch	-51
<i>Picea abies</i>	3	-69	-65	Hoch	-65
<i>Pinus sylvestris</i>	14	-52	-38	Hoch	-37
<i>Pseudotsuga menziesii</i> ¹	0	-12	-12	Gering	0
<i>Pseudotsuga menziesii</i> ²	35	-8	27	Keine	46
<i>Quercus petraea</i>	4	-2	2	Keine	8
<i>Quercus pubescens</i>	23	1	24	Keine	39
<i>Quercus robur</i>	8	-0	8	Keine	13
<i>Tilia cordata</i>	17	-27	-10	Gering	17
<i>Tilia platyphyllos</i>	4	-0	4	Keine	7

wärtigen sowie einer möglichen zukünftigen Klimahülle Deutschlands entsprechen einer Zunahme der Übereinstimmung im feucht-kalten Bereich um 17 % der bewaldeten Landesfläche und einer Verminderung der Übereinstimmung im trocken-warmen Bereich um 27 %. Per Saldo ergibt sich für die Waldfläche Deutschlands von 10,5 Mio. ha ein Nettoverlust an Übereinstimmung von 10 % (105 000 ha). Die in diesem Beispiel an der Winterlinde demonstrierten Maßzahlen sind in Tabelle 2 für alle 16 Baumarten aufgelistet. Sie können als erste Indikatoren für die Anfälligkeit der

Waldbaumarten gegenüber dem Klimawandel interpretiert werden. Die Anfälligkeiten sind auf das gesamte Bundesgebiet bezogen, regional kann es demnach zu abweichenden Beurteilungen kommen. So weist die letzte Spalte der Tabelle 2 die Nettoverluste für die Waldfläche Bayerns aus. Wird beispielsweise für die Weißtanne bundesweit ein Nettoverlust an Übereinstimmung vom 36 % verzeichnet, so beläuft sich der Verlust in Bayern mit seinen abweichenden kühleren Klimaten nur auf die Hälfte (letzte Spalte in Tabelle 2). Anhand der Maßzahlen in Tabelle 2 ist es möglich, die Anfäll-

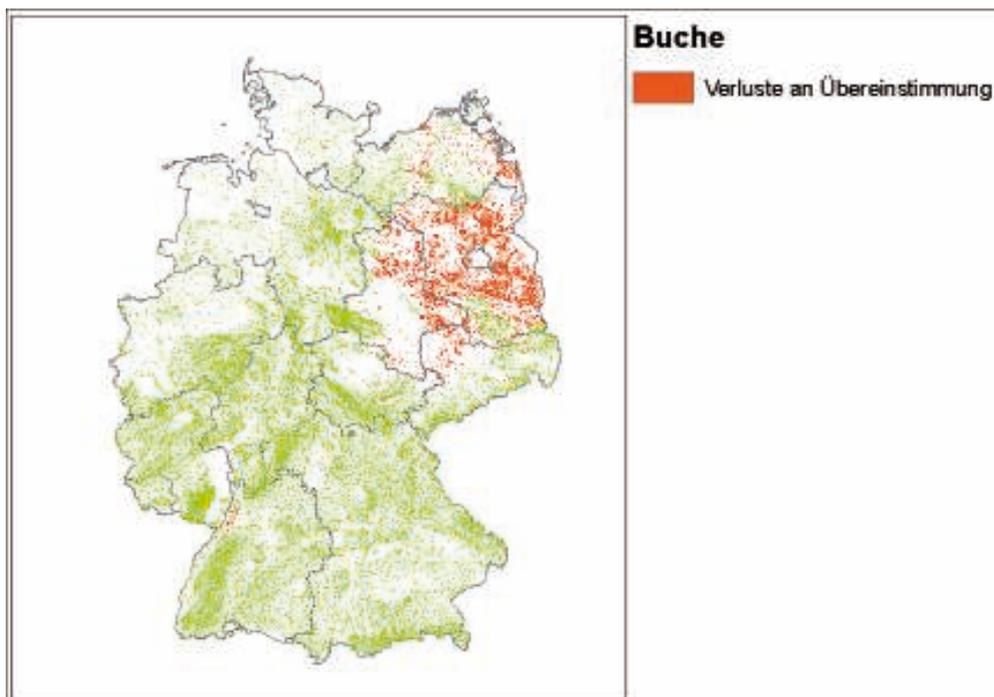


Bild 12. Kartendarstellung der Verluste an Übereinstimmung der Klimahüllen von Rotbuche und Deutschland beim angenommenen Klimaszenario (vgl. Bild 9).

ligkeit der Baumarten grob zu klassifizieren:

(1) Nicht anfällige Baumarten (Nettogewinn an Übereinstimmung): Zu dieser Gruppe zählen die Arten mit submediterrane Verbreitungsschwerpunkt (Esskastanie, Flaumeiche). Ferner die beiden anderen Eichenarten (Trauben- und Stieleiche), die Gemeine Esche und die Sommerlinde. In den kühlen Landesteilen kommt es bei diesen Arten zu Gewinnen an Übereinstimmung, in den warmen Gebieten allenfalls zu geringen (< 2 %) Verlusten. Der Nettogewinn ist demnach stets positiv. Alle genannten nicht anfälligen Arten nehmen in Deutschland weniger als 15 % der Waldfläche ein [19].

(2) Gering anfällige Arten (Nettoverlust an Übereinstimmung < 25 %): Hierzu können die Ahornarten, die Birke, Rotbuche, Douglasie und die Winterlinde gerechnet werden. Die Verluste an Übereinstimmung in den warmen Landesteilen werden durch zum Teil mögliche Gewinne in den kalten Regionen nur teilweise kompensiert. Alle genannten gering anfälligen Arten nehmen in Deutschland weniger als 25 % der Waldfläche ein [19].

(3) Hoch anfällige Arten (Nettoverlust an Übereinstimmung > 25 %): Alle übrigen Arten (Fichte, Waldkiefer, Europäische Lärche und Weißtanne) zeigen zum Teil sehr hohe (bis über zwei Drittel) Nettoverluste an Übereinstimmung mit dem Klima Deutschlands. Es handelt sich bei diesen Baumarten um verbreitete Nadelbaumarten, die man aus wirtschaftlichen Gründen zumeist weit außerhalb ihres natürlichen Verbreitungsgebiets und auch jenseits der im Verbreitungsgebiet herrschenden Klimabedingungen angebaut hat. Alle genannten hoch anfälligen Arten nehmen in Deutschland mehr als 50 % der Waldfläche ein [19].

Die Ergebnisse des Vergleichs der Klimahüllen der Baumarten mit den Klimahüllen Deutschlands in Tabelle 2 lassen sich wieder in Karten zurücktransformieren. Bild 12 zeigt die geografische Lage der Bruttoverluste an Übereinstimmung in Höhe von 14 % bei der Rotbuche. Diese Flächen

sind in den trockenen und relativ warmen Gebieten Ostdeutschlands konzentriert. Im Gebiet Bayerns gehen hingegen weniger als 1 % Übereinstimmungsfläche verloren.

4 Diskussion

Einfache Klimahüllen, die aus den Klimaparametern Jahresdurchschnittstemperatur und -niederschlagssumme gebildet werden, erlauben eine erste Abschätzung der Anfälligkeit der in Deutschland natürlich vorkommenden oder angebaute Baumarten. Die Konstruktion der Klimahüllen aus der in einer hoch aufgelösten Vegetationskarte dargestellten natürlichen Baumartenzusammensetzung ist aber ungewöhnlich. Die bisherigen in der Litera-

tur dargestellten Klimahüllen verwenden stets nicht die potenziellen, sondern die aktuellen Vorkommen aus Forstinventuren oder Florenkartierungen. Die aktuellen Vorkommen sind jedoch besonders in Mitteleuropa stark durch menschliche Einflüsse überprägt, die Baumarten der natürlichen Waldgesellschaft wurden in bestimmten Regionen fast ausgerottet und durch Anbauten gesellschaftsfremder Baumarten ersetzt. Die benutzte Vegetationskarte nach [13] hingegen gibt einen Expertenkonsens über die natürliche Verbreitung der Baumarten wieder und blendet so den menschlichen Einfluss weitgehend aus. Verwendet man für die Konstruktion der Klimahüllen die aktuellen Vorkommen, so erhält man für die aus wirtschaftlichen Gründen angebauten Baumarten etwas ausgreifendere Hüllen, die durch die mit erhöhtem forstlichen Aufwand gesicherten Anbauten im Bereich zwischen physiologischer und ökologischer Anbaugrenze bedingt sind. Leider gibt es für die aktuellen Vorkommen der Baumarten in Europa bislang nur eine sehr unvollkommene Datengrundlage [20], eine Ableitung aus den nationalen Forstinventuren steht noch aus.

Die gewählten grundlegenden Klimaparameter Jahresdurchschnittstemperatur und -niederschlagssumme erlauben einen überregionalen Überblick über die verschiedenen Anfälligkeiten der Baumarten. Weitere Klimaparameter könnte man hinzunehmen, um die klimatischen Ansprüche der verschiedenen Baumarten feiner zu charakterisieren. So würde die Einbeziehung der Temperatur des kältesten Monats die Hüllen vor allem der submediterranen Baumarten stark einschränken, da diese weitgehend auf Frostfreiheit angewiesen sind. Unter den gegenwärtigen Bedingungen ist ihr Anbau wegen der Frostgefährdung in den meisten Landesteilen noch nicht möglich, obwohl die Durchschnittstemperaturen geeignet sind. Andere Baumarten reagieren empfindlich auf Dürreperioden in der Vegetationsperiode, die durch die Jahresdurchschnittswerte nur unvollkommen wiedergegeben werden. Je komplexer aber die für die

Hüllen verwendeten Klimaparameter werden, desto problematischer wird ihre Regionalisierung. Diese ist jedoch nicht nur die Voraussetzung für die kartografische Darstellung von Problemgebieten wie in Bild 12, sondern schon für die Zuordnung von Vorkommen und Klimawerten bei der Erstellung der Klimahüllen.

Die in Tabelle 2 dargestellten Zahlenwerte für Verluste und Gewinne an Übereinstimmung sind wie die Kartendarstellungen in Bild 12 Modellvorstellungen, deren Übersetzung in die Realität nicht unkommentiert vollzogen werden darf. Neben der Unvollständigkeit des klimatologischen Parametersatzes sind auch die Anbaurestriktionen, die sich durch Bodenbeschaffenheit und -wasserhaushalt ergeben, zu beachten. So robust sich z. B. die Esche in unserem Raum gegenüber den Veränderungen des Klimas erweist, so sehr ist ihr Anbau doch an eine überdurchschnittliche Nährstoffversorgung der Böden gebunden, die in Bayern nur auf einem Teil der klimatisch möglichen Anbaufläche gegeben ist. Niederschläge wirken in erste Linie nicht unmittelbar auf die Baumpopulationen, sondern mittelbar über das im Boden gespeicherte Wasser. Berücksichtigt man bei der Konstruktion von Klimahüllen zusätzlich auch den Bodenwasserhaushalt, so dürften die Ergebnisse wesentlich schärfer werden. Weitere Restriktionen, die im Zusammenhang mit Klimahüllen und Arealmodellierung immer wieder genannt werden, gelten im Bereich der Forstwirtschaft aber nicht. Weder gibt es Dispersionshindernisse noch spielt die Konkurrenz der Baumarten eine Rolle als Hindernis bei der Besiedlung klimatisch geeigneter Standorte. Sowohl die Begründung der Bestände als auch die Regelung der zwischenartlichen Konkurrenz können in der Forstwirtschaft relativ leicht bewältigt werden.

Die besonders hohe Anfälligkeit der Fichte wird von verschiedenen Autoren bestätigt [21 bis 24].

5 Schlussfolgerungen

Der Klimawandel wird das Angesicht der Waldlandschaften Deutschlands tiefgreifend verändern, selbst wenn man von einem „milden“ Szenario der Klimaentwicklung ausgeht. Über 50 % der Waldfläche Deutschlands wird von anfälligen Baumarten wie Fichte und Kiefer eingenommen. Man wird die Bestände dieser Baumarten nicht vollständig und vor allem nicht sofort gegen solche aus widerstandsfähigen austauschen können. In Problemgebieten sollte man aber die älteren Reinbestände der anfälligen Baumarten bevorzugt und meist vor Erreichen des geplanten Erntealters umbauen. Dieser klimagerechte Waldumbau ist die wirkungsvollste Anpassungsreaktion gegen die Folgen des Klimawandels [8; 11]. Zusätzlich muss die Elastizität der jüngeren Bestände durch konsequente Pflege verbessert werden.

6 Ausblick

Klimagerechter Waldumbau verlangt nach optimalen Planungsgrundlagen. Diese betreffen zum einen die möglichst genaue Abgrenzung der Ansprüche der Baumarten, wie das mit der Konstruktion von einfachen Klimahüllen ansatzweise versucht wurde. Es gibt hier aber noch einigen Forschungsbedarf, um die Baumartenwahl in der Forstwirtschaft von Gefühlsentscheidungen oder vom Prinzip „Versuch und Irrtum“ zu emanzipieren. Zum anderen besteht Bedarf nach genaueren Karten, die gegenwärtig und zukünftig herrschende Umweltbedingungen in den Wäldern flächenscharf wiedergeben. Sie könnten die Nachfolge der im forstlichen Sektor weitverbreiteten Standortskarten antreten [7]. Die von der Wissenschaft ausgewiesenen „Bäume der Zukunft“ können nur dann an die ihnen zusagenden Standorte gelangen, wenn von Wissenschaft und Praxis gemeinsam erstellte „Karten der Zukunft“ den Waldbesitzern und Förstern den Weg weisen.

Literatur

- [1] *Schmithüsen, J.*: Allgemeine Vegetationsgeographie. 3. Aufl. Berlin: de Gruyter 1968.
- [2] *Woodward, F. I.*: Climate and plant distribution. Cambridge studies in ecology. Cambridge: Cambridge University Press 1987.
- [3] *Box, E. O.*: Macroclimate and plant forms: an introduction to predictive modelling in phytogeography. Tasks for vegetation science 1. The Hague: Dr. W. Junk 1981.
- [4] *Hattemer, H. H.; Bergmann, F.; Ziehe, M.*: Einführung in die Genetik für Studierende der Forstwissenschaft. 2. Aufl. Frankfurt am Main: Sauerländer 1993.
- [5] Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Summary for policy makers. www.ipcc.ch
- [6] Neue Ergebnisse zu regionalen Klimaänderungen. Das statistische Regionalisierungsmodell WETREG. Hintergrundpapier, Umweltbundesamt Dessau, Januar 2007. www.umweltbundesamt.de/uba-info-presse/hintergrund/Regionale-Klimaänderungen.pdf
- [7] *Kölling, C.*: Waldbau im Klimawandel – eine Herausforderung für die Forstliche Standortserkundung. Forstinfo 3 (2006), S. 1-4.
- [8] *Kölling, C.; Ammer, C.*: Waldumbau unter den Vorzeichen des Klimawandels. Zahlen der Bundeswaldinventur zeigen Anpassungsschwerpunkte. AFZ/DerWald 61 (2006), S. 1086-1089.
- [9] *Wohlgemuth, T.; Bugmann, H.; Lischke, H.; Tinner, W.*: Wie rasch ändert sich die Waldvegetation als Folge von raschen Klimaveränderungen? In: Wald und Klimawandel. Forum für Wissen 2006. Hrsg.: Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL, Birmensdorf 2006.
- [10] *Zebisch, M.; Grothmann, T.; Schröter, D.; Hasse, C.; Fritsch, U.; Cramer, W.*: Klimawandel in Deutschland – Vulnerabilität und Anpassungsstrategien klimasensitiver Systeme. Abschlussbericht des Umweltforschungsplans des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Förderkennzeichen (UFOPLAN) 201 41 253. www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-k/2947.pdf
- [11] *Ammer, C.; Dully, I.; Faißt, G.; Immler, T.; Kölling, C.; Marx, N.; Holland-Moritz, H.; Seidl, G.; Seitz, R.; Triebenbacher, C.; Wolf, M.; Wolferstetter, T.*: Hinweise zur waldbaulichen Behandlung von Borkenkäferkalamitätsflächen in Mittelfranken. LWF Wissen 54 (2006), S. 1-60.
- [12] *Hijmans, R. J.; Cameron, S. E.; Parra, J. L.; Jones, P. G.; Jarvis, A.*: Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. Int. J. Climatol. 25 (2005), S. 1965-1978. www.worldclim.org
- [13] *Bohn, U.; Neuhäusl, R.*, unter Mitarbeit von *Hettwer, C.; Gollub, G.; Weber, H.*: Karte der natürlichen Vegetation Europas/Map of the natural vegetation of Europe. Maßstab/Scale 1 : 2 500 000. Teil 1: Erläuterungstext mit CD-ROM; Teil 2: Legende; Teil 3: Karten. Münster: Landwirtschaftsverlag 2000/2003.

- [14] *Pearson, R. G.; Dawson, T.:* Predicting the impacts of climate change on the distribution of species: are bioclimate envelope models useful? *Global Ecol. Biogeogr.* 12 (2003), S. 361-371.
- [15] *Skov, F.; Svenning, J.-C.:* Potential impact of climatic change on the distribution of forest herbs in Europe. *Ecograp.* 27 (2004), S. 366-380.
- [16] *Ruetz, W. F.:* Provenienzforschung bei der Douglasie. *Allg. Forstz.* 44 (1989), S. 563-565.
- [17] CORINE Land Cover. Hrsg.: Umweltbundesamt und DLR-DFD (Rasterdaten von CORINE Land Cover 2000). www.corine.dfd.dlr.de/datadescription_de.html
- [18] *Spekat, A.; Enke, W.; Kreienkamp, F.:* Neuentwicklung von regional hochaufgelösten Wetterlagen für Deutschland und Bereitstellung regionaler Klimaszenarien mit dem Regionalisierungsmodell WETTREG 2005 auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit ECHAM5/MPI – OM T63L31 2010 bis 2100 für die SRES – Szenarien B1, A1B und A2. Projektbericht im Rahmen des F+E-Vorhabens 204 41 138 „Klimauswirkungen und Anpassung in Deutschland – Phase 1: Erstellung regionaler Klimaszenarien für Deutschland“. Mitteilungen des Umweltbundesamtes, Dessau 2007.
- [19] Die zweite Bundeswaldinventur. Der Inventurbericht. Hrsg.: Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz. Berlin 2005.
- [20] *Köble, R.; Seufert, G.:* Novel maps for forest tree species in Europe. Proceedings of the 8th European Symposium on the Physico-Chemical Behaviour of Air Pollutants: „A Changing Atmosphere!“. Turin, Italien, 17. bis 20. September 2001.
- [21] *Asche, N.; Schulz, R.:* Waldstandorte und Klimawandel. Eine Fallstudie für die Eifel in Nordrhein-Westfalen. *AFZ/Der Wald* 61 (2006), S. 587-591.
- [22] *Leitgeb, E.; Englisch, M.:* Klimawandel – Standörtliche Rahmenbedingungen für die Forstwirtschaft. *BFW-Praxisinformation* 10 (2006), S. 9-11.
- [23] *Profft, I.; Seiler, M.; Arenhövel, W.:* Die Zukunft der Fichte in Thüringen vor dem Hintergrund des Klimawandels. *Forst und Holz* 62 (2007), S. 19-25.
- [24] *Sykes, M. T.; Prentice, I. C.:* Boreal Forest futures: Modelling the controls on tree species range limits and transient responses to climate change. *Water Air Soil Poll.* 82 (1995), S. 415-428 .