

KAPITEL 3

Zusammenfassendes Baumartenranking

In diesem Kapitel fassen wir die Literaturumschau systematisch und quantitativ zusammen. Dabei werden 35 der dargestellten Kriterien quantitativ zwischen den Baumarten verglichen, um zu einem Ranking der Baumarten zu kommen. Hierfür wenden wir die Technik der so-nannten multikriteriellen Analyse an.

Untersuchungsansatz

Um die Eignung der präsentierten Baumarten für die Anpassung bewirtschafteter Wälder in Baden-Württemberg an den Klimawandel systematisch zu vergleichen, wurden die im Abschnitt Baumartensteckbriefe dargestellten Eigenschaften in einen numerischen Schlüssel überführt und mit einer multikriteriellen Analyse ausgewertet. Ziel hierbei war die Erarbeitung einer Rangfolge der Arten hinsichtlich ihrer Eignung als Grundlage für die darauf aufbauenden weiteren Untersuchungen gemäß Abbildung 2 (S. 12 [im Vorspann]). Die multikriterielle Analyse ist eine Methode, um komplexe Entscheidungssituationen zu unterstützen. Dabei besteht die Komplexität zumeist aus der Vielzahl möglicher Optionen – in unserem Fall Baumarten – und der Vielzahl der bei dieser Entscheidung zu berücksichtigenden Kriterien. Die multikriterielle Analyse wurde bereits in den Umweltwissenschaften [1, 2], der Nachhaltigkeitsforschung [3] und in forstwissenschaftlichen Untersuchungen [4] angewendet. Für die Anwendung der multikriteriellen Analyse auf die Informationen der Baumartensteckbriefe wurden 37 Kriterien für die 35 dargestellten Baumarten ausgewertet. Hierbei wurden ökologische Kriterien, Aspekte der Holzverwendung und waldbauliche Eigenschaften der 12 heimischen, 9 europaheimischen, 10 außereuropäischen und 2 Hybrid-Baumarten berücksichtigt. Die zu vergleichenden Baumarten sind methodisch als Optionen der multikriteriellen Analyse zu verstehen, und die Ausprägungen der 37 Kriterien werden methodisch als Performanzmaße für diesen Vergleich bezeichnet [5, 6].

Unsere Hypothesen waren dabei, dass (H1) der multikriterielle Ansatz großen Anwendungswert für die Baumartenwahl unter Klimawandel hat, da er zwar durch die Vielzahl der einfließenden Kriterien komplex, aber transparent und reproduzierbar ist. Dies dürfte systematische Verzerrungen im Entscheidungsprozess reduzieren, die z. B. durch subjektive Einschätzungen oder rein monokriterielle Verfahren entstehen könnten. Außerdem (H2) wurde geprüft, ob die alternativen Baumarten in der Baumartenrangfolge systematisch besser als die zwei heutigen Hauptbaumarten Buche (*Fagus sylvatica*) und Fichte (*Picea abies*) abschneiden.

Ablauf der Analyse

Kriterienauswahl

Aus der Gesamtliste der in den Steckbriefen aufgelisteten Kriterien wurden 37 Kriterien für die multikriterielle Analyse ausgewählt (Tabelle 1). Für diese Auswahl war grundlegend, dass das jeweilige Kriterium für die Baumartenwahl im Klimawandel relevant, quantitativ bewertbar und nicht inhaltlich redundant zu anderen Kriterien ist. Für die ausgewählten Kriterien wurde ein Gewicht ermittelt, da nicht alle Kriterien gleiche Bedeutung für die Baumartenwahl im Klimawandel aufweisen. Das Kriteriengewicht wurde mithilfe einer fachübergreifenden Befragung an der FVA hergeleitet, um eine disziplinübergreifende Gewichtung zu erhalten. Zum Zweck der Ergebniszusammenfassung und zur Formulierung der Präferenzszenarien (s. u.) wurden die 37 Kriterien schließlich fünf Kategorien zugeordnet: Anbau, Ertrag, Holzeigenschaften und -verwendung, Ökosystemleistungen, Risiken. Diese fünf Kategorien werden in der methodischen Nomenklatur der multikriteriellen Analyse auch als Zielsysteme bezeichnet, weshalb dieser Begriff im Folgenden weiterverwendet wird. Das Schema der Auswertungsschritte bei der multikriteriellen Analyse ist in Abb. 1 dargestellt.

Punktbewertung und Vollständigkeitswert

Die Bewertungsskala zur Ermittlung des Erfüllungsgrades je Kriterium rangierte von 1, wenn die Baumart das Kriterium bestmöglich erfüllt, bis 5, wenn die Baumart das Kriterium nicht erfüllt. Dabei wurden die Zwischenausprägungen entsprechend der spezifischen Merkmalsausprägung in Tabelle 1 zugeordnet. So wurde beispielsweise beim Kriterium Schattentoleranz der beste Wert 1 vergeben, wenn eine Baumart sehr schattentolerant ist, und der Wert 5 bei Pionierbaumarten. Beim Kriterium Temperatur wurde verglichen, ob die betrachtete Art in ihrem ursprünglichen Verbreitungsgebiet Jahresschnittstemperaturen von 11,5 °C tolerieren kann, denn dies ist die für Baden-Württemberg am Ende des 21. Jahrhunderts erwartete Jahresschnittstemperatur [7]. Arten, die dieses Kriterium erfüllen, erhielten den Wert 1, und Arten, die eine Jahresschnittstemperatur von weniger als 8,4 °C benötigen, wurde der schlechteste Wert 5 zugeordnet. Die Zwischenstufen wurden dann in 1 °C-Stufen zugeordnet. Das Kriterium Invasivitätspotenzial wurde bei heimischen Arten mittelwertneutral entfernt, da es nicht zutreffend ist. Beim Kriterium Ertrag wurde der maximale Wert des durchschnittlichen Gesamtzuwachses bewertet, da der Gesamtzuwachs stark standortsabhängig ist.

In der Kategorie „Holzeigenschaften und Holzverwendung“ wurde die Holzdichte in zweifacher Weise beurteilt. Mittels des Kriteriums „Holzdichte (allgemein)“ wurden die Holzarten entlang des Holzdichte-

gradienten hinsichtlich einer biomassebezogenen Verwendung (Holzenergie, potenzielle Produkte Bioökonomie) beurteilt; Score 1 weist auf eine (bevorzugte) hohe Holzdichte, respektive höhere Biomasse je Volumen, Score 5 auf eine geringe Holzdichte, respektive geringe Biomasse je Volumeneinheit hin. Das Kriterium „Holzdichte (Nadelholz/Laubholz) gewichtet die Holzdichte als zugrunde liegende Kenngröße für eine Verwendungseignung im konstruktiven Bereich. Hierzu wurden die unterschiedlichen Holzdichteniveaus von Nadelholz und Laubholz im Anhalt an die Norm DIN EN 338:2016-07 [8] hinsichtlich den zu erreichenden Festigkeitsklasse zugeordnet, und dann mit dem Scoringsystem klassifiziert (1: sehr hohe Festigkeit zu erwarten, 5: geringe Festigkeit zu erwarten).

Die Zuordnung der Textinformationen aus den Artensteckbriefen zu den jeweiligen Punktwerten wurde durch die AutorInnen Angela de Avila und Axel Albrecht durchgeführt und anschließend zu einem Mittelwert verrechnet. Dieser Mittelwert wurde mit dem Kriteriengewicht (Tabelle 1) multipliziert.

Zur Beurteilung der Verlässlichkeit dieser Bewertung wurde je Baumart die Anzahl von Kriterien mit vorhandenen Literaturinformationen zu einem einfachen Prozentwert verrechnet.

Berücksichtigung individueller Präferenzen von Entscheidungspersonen in Szenarien

Die nach diesen Berechnungsschritten vorliegenden Kriterienwerte wurden auf unterschiedliche Weise zu einem Gesamtwert weiterverrechnet. Die Auswahl von Baumarten zur Anpassung bewirtschafteter Wälder an den Klimawandel muss neben den naturalen Eignungsaspekten auch individuelle Präferenzen von Forstbetrieben und Entscheidungspersonen berücksichtigen. So können beispielsweise Personengruppen mit besonders hoher Präferenz für Risikovermeidung oder mit hoher Präferenz für bestimmte Ökosystemleistungen unterschiedlich berücksichtigt werden. Zu diesem Zweck wurden vier verschiedene exemplarische Präferenzszenarien formuliert, die durch eine höhere Gewichtung bestimmter Kriteriengruppen (syn. Zielsysteme) umgesetzt wurden: Zunächst wurden in Szenario 1 alle fünf Zielsysteme mit je 20 % gleich gewichtet. In Szenario 2 wurde das Zielsystem Risiken mit 40 % stärker und die anderen Zielsysteme proportional geringer gewichtet. Personengruppen, die besonderen Wert auf die Stärkung der Ökosystemleistungen legen, wurden in Szenario 3 berücksichtigt, und schließlich wurden ertragsorientierte Entscheidungspersonen in Szenario 4 berücksichtigt, indem die Zielsysteme Ertrag sowie Holzeigenschaften und -verwendung mit je 30 % stärker gewichtet wurden (Tabelle 2).

Die gewichteten Kriterieneinzelwerte wurden je Baumart und Zielsystem zu einem Mittelwert verrechnet, sodass jede Baumart fünf Zwischenergebniswerte erhält. Unter Anwendung der Szenariengewichte wurden diese fünf Zwischenergebnisse dann zu ge-

wichteten Gesamtmittelwerten weiterberechnet, die später als Gesamteignung bezeichnet werden. Diese Gesamteignung war die Grundlage für die Erstellung des Baumartenrankings. Der Ablauf aller Berechnungsschritte ist in Abb. 1 zusammengefasst.

Tabelle 1: Liste der 37 Kriterien mit ihrem jeweiligen Gewicht (1: hoch; 3: niedrig), der Skala für die Bewertung und Zuordnung zum Zielsystem. Diese Kriterien wurden mit der multikriteriellen Analyse ausgewertet um das Potenzial der Baumarten für die Anpassung an den Klimawandel abzuschätzen.

Kriterium aus den Steckbriefen	Gewicht	Skala für die Bewertung (bestär / höchster Wert: 1; ...; niedrigster Wert: 5)	Zielsystem
1.2. Niederschlag (min)	1,00	Toleranz gegenüber Niederschlagsarmut erwünscht: Niedrigster Wert < 600 mm; 1; 600-700mm: 2; ...; > 949 mm: 5	Risiken
1.2. Temperatur (Jahresdurchschnittstemperatur)	1,33	Toleranz für wärmere Klimate erwünscht (> 11,5 °C möglich: 1; 10,5-11,4 °C: 2; 9,5-10,4°C: 3; 8,5-9,4°C: 4; < 8,5 °C: 5)	Risiken
1.5. Lichtansprüche	1,44	Gute Schattenverträglichkeit? (Schattbaumart: 1; Pionier: 5)	Anbau
1.6.1. Konkurrenzstärke in der Verjüngungs-Dickungsphase	1,22	Hohe Konkurrenzstärke erwünscht (hohe Konkurrenzkraft: 1; ...; niedrige Konkurrenzkraft: 5)	Anbau
1.6.2. Konkurrenzstärke in der Baum- und Altholzphase	1,56	Hohe Konkurrenzkraft erwünscht (hohe Konkurrenzkraft: 1; ...; niedrige Konkurrenzkraft: 5)	Anbau
2.2. Kalttoleranz	1,44	Hohe Toleranz erwünscht (hohe Toleranz: 1; ...; niedrige Toleranz: 5)	Anbau
2.3. pH-Wert	1,67	Große Amplitude erwünscht (5 pH-Wert-Stufen: 1; 4 Stufen: 2; ...; nur pH-Wert > 5: 5)	Anbau
2.4. Tontoleranz	1,50	Hohe Toleranz erwünscht (hohe Toleranz: 1; ...; niedrige Toleranz: 5)	Anbau
2.5. Staunässe- und Grundwassertoleranz	1,56	Hohe Toleranz erwünscht (hohe Toleranz: 1; ...; niedrige Toleranz: 5)	Anbau
2.6. Blattabbau (Streuzersetzung und Nährstoffe)	1,78	Bodenverbessernd?	Anbau
3.1. Naturverfügung	1,38	Gutes Potenzial erwünscht	Anbau
3.2. Baumschule (etabliertes Verfahren?)	1,50	1: Kenntnis vorhanden; 3: Keimfähigkeit bekannt, Verfahren nicht; 5: beides unbekannt	Anbau
3.2. Künstliche Verjüngung	1,67	Gute Kenntnis vorhanden?	Anbau
3.3. Überdauerungszeit des Saatgutes	2,22	Lange Lagerfähigkeit erwünscht (> 3 Jahre: 1; ...; nicht oder nur bis 3 Monate lagerfähig: 5)	Anbau
3.7. Mögliche Mischbaumarten	1,25	Gutes Mischungspotenzial erwünscht (Mischung mit mehreren Arten bekannt: 1; ...; nur eine Mischung bekannt: 3; ...; niedriges Potenzial für Mischung: 5)	Anbau
4.1. Bonitätsfächer	1,75	Kenntnis vorhanden? (Bonitätsfächer: 1; ...; Bestandeshöhenkurven: 3; ...; keine: 5)	Ertrag
4.1. Gesamtwuchsleistung	1,25	dGZ100 auf besten Standorten: >12: 1; 10-12: 2; 8-10: 3; 6-8: 4; <6: 5	Ertrag
4.2. Ökonomische Bedeutung	1,50	Als Wirtschaftsbaumart bekannt oder etablierbar: 1; ...; nur Brennholznutzung: 4; keine wirtschaftliche Nutzung: 5	Ertrag
6.1. Holzdichte (allgemein)	1,78	Hohe Dichte erwünscht (>0,8: 1; 0,6-0,8: 2; 0,5-0,6: 3; 0,4-0,5: 4; <0,4: 5)	Holzeigenschaften und Holzverwendung
6.1.1. Holzdichte (Nadelholz/Laubholz)	1,78	Hohe Dichte erwünscht (Nadelholz:>0,52: 1; 0,48-0,52: 2; 0,48-0,42: 3; 0,4-0,42: 4; <0,4: 5) (Laubholz:>0,79: 1; 0,66-0,79: 2; 0,58-0,65: 3; 0,57-0,58: 4; <0,57: 5)	Holzeigenschaften und -verwendung

Kriterium aus den Steckbriefen	Gewicht	Skala für die Bewertung (bester / höchster Wert: 1; ...; niedrigster Wert: 5)	Zielsystem
6.2. Dauerhaftigkeitsklasse	1,67	Hohe Dauerhaftigkeit erwünscht	Holzeigenschaften und -verwendung
6.3. Konstruktionsbereich (Bauholz, Massivholzwerkstoffe)	1,56	Ausgezeichnete Eigenschaften für zahlreiche Verwendungen: 1; gute Eigenschaften für eine begrenzte Anzahl von Verwendungen: 2; Benutzung nur unter eindeutigen Beschränkungen: 3; Nutzung nur als Ersatz für bessere (geeignete) Holzarten: 4; Keine Verwendung: 5	Holzeigenschaften und -verwendung
6.4. Innenausbau, Möbelbau	1,56	Vielfältige Verwendung erwünscht (> 4 Verwendungen bekannt: 1; 3; 2; ...; keine Verwendungen bekannt: 5)	Holzeigenschaften und -verwendung
6.6. Zellstoff, Papier, Karton	1,78	Gute Eigenschaften erwünscht	Holzeigenschaften und -verwendung
6.7. Energetische Nutzung	1,78	Gute Eigenschaften erwünscht	Holzeigenschaften und -verwendung
7.1. Sonstige Verwendung (z.B. Harz, medizinisch)	2,22	Mehr als 3 bekannt: 1; ...; 3; 2; ...; keine bekannt: 5	Ökosystemleistungen
7.3. Landschaftliche Aspekte (z.B. Ästhetik, Stadtbauineigenschaften, landschaftliche Aspekte)	1,89	Gute Eigenschaften erwünscht	Ökosystemleistungen
7.3. Ökologische Aspekte (z.B. Ressourcen für Fauna, Bodenschutz)	1,50	Mehr als 3 bekannt: 1; 3; 2; ...; keine bekannt: 5	Ökosystemleistungen
8.1. Pilze	1,00	Hohe Resistenz: 1; ...; mehrere Erreger bekannt: 3; ...; bestandesweise Schäden: 5	Risiken
8.2. Insekten	1,00	Hohe Resistenz: 1; ...; mehrere Erreger bekannt: 3; ...; bestandesweise Schäden: 5	Risiken
8.4. Herbivoren / Verbissempfindlichkeit	1,11	Hohe Resistenz erwünscht (hohe Resistenz: 1; ...; hohe Anfälligkeit: 5)	Risiken
8.5. Dürretoleranz	1,00	Hohe Toleranz erwünscht (hohe Toleranz: 1; ...; niedrige Toleranz: 5)	Risiken
8.6. Feueranfälligkeit	1,56	Geringe Anfälligkeit erwünscht (geringe Anfälligkeit: 1; ...; hohe Anfälligkeit: 5)	Risiken
8.7. Frosttoleranz	1,00	Hohe Toleranz erwünscht (hohe Toleranz: 1; ...; juvenile und adulte Pflanzen anfällig: 5)	Risiken
8.8. Sturm anfälligkeit	1,00	Resistenz erwünscht (hohe Resistenz: 1; ...; niedrige Resistenz: 5)	Risiken
8.9. Schneebrauch	1,22	Resistenz erwünscht (hohe Resistenz: 1; ...; niedrige Resistenz: 5)	Risiken
8.10. Invasivitätspotential	1,22	Invasivität unerwünscht (nicht invasiv: 1; invasiv: 5) (Kriterium nicht zutreffend für heimische Arten)	Risiken

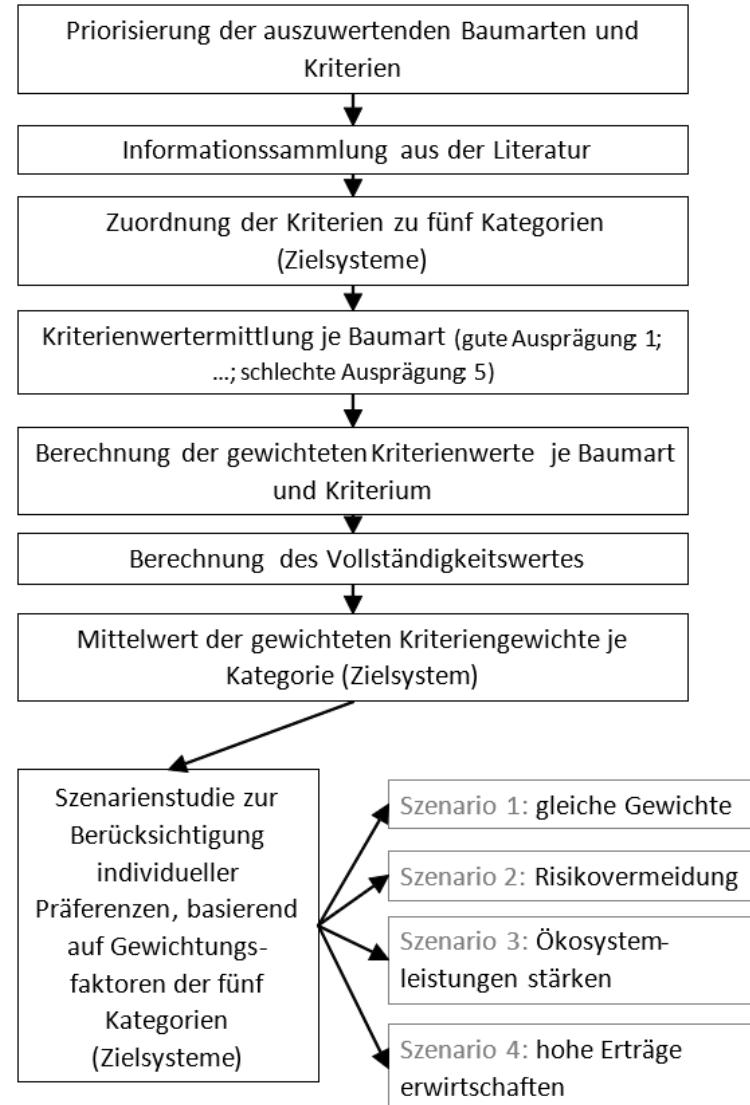


Abb. 1: Schema der Auswertungsschritte bei der multikriteriellen Analyse.

Tabelle 2: Gewichtungsfaktoren der Zielsysteme für die Berechnung der Präferenzszenarien um individuelle Schwerpunktsetzungen zu berücksichtigen.

Zielsystem	Szenario 1: gleiche Gewichte	Szenario 2: Risiken vermeiden	Szenario 3: Ökosystemleistungen stärken	Szenario 4: hohe Erträge erwirtschaften
Anbau	0,2	0,15	0,15	0,13
Ertrag	0,2	0,15	0,15	0,3
Holzeigenschaften und -verwendung	0,2	0,15	0,15	0,3
Ökosystemleistungen	0,2	0,15	0,4	0,13
Risiken	0,2	0,4	0,15	0,13

Ergebnisse

Die Baumartenrankings wiesen nur geringe Unterschiede zwischen den verschiedenen Szenarien auf (Tabelle 3). Unterschiedliche Rangpositionen entstanden dabei durch besonders hohe oder niedrige Werte in einigen der Zielsysteme (Anbau, Ökosystemleistungen, Risiken, Holzeigenschaften und -verwendung, Ertrag). Der niedrigste und damit günstigste Wert betrug 1,5 und wurde für das Zielsystem Ertrag bei den Baumarten *Picea abies*, *Pseudotsuga menziesii*, *Pinus ponderosa* und *Abies nordmanniana* gefunden (Tabelle 3). Der höchste und damit ungünstigste Wert betrug 7,78 für die Baumart *Juglans × intermedia* im Zielsystem Ökosystemleistungen. Die Vollständigkeit der Beurteilungen schwankte zwischen 62 und 100 %, wobei lediglich bei fünf Baumarten zu weniger als 80 % der Kriterien Informationen vorlagen: *Abies bornmülleriana*, *Fagus orientalis*, *Ostrya carpinifolia*, *Quercus frainetto* und *Juglans × intermedia*. Bei 20 Baumarten lagen für über 90 % der Kriterien Informationen vor, und bei fünf Arten waren zu allen Kriterien Informationen vorhanden: *Fagus sylvatica*, *Larix kaempferi*, *Picea abies*, *Pinus nigra* und *Robinia pseudoacacia*.

Von den Referenzbaumarten war *Fagus sylvatica* in allen Szenarien unter den fünf bestplatzierten Baumarten in der Gesamteignung (Tabelle 3). *Picea abies* lag mit den Rangnummern 28, 33 und 32 in den Szenarien 1 bis 3 deutlich im hinteren Bereich. Lediglich im Ertragsszenario 4 lag sie mit Platz 17 im Mittelfeld. Ihren sehr guten Werten im Zielsystem Ertrag standen schlechte Teilergebnisse in den Zielsystemen Ökosystemleistungen (zusammen mit *Ostrya carpinifolia*, *Larix kaempferi* und *Juglans × intermedia*) und Risiken (zusammen mit *Abies bornmülleriana* und *Robinia pseudoacacia*) gegenüber.

In Szenario 1 erreichten bei gleicher Gewichtung der Zielsysteme die Baumarten *Acer pseudoplatanus*, *Carpinus betulus*, *Fagus sylvatica*, *Quercus rubra* und *Ulmus laevis* die fünf besten Plätze (Tabelle 3). In Szenario 2 (Risiken vermeiden) fiel *Quercus rubra* weg und wurde durch *Sorbus torminalis* ersetzt. Bei Betonung der Ökosystemleistungen (Szenario 3) befanden sich nur heimische bzw. europaheimische Arten unter den fünf besten: *Acer pseudoplatanus*, *Betula pendula*, *Castanea sativa*, *Fagus sylvatica* und *Ulmus laevis*. Bei stärkerer Betonung von Ertrag und Holzeigenschaften (Szenario 4) befanden sich die zwei neuen Arten *Pseudotsuga menziesii* und *Pinus nigra* zusammen mit *Castanea sativa*, *Fagus sylvatica* und *Quercus rubra* auf der Liste der fünf bestgeeigneten Arten.

Bei Betrachtung der Top-5-Baumarten über alle Szenarien hinweg zeichneten sich neben *Fagus sylvatica*, die in allen vier Szenarien unter den fünf besten war, *Acer pseudoplatanus* und *Ulmus laevis* mit je drei Erscheinungen aus (Abb. 2). Außerdem erreichten

Quercus rubra, *Castanea sativa* und *Carpinus betulus* mit je zwei Erscheinungen sowie *Sorbus torminalis*, *Pseudotsuga menziesii* var. *menziesii*, *Pinus nigra* und *Betula pendula* mit je einer Erscheinung auch noch eine herausgehobene Stellung.

Auf der Liste der Top-10-Baumarten über alle Szenarien hinweg befinden sich folgende Baumarten: *Abies grandis* (Szenario 4), *Acer pseudoplatanus* (alle Szenarien), *Betula pendula* (Szenarien 1, 2 und 3), *Carpinus betulus* (Szenarien 1, 2 und 3), *Castanea sativa* (alle Szenarien), *Cedrus atlantica* (alle Szenarien), *Corylus colurna* (Szenario 2), *Fagus sylvatica* (alle Szenarien), *Pinus nigra* (Szenario 4), *Populus tremula* (Szenario 3), *Prunus avium* (Szenario 4), *Pseudotsuga menziesii* (Szenarien 1 und 4), *Quercus rubra* (alle Szenarien), *Sorbus torminalis* (Szenarien 1, 2 und 3), und *Ulmus laevis* (alle Szenarien) (Abb. 2). Unter den fünf schlechtestplatzierten Baumarten waren *Juglans × intermedia* (alle Szenarien), *Acer platanoides* (alle Szenarien), *Quercus pubescens* (Szenarien 1, 2 und 4), *Abies bornmülleriana* (Szenarien 1, 2 und 3), *Picea abies* (Szenarien 2 und 3), *Quercus cerris* (Szenarien 1 und 4), *Tilia platyphyllos* und *Larix kaempferi* (in je einem Szenario) (Tabelle 3).

Tabelle 3: Ergebnisse (niedrigere Werte sind besser) je Baumart und Zielsystem und für die vier Präferenzszenarien. Die Vollständigkeit ist in Prozent angegeben. Horizontale Balken geben den Rang an, grüne Häkchen markieren die je Szenario fünf bestplazierten, rote Kreuze die je fünf schlechttestplazierten Baumarten.

Baumart	Zwischenenergebnis						Gesamteignungswert					
	Mittelwert der gewichteten Kriterienwerte je Zielsystem			Vollständigkeit			Szenario 1: gleiche Gewichte		Szenario 2: Risiken vermeiden		Szenario 3: Ökosystemleistungen stärken	
	Anbau	Ertrag	Holzeigenschaften und -verwendung	Ökosystemleistungen	Risiken							
<i>Abies balsamifera</i>	4.14	3.83	4.13	5.39	3.83	68%	4.27	4.16	4.55	4.17		
<i>Abies grandis</i>	2.83	1.71	4.24	5.31	3.18	97%	3.45	3.38	3.91	3.29		
<i>Abies nordmanniana</i>	3.52	1.50	5.16	4.28	3.52	86%	3.59	3.57	3.76	3.50		
<i>Acer platanoides</i>	3.63	5.50	4.78	4.60	2.90	89%	4.28	3.94	4.36	4.57		
<i>Acer pseudoplatanus</i>	2.32	2.58	4.69	1.87	2.70	92%	2.83	2.80	2.59	3.10		
<i>Betula pendula</i>	4.03	3.21	4.11	1.87	2.67	94%	3.18	3.05	2.85	3.34		
<i>Betula pendula</i>	2.26	3.75	4.21	3.37	2.12	97%	3.14	2.89	3.20	3.42		
<i>Carpinus betulus</i>	5.13	2.25	2.97	2.37	3.10	97%	3.16	3.15	2.96	2.98		
<i>Castanea sativa</i>	3.26	3.00	2.79	3.72	3.21	88%	3.20	3.20	3.33	3.09		
<i>Cedrus atlantica</i>												
<i>Cedrus libani</i>	3.71	5.50	2.84	3.49	2.44	92%	3.60	3.31	3.57	3.79		
<i>Corylus colurna</i>	3.18	5.13	3.67	3.19	1.83	84%	3.40	3.01	3.35	3.73		
<i>Fagus orientalis</i>	3.56	4.21	3.42	4.67	2.72	78%	3.72	3.47	3.95	3.75		
<i>Juglans x intermedia</i>	4.19	4.75	6.30	7.78	1.96	62%	5.00	4.24	5.69	5.17		
<i>Juglans nigra</i>	3.77	4.25	3.86	3.50	2.50	86%	3.58	3.31	3.56	3.74		
<i>Larix kaempferi</i>	4.31	1.92	3.13	6.33	3.36	100%	3.81	3.70	4.44	3.38		
<i>Liriodendron tulipifera</i>	3.23	2.33	4.78	5.33	3.38	97%	3.81	3.70	4.19	3.73		
<i>Ostrya carpinifolia</i>	2.98	6.00	2.62	5.49	2.73	65%	3.96	3.65	4.35	4.08		
<i>Platanus x acerifolia</i>	3.88	3.83	3.85	4.60	2.90	86%	3.81	3.59	4.01	3.82		
<i>Pinus nigra</i>	4.03	1.92	2.93	5.11	2.94	100%	3.39	3.28	3.82	3.06		
<i>Pinus ponderosa</i>	5.02	1.50	4.61	5.35	2.81	89%	3.86	3.59	4.23	3.59		
<i>Populus tremula</i>	3.28	2.17	5.35	2.24	3.39	92%	3.28	3.31	3.02	3.44		
<i>Prunus avium</i>	3.62	1.92	3.78	3.73	3.19	92%	3.25	3.23	3.37	3.11		
<i>Pseudotsuga menziesii</i> var. <i>menziesii</i>	4.19	1.50	2.83	3.92	3.52	92%	3.19	3.27	3.37	2.85		
<i>Quercus cerris</i>	4.57	6.42	2.84	4.36	2.91	92%	4.22	3.89	4.26	4.36		
<i>Quercus frainetto</i>	3.51	5.75	2.87	4.60	2.27	73%	3.80	3.42	4.00	3.97		
<i>Quercus pubescens</i>	4.89	7.00	3.65	2.24	3.16	94%	4.19	3.93	3.70	4.57		
<i>Quercus rubra</i>	4.46	2.42	2.97	2.98	2.81	97%	3.13	3.05	3.09	2.98		
<i>Robinia pseudoacacia</i>	3.70	2.75	2.87	4.98	3.99	100%	3.66	3.74	3.99	3.38		
<i>Sorbus terminalis</i>	3.67	2.44	4.82	3.11	2.17	83%	3.24	2.98	3.21	3.37		
<i>Tilia cordata</i>	2.93	3.83	5.40	3.98	2.80	97%	3.79	3.54	3.84	4.06		
<i>Tilia platyphyllos</i>	3.07	6.75	5.13	2.49	2.96	89%	4.08	3.80	3.68	4.70		
<i>Tilia tomentosa</i>	4.00	3.79	5.81	4.23	1.73	81%	3.91	3.37	3.99	4.21		
<i>Ulmus laevis</i>	3.01	4.17	3.78	2.19	1.79	94%	2.99	2.69	2.79	3.31		
<i>Fagus sylvatica</i>	2.91	1.92	3.97	2.19	3.10	100%	2.82	2.89	2.66	2.86		
<i>Picea abies</i>	3.70	1.50	3.81	6.12	4.50	100%	3.93	4.07	4.47	3.50		

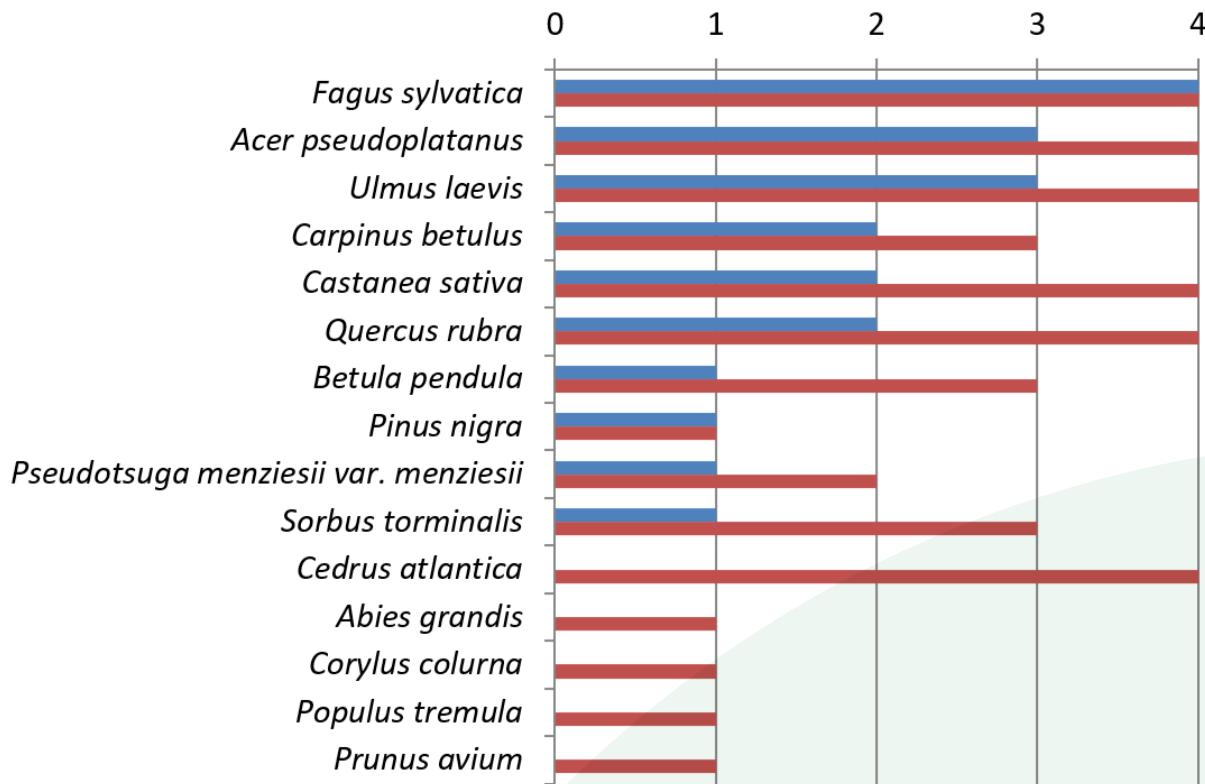


Abb. 2: Häufigkeit des Vorkommens einer Baumart im Ranking der 5 (blau) und 10 (rot) bestplatzierten Arten über alle vier Präferenzszenarien hinweg.

Diskussion

Der multikriterielle Ansatz erwies sich als konsistent im Umgang mit der Komplexität bei der Entscheidungsfindung hinsichtlich der Baumartenwahl zur Anpassung der Waldökosysteme an den Klimawandel. Besonders die Transparenz und systematische Vorgehensweise wirkten überzeugend. Dabei wurde als Endergebnis ein klares Ranking der Baumarten erzielt. Das Baumartenranking unter verschiedenen Präferenzszenarien zeigte die unterschiedlichen Eigenschaften der Baumarten auf und war somit sensitiv gegenüber individuellen Präferenzen von Entscheidungspersonen, obgleich die Ergebnisse zwischen den Szenarien nicht sehr kontrastreich ausfielen. Aufgrund der Vielzahl berücksichtiger Kriterien ist es jedoch nicht möglich, einen einzelnen ausschlaggebenden Grund für eine besonders gute oder schlechte Platzierung einer Baumart zu identifizieren.

Die Ergebnisse zeigten, dass die heimische heutige Referenz-Hauptbaumart *Fagus sylvatica* zusammen mit anderen heimischen Laubbaumarten und *Quercus rubra* eine wichtige Rolle für die Anpassung spielen kann. Ebenso wurde aber aufgrund der sehr schlechten Eignungsschätzung für die heutige Hauptbaumart *Picea abies* die Dringlichkeit deutlich, Alternativbaumarten mit guten Holzverwendungseigenschaften zu identifizieren.

Stärken und Schwächen der multikriteriellen Analyse

Die Anpassung von Wäldern an den Klimawandel muss sich auf Entscheidungen stützen, die unter Unsicherheit getroffen werden. Diese Unsicherheiten gilt es angemessen zu berücksichtigen [9]. Der Vergleich zwischen den Ergebnissen verschiedener Präferenzszenarien ist ein möglicher Weg, um solche Unsicherheiten abzuschätzen. Dabei war insbesondere das Auftreten der gleichen Baumarten in der Top-5-Liste über diese Szenarien hinweg ein Hinweis für eine robuste Entscheidungsfindung [10, 11]. Die Berücksichtigung von Unsicherheit stellt damit eine Stärke des vorgestellten Ansatzes dar.

Zu den Stärken unseres Ansatzes zählt zusätzlich die Zuordnung der Kriterien zu Zielsystemen. Mithilfe dieser Zielsysteme konnten die artspezifischen Potenziale zur Erfüllung bestimmter Ziele klar identifiziert werden. Es war beispielsweise nicht überraschend, dass *Picea abies* ähnlich wie *Pseudotsuga menziesii* die besten Werte im Zielsystem Ertrag erhielt (Tabelle 3). Außerdem verbesserte die systematische Informationssammlung das Verständnis der jeweiligen Artökologie, waldbewirtschaftungsrelevanten Eigenschaften und Verwendungsmöglichkeiten. Bei nicht-heimischen Arten ist aber einschränkend anzumerken, dass die Informationen aus den jeweiligen Herkunftsgebieten nicht direkt nach Baden-Württemberg

bzw. Deutschland übertragen werden können. Bei diesen Arten sind Aspekte von Waldverjüngung und Wachstum zunächst im Rahmen von Testanbauten zu überprüfen. Zuletzt sollten bestehende Informationslücken Hinweise auf weiteren Forschungsbedarf liefern. Diese Lücken könnten durch konzentrierte Informationsbeschaffung geschlossen werden, indem (1) eingeschränkte Zugänglichkeit zu Originalinformationen und Sprachbarrieren überwunden werden, und (2) neue Forschungsprojekte initiiert werden.

Eine wesentliche Schwäche dieses Ansatzes ist, dass der Anteil von Kriterien ohne verfügbare Literaturinformationen das Endergebnis beeinflusst. So erhielt beispielsweise *Picea abies* im Zielsystem Holzeigenschaften und -verwendung ein ungünstigeres Zwischenergebnis als *Fagus orientalis*, *Ostrya carpinifolia* oder *Quercus frainetto*, bei denen zu einigen Kriterien dieses Zielsystems keine Literaturinformationen verfügbar waren. Eine Bestrafung dieses Informationsmangels wirkte sich nur auf den Verlässlichkeitswert aus, nicht aber auf den Eignungswert. Folglich müssen die Gesamteignungsergebnisse im Zusammenhang mit dem Verlässlichkeitswert und vorsichtig interpretiert werden. Unter ähnlichem Vorbehalt ist beispielsweise auch die ungünstige Platzierung von *Juglans × intermedia* zu sehen: nach derzeitigem Wissens- bzw. Publikationsstand wird dieser Art eine geringe Gesamteignung zugeschrieben, allerdings liegen für diese Beurteilung Informationen lediglich für 62 % der Kriterien vor. Aus dieser Wissenslücke leitet sich großer Forschungsbedarf ab.

Unter Berücksichtigung der Stärken und Schwächen schlussfolgern wir, dass die multikriterielle Analyse ein sehr hilfreiches Werkzeug bei der Entscheidungsfindung der Baumartenwahl darstellt und bestätigen unsere Hypothese 1.

Denkbare Baumarten für den Waldumbau

***Fagus sylvatica* zeigt hohe Eignung in allen Szenarien**

Fagus sylvatica wurde zusammen mit *Picea abies* ausgewählt, um für die Alternativbaumarten eine Referenz zu den etablierten heutigen Hauptbaumarten zu erhalten. Dabei fiel auf, dass *F. sylvatica* als einzige Art in allen vier Szenarien unter den fünf bestplatzierten Baumarten lag. Dieses Ergebnis widerspricht bezüglich *F. sylvatica* unserer ursprünglichen Hypothese (H2), dass die Alternativbaumarten eine bessere Gesamteignung aufweisen als die heutigen Hauptbaumarten. Das Potenzial, auch unter dem Klimawandel Hauptbaumart zu bleiben, wird tatsächlich stark durch die klimatischen Veränderungen bedingt werden. Einige Studien haben Arealverschiebungen nach Norden und in höhere Lagen [12-14],

zunehmende Mortalität an der südlichen Arealgrenze sowie abnehmendes Durchmesserwachstum an der östlichen Verbreitungsgrenze unter dem Klimawandel projiziert [15]. In Baden-Württemberg wurden bereits seit den 1980er Jahren in niedrigeren Lagen abnehmende Grundflächenzuwächse beobachtet, die zeitlich mit steigenden Temperaturen zusammenfielen. In höheren Berglagen wurden jedoch keine Zuwachsreduktionen beobachtet [16]. Zusätzlich könnte die mithilfe umfassender, mehrkriterieller Modellstudien abgeschätzte Eignung von *Fagus sylvatica* als führende Baumart bis zum Ende des 21. Jahrhunderts in Baden-Württemberg erheblich sinken [17]. Dieser Widerspruch zu den Ergebnissen unserer multikriteriellen Literaturstudie ist möglicherweise dadurch erklärbar, dass unsere Studie nicht nur Kriterien der klimatischen Eignung, sondern ein deutlich breiteres Spektrum an Kriterien beinhaltet.

In unseren Ergebnissen wurde die Vulnerabilität von *F. sylvatica* gegenüber dem Klimawandel in Szenario 4 (Risiken vermeiden) systematisch erfasst, wobei *F. sylvatica* aufgrund ihrer hohen Sensitivität gegenüber Dürre [18, 19] an dritter Stelle rangierte. Diese Sensitivität könnte sich negativ auf ihre Konkurrenzkraft und Zuwachsleistung auswirken [20]. Allerdings können angepasste Durchforstungsmaßnahmen die negativen Effekte abmildern, wie in einem Buchenbestand in Baden-Württemberg explizit untersucht wurde [21]. Außerdem könnte die Erhaltung von *F. sylvatica* in Waldökosystemen unter Klimawandel durch ihre genotypische und ökotypische Diversität gefördert werden [22-24]. Effekte dieses Selbsterhaltungsvermögens wurden bislang auf Landesebene wegen fehlender Modelle und Ansätze nicht methodisch berücksichtigt. So ist das hydraulische System von *F. sylvatica* Beständen an der südlichen Verbreitungsgrenze beispielsweise deutlich durreressisterenter als an der nördlichen Verbreitungsgrenze [25]. Folglich sollten die Potenziale angepasster Bewirtschaftungsmaßnahmen und genetischer Herkunftswahl umfangreicher untersucht werden, um die wichtigen ökologischen und ökonomischen Funktionen und die Erhaltung von *F. sylvatica* sicherzustellen.

Schlechte Platzierung von *Picea abies* und potenziell alternativer Nadelbaumarten

Das schlechte Abschneiden von *P. abies* in drei der vier Szenarien bestätigt unsere zweite Hypothese für diese Art und stimmt überein mit Befunden anderer Studien, die dieser Art eine mangelnde Angepasstheit an zukünftige Bedingungen für mehrere europäische Waldökosysteme bescheinigen [13, 26]. Nennenswert war das schlechte Ergebnis in Szenario-2 (Risiken vermeiden), was auf (1) die hohe Sturmschadensanfälligkeit [27, 28], (2) mittlere bis hohe Dürreanfälligkeit, auch mit zunehmendem Alter [27], und (3) das hohe Borkenkäferbefallsrisiko in Zusammenhang mit Dürrestress zurückzuführen ist [29, 30]. Aus diesen klaren Befunden leitet sich der dringende Bedarf ab,

einen adäquaten Ersatz für *P. abies* und ihr Holz zu finden, welches für den mitteleuropäischen Holzmarkt und damit für Forstbetriebe von zentraler ökonomischer Bedeutung ist [31].

Von den geprüften Nadelbaumarten erzielten *Pseudotsuga menziesii*, *Cedrus atlantica*, *Pinus nigra* und *Abies grandis* je mindestens eine Platzierung in der Top-10-Liste (Abb. 2). *Pseudotsuga menziesii* und *Pinus nigra* waren die einzigen Nadelbaumarten, die mit Platz 1 bzw. Platz 5 eine Platzierung in der Top-5-Liste für das Szenario-4 (hohe Erträge erwirtschaften) erreichte. Ihre lediglich mittlere Platzierung für die Szenarien 1 bis 3 legt jedoch nahe, dass diese Arten eine breite Präferenzartikulation und nicht-ertragsorientierte Präferenzen nur bedingt befriedigen können. Obwohl einige Studien *P. menziesii* als sehr gute Alternative zu *P. abies* in Europa propagieren, gibt es tatsächlich noch erhebliche Wissenslücken, zu welchem Grad sie an die zukünftigen klimatischen Bedingungen in Mitteleuropa angepasst oder anpassungsfähig ist und welche Herkünfte am besten hierfür geeignet sind [32, 33]. Es wurde aufgezeigt, dass die Zunahme von sommerlicher Dürre das Wachstum und die Vitalität von *P. menziesii* erheblich beeinträchtigen kann [34]. Aus diesen und anderen Gründen wird häufig empfohlen, diese Art hauptsächlich in Mischung anzubauen [35], und die Suche nach weiteren alternativen (Nadel-)Baumarten sollte weitergeführt werden. *Pinus nigra* könnte ihr Areal unter dem Klimawandel nordwärts ausdehnen [36], allerdings deuten Ergebnisse aus Süddeutschland darauf hin, dass Dürre und Frosttoleranz [37] als auch das Wachstumspotenzial allgemein [37, 38] stark von der Herkunft abhängig sind. Mit gewissen Abstrichen könnten auch *Abies grandis* und *Cedrus atlantica* aussichtsreiche Alternativbaumarten darstellen. Diese Befunde unterstreichen die Notwendigkeit, die Suche nach alternativen (Nadel-)Baumarten und Herkünften intensiviert fortzuführen.

Einheimische Arten erzielten systematisch gute Platzierungen

Die heimischen Arten *Acer pseudoplatanus*, *Carpinus betulus*, *Castanea sativa* und *Ulmus laevis* folgten *F. sylvatica* in der Top-5-Liste über alle Szenarien hinweg. *A. pseudoplatanus* und *U. laevis* bedienen dabei besonders Ansprüche zur Vermeidung von Risiken und Stärkung der Ökosystemleistungen. Beide Arten weisen eine geringe Anfälligkeit gegenüber Sturm- und Frostschäden und *U. laevis* eine bemerkenswerte Dürretoleranz auf (Tabelle 4). Außerdem stellen diese heimischen Arten für viele andere Arten einen Lebensraum und eine Nahrungsgrundlage dar [39- 42]. Zusätzlich tauchten sie unter der Top-10-Liste im ertragsorientierten Szenario 4 auf, was ihr Potenzial zur Erfüllung multipler Funktionen bei der Anpassung von Wäldern an den Klimawandel unterstreicht. Spezifisch bei *A. pseudoplatanus* besteht jedoch weiterer Forschungsbedarf hinsichtlich waldbaulicher und anderer Managementfragen, obwohl diese Art

bereits heute als wertvolle Art in der Forstwirtschaft gilt [43]. *U. laevis* ist eine Schlüsselart in Auwäldern [44, 45] und wird mutmaßlich von den zukünftigen klimatischen Bedingungen profitieren, indem sie ihr Verbreitungsgebiet vergrößern und erhöhte Zuwächse liefern könnte [13]. Jedoch sollte die weitere Entwicklung des Ulmensterbens beobachtet werden [46]. *U. laevis* wird zwar derzeit als unattraktiv für die Insektenvektoren dieser aggressiven Pathogene betrachtet. Jedoch könnten sich diese Bedingungen mit dem Klimawandel und weiteren Umweltinteraktionen ändern [45]. Letztlich könnten beide heimischen Arten eine wichtige Rolle für die Anpassung der Wälder an den Klimawandel zur Erhaltung der ökologischen Waldfunktionen spielen.

C. betulus erfüllt bereits heute wichtige ökologische und auch ökonomische Funktionen in Wäldern, und es liegt umfangreiches Wissen über wachstumskundliche Grundlagen und die waldbauliche Behandlung dieser Baumart, z. B. in Nordostdeutschland, vor [47]. Zusätzlich könnte die Art eine Schlüsselrolle für die Anpassung der Wälder übernehmen, da ihr generell geringe störungsbedingte Mortalitätsrisiken zugeschrieben werden (Tabelle 3). Besonders die hohe Sturmfestigkeit [48] und Dürretoleranz [49] zeichnen diese Art aus, obwohl vereinzelt auch über Dürreempfindlichkeit berichtet wurde [48]. In drei Szenarien trat *C. sativa* in der Top-5-Liste auf. Nur in Szenario 2 (Risiken vermeiden) schnitt sie schlechter ab. Dieses zu erwartende Ergebnis ist überwiegend der hochgefährlichen, weitverbreiteten und schadenbringenden Pilzerkrankung Kastanienrindenkrebs zuzuordnen [50, 51], allerdings spielt auch die durch *Phytophthora cinnamomi* verursachte Tintenkrankheit eine Rolle [52, 53]. Obwohl *C. sativa* aufgrund ihrer Vielseitigkeit und hohen ökonomischen Leistungsfähigkeit im mediterranen Raum und einigen mitteleuropäischen Gebieten bereits etabliert ist [46] und sich ihr Verbreitungsgebiet unter dem Klimawandel weiter ausdehnen könnte [13], sollte ihr zusätzlicher Anbau vorsichtig geplant und beobachtet werden, damit eine weitere Ausbreitung der Krankheiten und damit die Mortalität und assoziierte finanzielle Risiken verhindert werden können.

***Quercus rubra* und seltene heimische Laubbaumarten zeigen gute Ergebnisse**

Die nicht-heimische Art *Q. rubra* wurde in allen vier Szenarien auf der Liste der Top-10 platziert und erscheint damit als aussichtsreiche und vielversprechende Baumart für den Klima-Waldumbau. Einige andere Arbeiten bestätigen ebenfalls ein großes Potenzial dieser Art und identifizieren sie sogar als mögliche Alternativbaumart für Bereiche, in denen die Eignung von *P. abies* und *F. sylvatica* im Klimawandel abnimmt [13, 54]. Die recht dürretolerante Baumart wird in Europa bereits seit vielen Jahrzehnten angebaut [54, 55] und könnte unter wärmeren Klimabedingungen ihre natürliche Produktivität erhöhen [13]. Außerdem hat die nicht-heimische Baumart

das Potenzial zur Erfüllung von Ökosystemleistungen wie z. B. als Nahrungsquelle für Tierarten [56]. Allerdings sollten ihr Invasivitätspotenzial und mögliche negative Auswirkungen auf die heimische Flora und Ökosysteme vorsichtig evaluiert und berücksichtigt werden [54, 57, 58].

Neben den vorgenannten, besonders gut geeigneten erscheinenden Baumarten traten weitere Laubbaumarten auf den Top-10-Listen der verschiedenen Szenarien auf: *Betula pendula*, *Corylus colurna*, *Sorbus torminalis*, *Populus tremula* und *Prunus avium*, die Schwerpunkte bei der Vermeidung von Risiken und bei der Stärkung der Ökosystemleistungen aufweisen (die in den Top-10-Listen vorkommenden Nadelbaumarten wurden bereits oben erwähnt). Diese Befunde unterstreichen die Wichtigkeit dieser heimischen Arten für die Erhaltung diverser und resilenter Ökosysteme. So ist beispielsweise *P. tremula* eine Schlüsselart mit extrem breiter ökologischer Toleranz, die Holz verschiedener Verwendungen von Zellstoff bis Furnier bereitstellen kann [59]. Sie wird jedoch alsdürreempfindlich eingestuft [60]. Die anderen Laubholzarten werden als Edellaubhölzer klassifiziert [46], jedoch wurde *B. pendula* [61-63] alsdürreempfindlich eingestuft. *P. avium* weist hingegen eine ausgesprochene Dürretoleranz auf [64, 65] und könnte von wärmeren Klimabedingungen profitieren [13], ähnlich wie die Baumart *S. torminalis*, die ebenfalls hohe Dürretoleranz und -resilienz aufweist [66-68]. Die europaheimische Art *C. colurna* weist hervorragende Holzeigenschaften auf und könnte zur Stabilisierung und Anpassung der Wälder im Klimawandel beitragen [69, 70]. Die klimatische Eignung dieser Alternativbaumarten sollte aufgrund ihrer Bedeutung für die Erfüllung multipler Ökosystemfunktionen im Klimawandel weiter untersucht werden.

Castanea sativa, *Populus tremula*, *Prunus avium*, *Sorbus torminalis* und *Ulmus laevis*. Auch die nicht-heimische *Quercus rubra* zählte zu den aussichtsreichen Alternativbaumarten. Jedoch offenbarten unsere Ergebnisse einen substantiellen Mangel an Alternativbaumarten für *Picea abies*, die zukünftig die stärksten Eignungsverluste erfahren dürfte. *Pseudotsuga menziesii* wird zwar häufig als Alternative diskutiert, erfüllt allerdings überwiegend ertragsorientierte Funktionen. Unsere Ergebnisse liefern somit einen ersten orientierenden Überblick über mögliche Kandidatenbaumarten und auch über vorhandene Wissenslücken. Weitere Studien sollten folglich die Eignung der klimatischen Nische der Baumarten näher untersuchen und Anbauerfahrungen mit diesen Arten sammeln.

Neben dem systematischen Schließen von Wissenslücken bei den bereits berücksichtigten Arten kann unser Ansatz durch eine Erweiterung auf zusätzliche Arten weiter verbessert werden. Letztlich sollten unsere Ergebnisse als dynamischer Prozess verstanden werden, die sich im Laufe der Zeit durch verbesserte Informationen und erweiterte Artenlisten verändern können [71].

Der von uns präsentierte Ansatz basiert ausschließlich auf veröffentlichten Literaturinformationen. Um letzten Endes abgesicherte, wissenschaftlich fundierte und standortsspezifische Empfehlungen zur Baumartenwahl im Klimawandel aussprechen zu können, fehlen noch viele weitere Arbeiten. Die in unserer Studie am besten eingestuften Baumarten sollten als nächstes hinsichtlich der Zukunftsfähigkeit ihrer großräumigen ökologischen Nische mithilfe von Artverbreitungsmodellen überprüft werden. In einem weiteren Schritt sollten die dann weiterhin aussichtsreichen Kandidatenbaumarten, für die nur geringe oder noch keine Anbauerfahrungen in Baden-Württemberg vorliegen, in Versuchsanbauten für die Gewinnung erster Anbauerfahrungen getestet werden (vgl. Abb. 2, S. 12 [im Vorspann]). Insofern sind die von uns vorgestellten Ergebnisse der multikriteriellen Analyse lediglich als erster Schritt auf der Suche nach geeigneten Alternativbaumarten zu betrachten. Zu guter Letzt darf nicht außen vor bleiben, dass trotz simultaner Berücksichtigung mehrerer Methoden, Evaluierungen und Ansätze immer ein Restrisiko bei der Einführung und Förderung von Alternativbaumarten verbleiben wird. Drei wichtige Beispiele für dieses Risiko sind, dass (1) die Interaktionen dieser Arten mit der vor Ort vorhandenen Flora (und Fauna), (2) die Veränderungen der Konkurrenzverhältnisse und (3) die Entwicklungsdynamik heimischer und nichtheimischer Pathogene schwierig und nicht vollständig abschätzbar sind.

Schlussfolgerungen

Die Methode der systematisch literaturbasierten multikriteriellen Analyse erwies sich als praktikabel, um das generelle Potenzial von Baumarten für die Anpassung an den Klimawandel zu prüfen. Sie erscheint als vielversprechende Methode für eine grobe Vorauswahl bei einer großen Anzahl an Auswahloptionen. Die Ergebnisse legen nahe, dass *Fagus sylvatica* als weitverbreitete und heimische Baumart großes Potenzial für die Anpassung der Wälder an den Klimawandel aufweist, wenn man als Methode die literaturbasierte multikriterielle Analyse anwendet. Zusätzlich wurden zahlreiche heimische Laubbaumarten, die heute lediglich geringe Anteile in bewirtschafteten Wäldern aufweisen, als aussichtsreiche Alternativbaumarten identifiziert. Hierzu gehören *Acer pseudoplatanus*, *Betula pendula*, *Carpinus betulus*,

Top-10-Listen der Baumarten mit und ohne Schwerpunktsetzungen

Zur Ergänzung der präsentierten Ergebnisse werden noch Ranglisten der je Szenario besten 10 Baumarten dargestellt.

Rangziffer	Szenario 1 - gleiche Gewichte	Szenario 2 - Risiken vermeiden
1	<i>Fagus sylvatica</i>	<i>Ulmus laevis</i>
2	<i>Acer pseudoplatanus</i>	<i>Acer pseudoplatanus</i>
3	<i>Ulmus laevis</i>	<i>Fagus sylvatica</i>
4	<i>Quercus rubra</i>	<i>Carpinus betulus</i>
5	<i>Carpinus betulus</i>	<i>Sorbus torminalis</i>
6	<i>Castanea sativa</i>	<i>Corylus colurna</i>
7	<i>Betula pendula</i>	<i>Quercus rubra</i>
8	<i>Pseudotsuga menziesii</i> var. <i>menziesii</i>	<i>Betula pendula</i>
9	<i>Cedrus atlantica</i>	<i>Castanea sativa</i>
10	<i>Sorbus torminalis</i>	<i>Cedrus atlantica</i>

Rangziffer	Szenario 3 - Ökosystemleistungen stärken	Szenario 4 - hohe Erträge
1	<i>Acer pseudoplatanus</i>	<i>Pseudotsuga menziesii</i> var. <i>menziesii</i>
2	<i>Fagus sylvatica</i>	<i>Fagus sylvatica</i>
3	<i>Ulmus laevis</i>	<i>Castanea sativa</i>
4	<i>Betula pendula</i>	<i>Quercus rubra</i>
5	<i>Castanea sativa</i>	<i>Pinus nigra</i>
6	<i>Populus tremula</i>	<i>Cedrus atlantica</i>
7	<i>Quercus rubra</i>	<i>Acer pseudoplatanus</i>
8	<i>Carpinus betulus</i>	<i>Prunus avium</i>
9	<i>Sorbus torminalis</i>	<i>Abies grandis</i>
10	<i>Cedrus atlantica</i>	<i>Ulmus laevis</i>

Tabelle 4a: Kriterienwertermittlung je Baumart für jedes Kriterium (Mittelwert zwischen den Bewertungen durch die AutorInnen Angela de Avila und Axel Albrecht -Für Kriterium 6.1.1 - Bewertung von Angela de Avila und Franka Brüchert). Die Orientierung/Anleitung und Skala für die Bewertung (gute Ausprägung: 1; ...; schlechte Ausprägung: 5) werden in Tabelle 1 beschrieben.

Kriterium aus den Steckbriefen		Wertung									
Wertung	Wertung	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1.2. Niederschlag (min)	Platanus x acerifolia	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1.2. Temperatur (Jahresdurchschnittstemperatur)	Cedrus atlantica	2,5	4,5	2	4	3,5	4	3	2,5	2	1
1.5. Lichtansprüche	Corlus colurna	3	4	5	6	7	8	9	10	10	10
1.6.1. Konkurrenzstärke in der Verjüngungs-Dickungsphase	Abies nordmanniana	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1.6.2. Konkurrenzstärke in der Baum- und Altholzphase	Sorbus torminalis	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2.2. Kalktoleranz	Ostrya carpinifolia	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2.3. pH-Wert	Pinus ponderosa	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2.4. Tontoleranz	Carpinus betulus	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2.5. Staunässe- und Grundwassertoleranz	Abies borisii-reginae	1,5	4	5	4,5	3,5	4,5	5	6	7	8
2.6. Blattabbau (Streuzersetzung und Nährstoffe)	Castanea sativa	5	1	1,5	2	2,5	3	4	5	6	7
3.1. Naturverfügung	Quercus pubescens	3	1,5	1	2	4	4,5	5	6	7	8
3.2. Baumschule (etabliertes Verfahren?)	Quercus rubra	1,5	1	1	3	1	1	1	1	1	1
3.2. Künstliche Verjüngung	Populus tremula	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3.3. Überdauerungszeit des Saatgutes	Ulmus laevis	1,5		3	2	3	4	5	6	7	8
3.7. Mögliche Mischbaumarten	Tilia platyphyllos	5	2	1	2	2,5	3	4	5	6	7
4.1. Bonitätsfächer	Acer pseudoplatanus	5	1	5	1,5	2	3	4	5	6	7
4.1. Gesamtwuchsleistung	Fagus orientalis	1	4	1	1	1	1	1	1	1	1
4.2. Ökonomische Bedeutung	Fagus sylvatica	1,5	1	1	2,5	1,5	1	1,5	1	1	1

Kriterium aus den Steckbriefen	6.1. Holzdichte (allgemein)	2	3	2,5	4	2	1	1,5	4	1	3	4	2	1	3	4	2	3	2	3	4	2	
	6.1.1 Holzdichte (Nadelholz/Laubholz)	3	1	3	4	3	2	1	1	3	1	2	5	2	3	5	1	1	3	2	5	2	
	6.2. Dauerhaftigkeitsklasse (Bauholz, Massivholzwerkstoffe)	5	1,5		1	5	1	5	3	4	1	1	5	3,5	4,5	5	4	1	4	5	3	5	
	6.3. Konstruktionsbereich (Bauholz, Massivholzwerkstoffe)	1		1	1		1		5	1	1,5	1	1	1			2	1	4,5	3	1	3,5	
	6.4. Innenausbau, Möbelbau	1,5	2,5	2	2	1	1	4	4	1	3	1	3	4	2,5	1	3	2	1	1	1	3,5	
	6.6. Zellstoff, Papier, Karton	1	1		1	1,5			1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2		1	
	6.7. Energetische Nutzung	1	1,5	1	2,5	4	1	1	2	1	1	1,5	1	1	1,5	1	1	2	1	1	1,5	1	
	7.1. Sonstige Verwendung (z.B. Harz, medizinisch)	3	2,5	1	3,5	1	2	2,5	1,5	1,5	3	3	3	1	2,5	2,5	3	5	3	2,5	1	1,5	
	7.3. Landschaftliche Aspekte (z.B. Ästhetik, Stadtbäumeigenschaften, landschaftliche Aspekte)	1	1	1,5		1	1	3	1	2	2	1	1,5	1	1	2	1	1	2	4	1,5	1	
	7.3. Ökologische Aspekte (z.B. Ressourcen für Fauna, Bodenschutz)	3,5	3	2	2	2	3,5	1	3	2	4	3,5	3	1	4	3,5	3,5	2	2,5	3	3,5	1	1
Platanus x acerifolia	8.1. Pilze	5	2,5	2,5	1,5	5	2	4	5	3	2,5	4	3,5	2	2,5	3,5	2	3	2,5	2	2	3,5	
	8.2. Insekten	3	3	2,5	2,5	3	1,5	2	4	4	2	3,5	2,5	3	3	3,5	3,5	2	4	2,5	3	2,5	3,5
	8.4. Herbivoren / Verbissemplindlichkeit	2	2,5	4	5	4,5	5	4,5	3	5	4	5	5	2	4	5	4,5	5	3,5	3	2,5	5	3,5
	8.5. Dürretoleranz	2	4	1	1	4	1,5	2,5	1,5	1	1	5	2	1	2,5	4	1	1,5	2	1	3,5	4	
	8.6. Feueranfälligkeit	3,5			5	1			5	1		3	3	5	5	1	5	4,5	4	1	1,5	1	
	8.7. Frosttoleranz	1	4	1,5	4,5	5	2,5	4,5	3	1	3,5	1,5	4	1	3,5	4,5	1	2,5	2,5	3	4,5	1	
	8.8. Sturm anfälligkeit	1	2,5	1		2	1	1,5	1,5	1,5	1	1	1,5	1,5	1	1	1,5	5	2	2	1	1	
	8.9. Schneebrech	4,5	1						5	1,5	3	4	3	5	2	3	1	5	2	5	3	1	
	8.10. Invasivitätspotenzial	5		1,5							1	1,5	2	3	3	1	1,5	3,5	3	1	1,5	1	

Tabelle 4b: Gewichtete Kriterienwerte [höchste Werte sind günstiger] je Baumart und Kriterium. Das Gewicht für jedes Kriterium wird in Tabelle 1 beschrieben.

Kriterium aus den Steckbriefen	<i>Padinaus x acerifolia</i>	<i>Corylus colurna</i>	<i>Castanea sativa</i>	<i>Sorbus torminalis</i>	<i>Ostrya carpinifolia</i>	<i>Pinus ponderosa</i>	<i>Quercus pubescens</i>	<i>Larix kaempferi</i>	<i>Abies grandis</i>	<i>Abies nordmanniana</i>	<i>Robinia pseudoacacia</i>	<i>Prunus avium</i>	<i>Tilia cordata</i>	<i>Quercus cerris</i>	<i>Liquidambar styracifolia</i>	<i>Ulmus laevis</i>	<i>Tilia platyphyllos</i>	<i>Populus tremula</i>	<i>Quercus rubra</i>	
1.2. Niederschlag (min)	1,0	1,0	4,0	1,0	2,0	1,0	1,0	4,0	3,0	2,0	3,5	1,0	1,0	2,5	1,0	1,0	2,0	1,0	1,0	3,0
1.2. Temperatur (Jahresdurchschnittstemperatur)	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	6,0	5,3	1,3	2,7	1,3	1,3	4,7	1,3	2,0	1,3	1,3	1,3	1,3
1.5. Lichtansprüche	7,2	5,1	2,9	1,4	7,2	5,8	4,3	7,2	4,3	2,2	7,2	1,4	7,2	2,9	7,2	5,1	4,3	4,3	2,2	7,2
1.6.1. Konkurrenzstärke in der Verjüngungs-Dickungsphase	3,1	5,5	2,4	4,9	1,2	4,3	4,9	5,5	5,5	1,2	1,8	2,4	5,5	3,7	4,9	2,4	2,4	5,5	2,4	1,2
1.6.2. Konkurrenzstärke in der Baum- und Altholzphase	7,8	6,2	6,2	6,2	5,4	7,8	5,4	3,9	7,0	1,6	7,0	2,3	7,8	7,0	7,0	1,6	5,4	1,6	3,1	5,4
2.2. Kalktoleranz	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	2,9	1,4	7,2	1,4	2,2	1,4	2,9	2,2	2,2	4,3	5,8	2,9	5,1
2.3. pH-Wert	1,7	3,3	8,3	5,0	7,5	2,5	3,3	5,0	3,3	4,2	4,2	7,5	1,7	5,0	5,8	8,3	5,8	6,7	7,5	6,7
2.4. Tontoleranz	1,5	1,5	6,8	1,5	6,8	6,0	3,0	6,8	2,3	6,8	6,8	7,5	1,5	7,5	1,5	2,3	7,5	5,3	6,8	1,5
2.5. Staubässse- und Grundwassertoleranz	2,3	6,2	7,8	6,2	7,0	5,4	7,0	7,8	3,1	7,8	3,9	3,1	7,0	6,2	7,0	7,0	5,4	7,8	3,9	7,0
2.6. Blattabbau (Streuzersetzung und Nährstoffe)	8,9	1,8	2,7	1,8	2,7	8,9	1,8	8,9	4,4			1,8	3,6	5,3	1,8	1,8	3,6	2,7	2,7	8,9
3.1. Naturverfügung	4,1	2,1	1,4	2,8	5,5	6,2	0,7	3,4	6,9	1,4	2,1	2,1	1,4	2,1	2,1	4,5	2,1	3,4	2,1	3,4
3.2. Baumschule (etabliertes Verfahren?)	2,3	1,5	4,5	1,5	2,3	1,5	1,5	3,8	1,5	1,5	4,5	1,5	3,0	1,5	3,8	1,5	1,5	1,5	1,5	2,3
3.2. Künstliche Verjüngung	1,7	1,7	5,8	1,7	1,7	8,3	1,7	1,7	8,3	1,7	3,3	6,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7
3.3. Überdauerungszeit des Saatgutes	2,2	3,3		6,7	4,4	6,7	2,2	2,2	2,2	3,3	2,2	2,2	4,4	2,2	3,3	2,2	3,3	2,2	2,2	4,4
3.7. Mögliche Mischbaumarten	6,3	2,5	1,3	2,5	3,1	1,3	1,3	1,9	1,3	1,9	2,5	2,5	1,9	1,3	1,3	1,3	1,3	1,9	1,9	1,3
4.1. Bonitätsfächer	8,8	1,8	8,8	1,8	2,6	8,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	3,5	8,8	1,8	1,8	7,0	6,1	6,1	1,8
4.1. Gesamtwuchsleistung	1,3	5,0	1,3	1,3	6,3	1,3	5,0	2,5	1,9	6,3	1,3	5,0	5,6	2,5	3,8	6,3	2,5	3,8	5,0	4,4
4.2. Ökonomische Bedeutung	1,5	2,3	1,5	1,5	3,8	2,3	6,0	6,0	1,5	4,5	1,5	1,5	2,3	2,3	1,5	6,0	6,0	1,5	2,3	3,0
6.1. Holzdichte (allgemein)	3,6	5,3	4,4	7,1	3,6	1,8	2,7	7,1	1,8	5,3	7,1	3,6	5,3	1,8	5,3	3,6	7,1	5,3	3,6	7,1

Kriterium aus den Steckbriefen										
6.1.1 Holzähnliche (Nadelholz/Laubholz)	5,3	1,8	5,3	7,1	5,3	3,6	1,8	5,3	1,8	5,3
6.2. Dauerhaftigkeitsklasse	8,3	2,5		1,7	8,3	1,7	8,3	5,0	6,7	1,7
6.3. Konstruktionsbereich (Bauholz, Massivholzwerkstoffe)	1,6		1,6		1,6	7,8	1,6	2,3	1,6	1,6
6.4. Innenausbau, Möbelbau	2,3	3,9	3,1	1,6	1,6	6,2	4,7	4,7	4,7	3,1
6.6. Zellstoff, Papier, Karton	1,8	1,8		1,8	2,7		1,8	1,8	1,8	
6.7. Energetische Nutzung	1,8	2,7	1,8	4,4	7,1	1,8	3,6	1,8	2,7	1,8
7.1. Sonstige Verwendung (z.B. Harz, medizinisch)	6,7	5,6	2,2	7,8	2,2	4,4	5,6	3,3	11,1	7,8
7.3. Landschaftliche Aspekte (z.B. Ästhetik, Stadtbaumeigenschaften, landschaftliche Aspekte)	1,9	1,9	2,8		1,9	5,7	1,9	3,8	1,9	1,9
7.3. Ökologische Aspekte (z.B. Ressourcen für Fauna, Bodenschutz)	5,3		4,5	3,0	3,0	3,0	5,3	1,5	6,0	5,3
8.1. Pilze	5,0	2,5	1,5	5,0	2,0	4,0	5,0	2,5	4,0	3,5
8.2. Insekten	3,0	3,0	2,5	3,0	1,5	2,0	4,0	2,0	3,5	2,0
8.4. Herbivoren / Verbisempfindlichkeit	2,2	2,8	4,4	5,6	5,0	5,6	5,0	4,4	5,6	3,9
8.5. Dürretoleranz	2,0	4,0	1,0	4,0	1,5	2,5	1,0	1,0	1,5	2,0
8.6. Feueranfälligkeit	5,4		7,8	1,6		7,8	1,6	4,7	7,8	7,0
8.7. Frosttoleranz	1,0	4,0	1,5	4,5	5,0	2,5	4,5	1,0	3,5	4,5
8.8. Sturmempfindlichkeit	1,0	2,5	1,0	2,0	1,0	1,5	1,5	1,0	1,0	1,5
8.9. Schneedebruch	5,5	1,2				6,1	1,8	3,7	6,1	2,4
8.10. Invasivitätspotenzial	6,1		1,8			1,2	1,8	2,4	3,7	1,2

Literatur

- [1] KIKER, G.A., et al. (2005): Application of multi-criteria decision analysis in environmental decision making. *Integrated Environmental Assessment and Management: An International Journal*. 1(2): S. 95-108.
- [2] HUANG, I.B., et al. (2011): Multi-criteria decision analysis in environmental sciences: Ten years of applications and trends. *Science of the total environment*. 409(19): S. 3578-3594.
- [3] CINELLI, M., et al. (2014): Analysis of the potentials of multi criteria decision analysis methods to conduct sustainability assessment. *Ecological indicators*. 46: S. 138-148.
- [4] BECK, S.M. (2011): Partizipative Planungsinstrumente für eine nachhaltige und multifunktionale Waldbewirtschaftung: vergleichende Anwendung und Nutzerevaluation des analytisch hierarchischen Prozesses und der Nutzwertanalyse. in *Forstliche Versuchs- und Forschungsanst. Baden-Württemberg, Abt. Forstökonomie Albert-Ludwigs Freiburg Universität*. 154 S.
- [5] BELTON, V. und STEWART, T. (2003): *Multiple criteria decision analysis*. Boston: Springer Science & Business Media.
- [6] ZIMMERMANN, H.-J. und GUTSCHE, L. (1991): *Multi-Criteria Analyse: Einführung in die Theorie der Entscheidungen bei Mehrfachzielsetzungen*. Springer.
- [7] LUBW. (2013): Zukünftige Klimaentwicklung in Baden-Württemberg, unter: <https://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/klimawandel-und-anpassung/temperatur> [Stand: 10.06.2021].
- [8] ANONYMUS. (2016): EN 338: 2016-07, Bauholz für tragende Zwecke – Festigkeitsklassen.
- [9] PETR, M., et al. (2014): An uncertainty assessment framework for forest planning adaptation to climate change. *Forest Policy and Economics*. 41: S. 1-11.
- [10] SYAMSUDDIN, I. (2013): Multicriteria evaluation and sensitivity analysis on information security. *International Journal of Computer Applications*. 69(24): S. 22-25.
- [11] RADKE, N., et al. (2017): Adopting robust decision-making to forest management under climate change. *Annals of forest science*. 74(2): S. 43.
- [12] DYDERSKI, M.K., et al. (2018): How much does climate change threaten European forest tree species distributions? *Global change biology*. 24(3): S. 1150-1163.
- [13] THURM, E.A., et al. (2018): Alternative tree species under climate warming in managed European forests. *Forest Ecology and Management*. 430: S. 485-497.
- [14] FALK, W. und HEMPELMANN, N. (2013): Species favourability shift in europe due to climate change: a case study for *Fagus sylvatica* L. and *Picea abies* (L.) Karst. based on an ensemble of climate models. *Journal of Climatology*. 2013.
- [15] GÁRATE-ESCAMILLA, H., et al. (2019): Range-

wide variation in local adaptation and phenotypic plasticity of fitness-related traits in *Fagus sylvatica* and their implications under climate change. *Global Ecology and Biogeography*. 28(9): S. 1336-1350.

[16] KOHNLE, U., et al. (2014): Zuwachstrends im Spiegel langfristiger Versuchsflächen in Südwestdeutschland. *Allg. Forst- u. J.-Ztg.* 185(5/6): S. 97-117.

[17] ALBRECHT, A., et al. (2019): Baumarteneignung 2.0 und Vulnerabilitätskarten - Konzept und landesweite Hauptergebnisse. *FVA-einblick*. 23(2): S. 9-14.

[18] BETSCH, P., et al. (2011): Drought effects on water relations in beech: The contribution of exchangeable water reservoirs. *Agricultural and Forest Meteorology*. 151(5): S. 531-543.

[19] HENTSCHEL, R., et al. (2015): Stomatal conductance and intrinsic water use efficiency in the drought year 2003: a case study of European beech. *Trees*. 30(1): S. 153-174.

[20] GEßLER, A., et al. (2007): Potential risks for European beech (*Fagus sylvatica* L.) in a changing climate. *Trees*. 21(1): S. 1-11.

[21] DIACONU, D., et al. (2017): Thinning increases drought tolerance of European beech: a case study on two forested slopes on opposite sides of a valley. *European Journal of Forest Research*. 136(2): S. 319-328.

[22] PLUESS, A.R. und WEBER, P. (2012): Drought-adaptation potential in *Fagus sylvatica*: linking moisture availability with genetic diversity and dendrochronology. *PLoS One*. 7(3): S. e33636.

[23] KNUTZEN, F., et al. (2015): Does reduced precipitation trigger physiological and morphological drought adaptations in European beech (*Fagus sylvatica* L.)? Comparing provenances across a precipitation gradient. *Tree physiology*. 35(9): S. 949-963.

[24] VARSAMIS, G., et al. (2019): Adaptive diversity of beech seedlings under climate change scenarios. *Frontiers in plant science*. 9: S. 1918.

[25] STOJNIC, S., et al. (2018): Variation in xylem vulnerability to embolism in European beech from geographically marginal populations. *Tree Physiol*. 38(2): S. 173-185.

[26] KÖLLING, C., et al. (2009): Überlegungen zum Risiko des Fichtenanbaus in Deutschland vor dem Hintergrund des Klimawandels. *forstarchiv*. 80(2): S. 42-54.

[27] ELLENBERG, H. und LEUSCHNER, C. (2010): *Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen: in ökologischer, dynamischer und historischer Sicht*. Bd. 8104. UtbS.

[28] ALBRECHT, A., et al. (2013): Storm damage of Douglas-fir unexpectedly high compared to Norway spruce. *Annals of Forest Science*. 70(2): S. 195-207.

[29] NETHERER, S., et al. (2015): Do water-limiting conditions predispose Norway spruce to bark beetle attack? *New Phytologist*. 205(3): S. 1128-1141.

[30] NETHERER, S., et al. (2019): Acute drought is an important driver of bark beetle infestation in Austrian Norway spruce stands. *Frontiers in Forests and Global Change*. 2: S. 39.

[31] KNOKE, T. (2017): *Betriebswirtschaftliche*

- Chancen und Risiken der Fichtenwirtschaft im Klimawandel. LWF-Wissen. 80: S. 139-144.
- [32] KNOOK, J. und HANEWINKEL, M. (2019): Economics of growing Douglas-fir. In: SPIECKER, H., LINDNER, M., und SCHULER, J., (Hrsg.) Douglas-fir - an option for Europe. cost (European Cooperation in Science and Technology). S. 99-104.
- [33] NICOLESCU, V.-N. (2019): Natural range, site requirements and shade tolerance. In: SPIECKER, H., LINDNER, M., und SCHULER, J., (Hrsg.) Douglas-fir - an option for Europe. cost (European Cooperation in Science and Technology). S. 33-72.
- [34] BASTIEN, J.-C. (2019): Potential of Douglas-fir under climate change. In: SPIECKER, H., LINDNER, M., und SCHULER, J., (Hrsg.) Douglas-fir - an option for Europe. cost (European Cooperation in Science and Technology). S. 33-72.
- [35] THURM, E.A., et al. (2017): Mixed stands of Douglas-fir and European beech compared to pure stands. 200 ed. Forstliche Forschungsberichte München. Freising: Technische Universität München. 184 S.
- [36] ENESCU, C.M., et al. (2016): *Pinus nigra* in Europe: distribution, habitat, usage and threats, In: European Atlas of Forest Tree Species, SAN-MIGUEL-AYANZ, J., DE RIGO, D., CAUDULLO, G., HOUSTON DURRANT, T., und MAURI, A., (Hrsg.) Publ. Off. EU: Luxembourg. e015138+.
- [37] HUBER, G.Š., MUHIDIN (2016): Die Schwarzkiefer – eine Alternative für warm-trockene Regionen: Erste Ergebnisse des bayerischen Herkunftsversuchs bestätigen Trockenresistenz. LWF-aktuell. 3: S. 4.
- [38] ŠEHO, M., et al. (2010): Wachstumsanalysen von vier Schwarzkiefer-Provenienzen (*Pinus nigra*) auf trockenen Standorten in Baden-Württemberg. Allgemeine Forst und Jagdzeitung. 181(5/6): S. 104-116.
- [39] SCHMIDT, O. (2009): Der Bergahorn als Lebensraum für Tiere. in LWF Wissen Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft: Freising. S. 36-40.
- [40] FALTL, W., et al. (2019): Die (Flatter-)Ulme im Bayerischen Staatswald. in LWF-Wissen Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft: Freising. S. 43-48.
- [41] THURM, E.A., et al. (2019): Die Flatterulme als Alternative bei der Baumartenwahl: Standorts- und Leistungspotenzial. in LWF Wissen Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft: Freising. S. 31-42.
- [42] BROSINGER, F. und SCHMIDT, O. (2009): Der Bergahorn in Bayern. in LWF Wissen Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft: Freising. S. 19-23.
- [43] HEIN, S., et al. (2009): A review of growth and stand dynamics of *Acer pseudoplatanus* L. in Europe: implications for silviculture. Forestry. 82(4): S. 361-385.
- [44] MACKENTHUN, G. (2004): The role of *Ulmus laevis* in German floodplain landscapes. Forest Systems. 13(1): S. 55-63.
- [45] MARTÍN, J.A., et al. (2019): Breeding and scientific advances in the fight against Dutch elm disease: Will they allow the use of elms in forest restoration? New Forests. 50(2): S. 183-215.
- [46] ERIKSSON, G. (2001): Conservation of noble hardwoods in Europe. Canadian Journal of Forest Research. 31(4): S. 577-587.
- [47] LOCKOW, K.-W. und LOCKOW, J. (2009): Die Hainbuche im nordostdeutschen Tiefland - Wuchsverhalten und Bewirtschaftungshinweise. Eberswalder Forstliche Schriftenreihe. Bd. 41. Ministerium für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Verbraucherschutz (MLUV) des Landes Brandenburg. 130 S.
- [48] MAYER, H. (1992): Waldbau auf soziologisch-ökologischer Grundlage. Stuttgart: Gustav Fischer Verlag. 522 S.
- [49] GULDER, H.-J. (1996): Das Wurzelwerk der Hainbuche. In: SCHMIDT, O., (Hrsg.) Beiträge zur Hainbuche. Freising: LWF. S. 26-32.
- [50] RIGLING, D. und PROSPERO, S. (2018): *Cryphonectria parasitica*, the causal agent of chestnut blight: invasion history, population biology and disease control. Molecular Plant Pathology. 19(1): S. 7-20.
- [51] PÉREZ-SIERRA, A., et al. (2019): High vegetative compatibility diversity of *Cryphonectria parasitica* infecting sweet chestnut (*Castanea sativa*) in Britain indicates multiple pathogen introductions. Plant Pathology. 68(4): S. 727-737.
- [52] SANTOS, C., et al. (2017): First interspecific genetic linkage map for *Castanea sativa* x *Castanea crenata* revealed QTLs for resistance to *Phytophthora cinnamomi*. PLoS One. 12(9): S. e0184381.
- [53] ČERNÝ, K., et al. (2008): *Phytophthora cambivora* causing ink disease of sweet chestnut recorded in the Czech Republic. Czech Mycology. 60(2): S. 265-274.
- [54] DYDERSKI, M.K., et al. (2020): Biological Flora of the British Isles: *Quercus rubra*. Journal of Ecology. 108(3): S. 1199-1225.
- [55] NICOLESCU, V.-N., et al. (2020): Ecology and management of northern red oak (*Quercus rubra* L. syn. *Q. borealis* F. Michx.) in Europe: a review. Forestry: An International Journal of Forest Research. 93(4): S. 481-494.
- [56] BIEBERICH, J., et al. (2016): Acorns of introduced *Quercus rubra* are neglected by European Jay but spread by mice. Annals of Forest Research. 59(2): S. 249-258.
- [57] VOR, T. (2005): Natural regeneration of *Quercus rubra* L. (red oak) in Germany. Biological invasions – from ecology to control. Neoziota. 6: S. 111-123.
- [58] STANEK, M. und STEFANOWICZ, A.M. (2019): Invasive *Quercus rubra* negatively affected soil microbial communities relative to native *Quercus robur* in a semi-natural forest. Science of the Total Environment. 696: S. 133977.
- [59] CAUDULLO, G. und DE RIGO, D. (2016): *Populus tremula* in Europe: distribution, habitat, usage and threats. European Atlas of Forest Tree Species. Publ. Off. EU, Luxembourg, pp. e01f148. S.
- [60] MACKENZIE, N. (2010): Ecology, conservation and management of Aspen: A Literature Review. Scottish Native Woods (Aberfeldy). 40 S.

- [61] ATKINSON, M. (1992): *Betula pendula* Roth (B. *verrucosa* Ehrh.) and *B. pubescens* Ehrh. Journal of Ecology. 80(4): S. 837-870.
- [62] BECK, P., et al. (2016): *Betula pendula*, *Betula pubescens* and other birches in Europe: distribution, habitat, usage and threats, In: European Atlas of Forest Tree Species, SAN-MIGUEL-AYANZ, J., DE RIGO, D., CAUDULLO, G., HOUSTON DURRANT, T., und MAURI, A., (Hrsg.) Publ. Off. EU: Luxembourg. e010226+.
- [63] ROLOFF, A. und PIETZARKA, U. (2014): *Betula pendula* Roth. In: ROLOFF, A., WEISGERBER, H., LANG, U.M., und STIMM, B., (Hrsg.) Enzyklopädie der Holzgewächse: Handbuch und Atlas der Dendrologie. S. 1-16.
- [64] SCHMID, T. (2014): *Prunus avium* Linné. In: ROLOFF, A., WEISGERBER, H., LANG, U.M., und STIMM, B., (Hrsg.) Enzyklopädie der Holzgewächse: Handbuch und Atlas der Dendrologie. S. 1-16.
- [65] GONIN, P., et al. (2013): Autecology of broad-leaved species. Paris: Institut pour le Développement Forestier. 64 S.
- [66] PIETZARKA, U., et al. (2014): *Sorbus torminalis* (L.) Crantz. In: ROLOFF, A., WEISGERBER, H., LANG, U.M., und STIMM, B., (Hrsg.) Enzyklopädie der Holzgewächse: Handbuch und Atlas der Dendrologie. S. 1-16.
- [67] WELK, E., et al. (2016): *Sorbus torminalis* in Europe: distribution, habitat, usage and threats, In: European Atlas of Forest Tree Species, SAN-MIGUEL-AYANZ, J., DE RIGO, D., CAUDULLO, G., HOUSTON DURRANT, T., und MAURI, A., (Hrsg.) Publ. Off. EU: Luxembourg. e01090d+.
- [68] KUNZ, J., et al. (2016): Effects of drought and rewetting on growth and gas exchange of minor European broadleaved tree species. Forests. 7(10): S. 239.
- [69] TEMEL, F., et al. (2017): Status of natural Turkish hazel (*Corylus colurna* L.) populations in Turkey. Journal of Forestry Faculty. 18(1): S. 1-9.
- [70] VON WUEHLISCH, G. (2016): The Significance of Gene Conservation of Peripheral Tree Species, Examples for *Corylus colurna* and *Fagus sylvatica*. in Marginal and peripheral tree populations: a key genetic resource for European forests Cost Action Arezzo, Italy. 26 S.
- [71] ALBRECHT, A.T. und DE AVILA, A.L. (2019): Ein Vorschlag zur literaturbasierten Ermittlung möglicher Alternativbaumarten im Klimawandel am Beispiel der Artensteckbriefe in Baden-Württemberg. Allg. Forst- u. J.-Ztg. 189(7/8): S. 129-143.