

Grundlagenstudie

Praxis-Leitfaden für die Auswahl von klimaangepassten Baumarten und eines dazugehörigen waldbaulichen Plans - Hintergrundstudie für den Wald-Klimastandard

Hinweise

-

Entwicklung

Nachfolgende Inhalte wurden von UNIQUE GmbH in enger Kollaboration mit dem Wald-Klimastandard erarbeitet. Fragen und Anregungen können an das Sekretariat des Wald-Klima-standards gerichtet werden: sekretariat@waldklimastandard.de

Autoren

Dr. T. Asbeck (UNIQUE), A. Hager (UNIQUE), Dr. B. Wippel (UNIQUE), Dr. A. Weinreich (UNIQUE), M. Vohrer (EVA), F. Hildebrand (EVA)

Version

Versions-Nr.	Datum	Dokumentname	WKS-Version
1.0.00	03.10.2022	05-0101-REP-1.0.00	0.3 ff.

Änderungen der Versionen können durch das Document-Centre nachvollzogen werden.

Haftung & Copyright

Dieses Dokument kann Aussagen, Annahmen und Prognosen enthalten, die auf Informationen basieren, wie sie den Autoren zum Zeitpunkt der Erstellung des Dokumentes zur Verfügung stehen. Die Autoren und die EVA Service GmbH übernehmen keine Verpflichtung, diese Aussagen angesichts neuer Informationen oder künftiger Ereignisse zu aktualisieren. Zukunftsgerichtete Aussagen sind naturgemäß mit Risiken und Ungewissheiten verbunden.

Die Autoren und die EVA Service GmbH übernehmen trotz sorgfältiger Ausgestaltung des Dokumentes keine Gewähr für deren Vollständigkeit, Richtigkeit und Aktualität. Die in dem Dokument dargestellten Sachverhalte dienen ausschließlich der Illustration und lassen keine Aussagen über zukünftige Entwicklungen zu. Die Autoren und die EVA Service GmbH übernehmen keine Verantwortung für Maßnahmen und Entscheidungen, die auf der Grundlage der bereitgestellten Informationen ergriffen werden.

Eine Vervielfältigung, Verbreitung, Veröffentlichung oder Bearbeitung des Dokumentes, insbesondere in elektronischen oder anderen gedruckten Publikationen, auch auszugsweise, ist ohne vorherige schriftliche Zustimmung der EVA Service GmbH nicht gestattet.

Die EVA Service GmbH ist eine 100%ige Tochtergesellschaft der Ecosystem Value Association (EVA) e.V. - mit dem Vereinszweck der Förderung von Ökosystemleistungen zur Wiederherstellung und Erhalt natürlicher Ressourcen und zum Erhalt und Ausbau der Leistungsfähigkeit und Klimaresilienz von Ökosystemen.

Bildrechte

N/A

Praxis-Leitfaden für die Auswahl von klimaangepassten Baumarten und eines dazugehörigen waldbaulichen Plans



Hintergrundstudie für den Wald-Klimastandard

Praxis-Leitfaden für die Auswahl von klimaangepassten Baumarten und eines dazugehörigen waldbaulichen Plans

Hintergrundstudie für den Wald-Klimastandard

Auftraggeber

Ecosystem Value Association (EVA) e.V.

Bearbeitung

Thomas Asbeck (UNIQUE)

Amelie Hager (UNIQUE)

Bernd Wippel (UNIQUE)

Axel Weinreich (UNIQUE)

Datum

16.05.2022

Inhaltsverzeichnis

1.	Hintergrund und Zielstellung	10
1.1.	Hintergrund	10
1.2.	Zielstellung	11
2.	Ergebnisse	13
2.1.	Praxis-Stoffsammlung für die Auswahl klimatoleranter Baumarten	13
2.1.1.	Hintergründe und Modellannahmen der Klimaszenarien	13
2.1.2.	Kriterienkatalog für die Eignung der Baumarten	14
2.1.3.	Literaturbasierter Kriteriensteckbrief zur Baumarteneignung	15
2.1.4.	Einordnung und Evaluierung der Baumarten	17
2.1.5.	Ergebnisse beispielhaft ausgewählter Baumarten	20
2.2.	Praxis-Stoffsammlung für die Auswahl klimatoleranter Waldbausysteme	24
2.2.1.	Hintergründe und Methodik der waldbaulichen Empfehlungen	24
2.2.2.	Übersicht über bestehende Tools	27
2.3.	Waldbauliche Empfehlungen für einen klimaresilienten Wald	29
2.3.1.	Zertifizierungsansätze	30

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 - Veröffentlichungen zur Baumarteneignung aus den Bundesländern und den forstlichen Versuchsanstalten	34
Tabelle 2 - Überblick Waldentwicklungstypen nach Bundesländern geordnet.	37
Tabelle 3 - Übersicht der Grundlagen und bestehende Tools mit Standortskriterien nach Bundesländern geordnet (keine Angaben für Saarland u. Mecklenburg-Vorpommern).	39

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 - Entwicklung Baumarteneignung im Klimawandel unter verschiedenen Szenarien des IPCC für die ausgewählten Baumarten Weißtanne, Fichte, Buche, Traubeneiche, Dougalsie und Roteiche. Angepasste aus Dyderski et al. (2018).	10
Abbildung 2 - Beispielhafte Darstellung der Verbreitungsgeschwindigkeit der Zerreiche (Quercus cerris) aus ihrem heutigen Vorkommen nach Deutschland.	11
Abbildung 3 - Wissenschaftliche Veröffentlichungen, Praxisempfehlungen und Projektbeschreibungen (o.ä.) zu alternativen Baumarten im Klimawandel in den Bundesländern (Stand 10/2021).	16
Abbildung 4 - Herkunft der zu Grunde liegenden Quellen in den drei wissenschaftlichen Publikationen zur Baumarteneignung im Klimawandel in Deutschland.	16
Abbildung 5 - Zusammenfassende Darstellung der Auswahlkriterien für klimatolerante Baumarten.	19
Abbildung 6 - Laub- und Nadelbaumarten, die in den Veröffentlichungen genannt und anhand der Kriterien beschrieben wurden, nach heimischen Haupt- und Nebenbaumarten sowie Alternativen Baumarten sortiert.	20
Abbildung 7 - Beispielhafte Darstellung ausgewählter, häufig genannter Faktoren zur Einschätzung der Eignung von Laubbaumarten im Klimawandel. Ein hoher Wert bedeutet eine hohe Eignung.	22
Abbildung 8 - Beispielhafte Darstellung ausgewählter, häufig genannter Faktoren zur Einschätzung der Eignung von Nadelbaumarten im Klimawandel. Ein hoher Wert bedeutet eine hohe Eignung.	23
Abbildung 9 - Übersicht der Grundlagen und bestehender Tools für einen klimaangepassten Waldbau in den Bundesländern (Stand 10/2021).	28
Abbildung 10 - Web-basierte Anwendung klimaangepasste Baumartenwahl	29
Abbildung 11 - Web-basierte Anwendung NW-FVA mit Bezug zu WEZs	29

Abkürzungsverzeichnis

WET	Waldentwicklungstyp
WEZ	Waldentwicklungsziel
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
RCP	Representative Concentration Pathways (Klimaszenarien)
WKS	Wald-Klimastandard
LWF	Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft
NW-FVA	Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt
FVA BW	Forstliche Versuchsanstalt Baden-Württemberg
EUFORGEN	European Forest Genetic Resources Programme
BZT	Bestandeszieltypen
BA	Baumart
KWIS RLP	Kompetenzzentrum für Klimawandelfolgen Rheinland-Pfalz

Definitionen

WET, WEZ, BZT	Regional unterschiedliche Bezeichnungen für Waldbestände mit vergleichbarem waldbaulichen und standörtlichen Ausgangszustand und vergleichbarer Zielsetzung. Sie beschreiben die möglichst zweckmäßigsten Verfahren zur Erreichung dieser Zielsetzung unter Beachtung der Funktionenvielfalt (Holzproduktion, Biodiversität etc.) des Waldes.
Naturverjüngung	Als Naturverjüngung wird bezeichnet, was eine durch natürlich eingetragene Samen von umstehenden Bäumen oder durch vegetative Vermehrung, z.B. Stockausschlag, entstehende Waldgeneration ist.
Jungbestandspflege	Durch die Jungbestandspflege kann die Baumartenzusammensetzung in Dicken gesteuert werden. Ziel ist dabei eine den klimatischen Änderungen angepasste Baumartenmischung. Mit einer positiven, einzelbaumbezogenen Jungbestandspflege werden stabile, vitale und hochwertige Bestände auf praxistaugliche Weise erzogen.
Dickung	Als Dickung bezeichnet man einen dichten, geschlossenen Waldbestand junger Bäume, die eine durchschnittliche Baumhöhe ab etwa 2 m haben. In der Entwicklung eines forstlich angelegten Waldbestandes ist die Dickung das dritte Stadium nach der Kultur und dem Jungwuchs.
Durchforstung	Alle Hiebseingriffe in Stangen- und Baumhölzer, bei denen verwertbares Derbholz (d.h. Holz mit Brusthöhendurchmesser > 7 cm) anfällt, werden als Durchforstungen bezeichnet.
Hauptnutzung	Die Hauptnutzung umfasst die Vorratspflege sowie Ernte und Verjüngung. Sie beginnt nach Abschluss des Haupthöhenwachstums und endet mit dem Generationenwechsel.
Oberhöhe	Die Höhe der höchsten Bäume (ca. 5 Stck.) pro Bestand.
Zieldurchmesser	Der vorher festgelegt Brusthöhendurchmesser der werttragenden Zielbäume, bei dessen Erreichen die Ernte beginnt.
Z-Baum	Zukunftsbaum umfasst den Begriff, welcher die Wertträger eines Bestandes beschreibt, die in Anzahl und Art bei der jeweiligen Bewirtschaftung festgelegt werden.
Pionierbaumarten	Pionierbaumarten sind die ersten Baumarten, die Freiflächen wie Kahlschläge, Sturmwurflläche spontan besiedeln. In der Regel sind sie lichtbedürftig, schnellwüchsig in der Jugend und kurzlebig mit geringen Standortansprüchen.
Halbschattbaumarten	Halbschattenbaumarten vertragen eine leichte Beschattung durch andere Bäume, und sind solche Baumarten, die ihren Lichtanspruch während ihres Alters teilweise ändern.
Klimaxbaumarten	Schattentolerante Baumarten, die das Endstadium einer natürlichen Sukzession eines Waldes darstellen.
Klimaresistenz	Widerstandsfähigkeit, Unempfindlichkeit gegen ungünstige klimatische Bedingungen.
Klimaresilienz	Klimaresilienz bezeichnet die Fähigkeit ökologischer Systeme, sich von Auswirkungen und Belastungen des Klimawandels erholen zu können, wobei sie ihre Strukturen positiv anpassen und transformieren.
Klimaanpassung	Klimaanpassung bedeutet, sich auf klimawandelbedingten, bereits eingetretenen Änderungen einzustellen und auf zu erwartende Änderungen so zu reagieren, dass zukünftige Schäden vermieden werden können.

Klimatolerant	Baumart, die die Fähigkeit besitzt, im Zuge des Klimawandels erwartete Stresssituationen, wie etwa erhöhte Temperatur und Wassermangel, zu ertragen.
RCP	Klimaszenarien, die bestimmte Grundannahmen treffen und diese zum Beispiel anhand von verschiedenen Temperaturzunahmen bzw. Veränderungen des Niederschlags beschreiben.

Zusammenfassung

Die Studie stellt eine zusammenfassende Darstellung aktueller wissenschaftlicher und praxisbezogener Veröffentlichungen dar. Sie hat das Ziel, den Stand des Wissens zu klimatoleranten Baumarten sowie klimaangepassten Waldbausystemen mit dem Fokus der Aufforstung von Freiflächen nach Schadereignissen zu beschreiben. Aus den Inhalten der berücksichtigten Studien aus den Bundesländern sowie den forstlichen Versuchsanstalten ist deutlich geworden, dass bei jeder Bestimmung der Klimaangepasstheit viele einzelne Parameter und Eigenschaften der jeweiligen Baumarten berücksichtigt werden müssen. Auf Grund der hohen Anzahl der zu berücksichtigenden Eigenschaften, kann auch auf wissenschaftlicher Grundlage, eine gewisse Unsicherheit bei der Bewertung der Eignung der Baumarten sowie daraus resultierend der Waldbausysteme nicht ausgeschlossen werden. Diese Unsicherheit wird besonders im Zusammenhang zwischen Baumarteneignung und der Entwicklung der Standortlichkeit widerspiegelt. So kann auch die Bewertung der zukünftigen klimatischen Bedingungen eine allumfassende und generelle Einordnung der Baumarten und der Waldbausysteme erschweren bzw. verhindern. Hier zeigt sich die Komplexität der Konkretisierung von flächendeckenden, waldbaulichen Empfehlungen für den Wald-Klimastandard besonders stark. Es ist eine Herausforderung, die Ergebnisse dieser Studie auf einer passenden und sinnvollen Ebene zu verallgemeinern, ohne die Abhängigkeit der Bewirtschaftung von der jeweiligen Ausgangssituation zu vernachlässigen. Auf Basis der Kombination von der Beachtung einer gewissen Unsicherheit sowie eines geeigneten Abstraktionsniveaus der Empfehlungen, dient diese Studie als Grundlage für die Ermittlung pragmatischer Lösungen. Die fortlaufende Anpassung der Baumarten- und waldbaulichen Empfehlungen anhand neuer, praktischer Erfahrungen ist daher essenziell, um die Wälder in Zukunft möglichst klimaangepasst bewirtschaften zu können.

1. Hintergrund und Zielstellung

1.1. Hintergrund

Der Klimawandel beschleunigt die Veränderung des heutigen Waldzustands maßgeblich und mit hoher Dynamik^{1,2}. Einige Baumarten und Waldbestände sind daher schon heute an ihren räumlichen, nämlich standörtlichen, Grenzen angelangt. Dies stellt in den letzten Jahren einen zentralen Aspekt der Forschung dar, wobei verschiedene Klimaszenarien der Ausgangspunkt für die Einschätzung verschiedener Baumarten waren³. Die vorliegende Studie fasst den aktuellen Stand des Wissens sowie praktische Empfehlung in Deutschland zusammen.

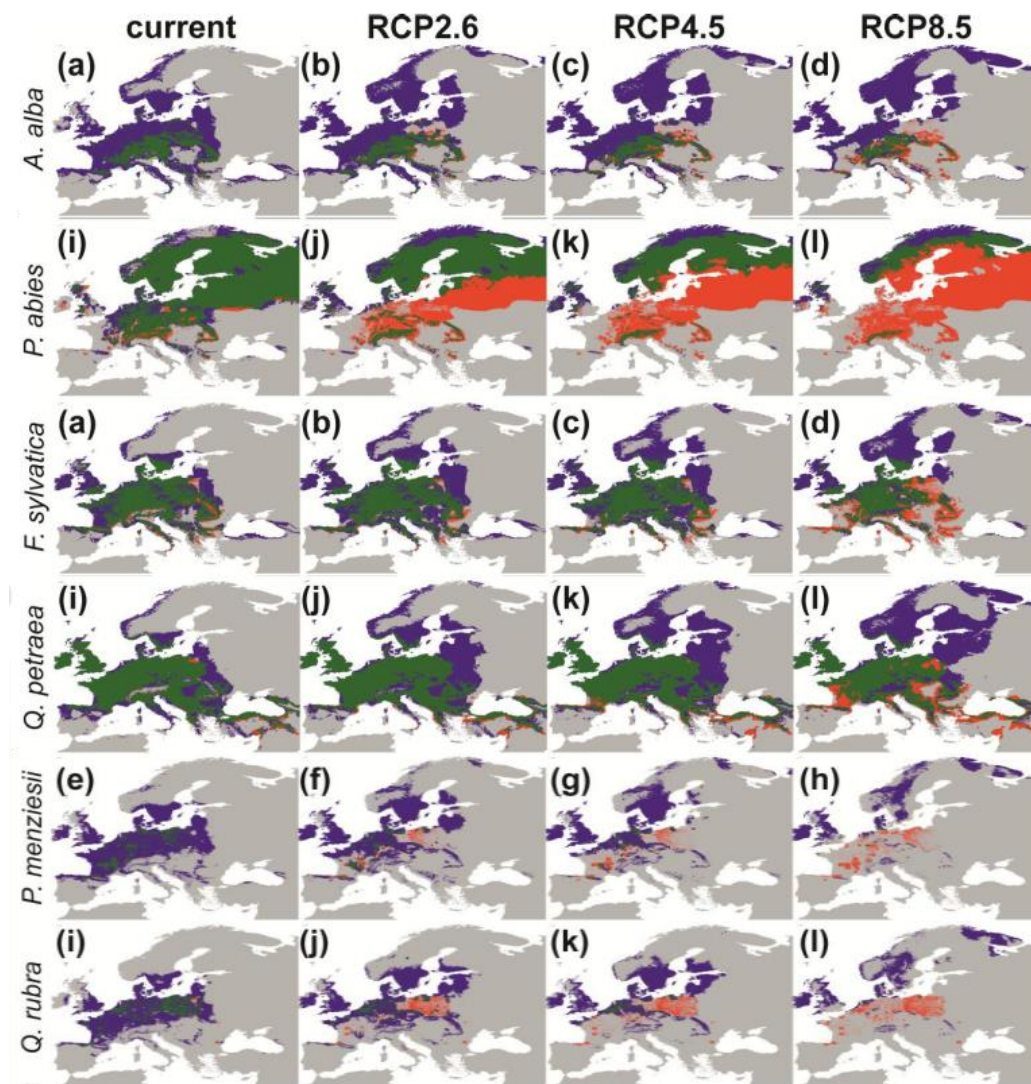


Abbildung 1 - Entwicklung Baumarteneignung im Klimawandel unter verschiedenen Szenarien des IPCC für die ausgewählten Baumarten Weißtanne, Fichte, Buche, Traubeneiche, Douglasie und Roteiche. Angepasste aus Dyderski et al. (2018).

Der Begriff Klimaanpassung bzw. -adaptation bedeutet, sich auf klimawandelbedingte, bereits eingetretene Änderungen einzustellen und auf zu erwartende Änderungen so zu reagieren, dass zukünftige Schäden vermieden werden können. Es ist zum Beispiel festgestellt worden, dass die Geschwindigkeit einer Baumartenausbreitung in temperaten Laub-Nadel-Mischwäldern gemittelt bei etwa 0,35-2 km/Jahr liegt⁴. Dies würde bedeuten, dass sich bei einer Temperaturerhöhung von 4 °C (entspricht etwa dem RCP8.5), eine Baumart von ihrem jetzigen Standort ca. 1200 km in Richtung Norden überbrücken muss, um am Ende dieses Jahrhunderts wieder auf einem für sie klimatisch angepassten Standort zu sein. Um diese Distanz bis Ende des Jahrhunderts zurückzulegen, müsste eine Art also um 14,5 km/Jahr wandern⁵(Abbildung 2). Dies zeigt wie bedeutend eine Anpassung der Wälder durch klimaangepassten Waldbau ist. Ebenso wird hierdurch verdeutlicht, dass eine Entkopplung der Anpassungsgeschwindigkeit in einem anthropogen geprägten Ökosystem, falls keine aktiven Maßnahmen ergriffen werden, ein potenzielles Risiko für die Stabilität der Wälder darstellt.

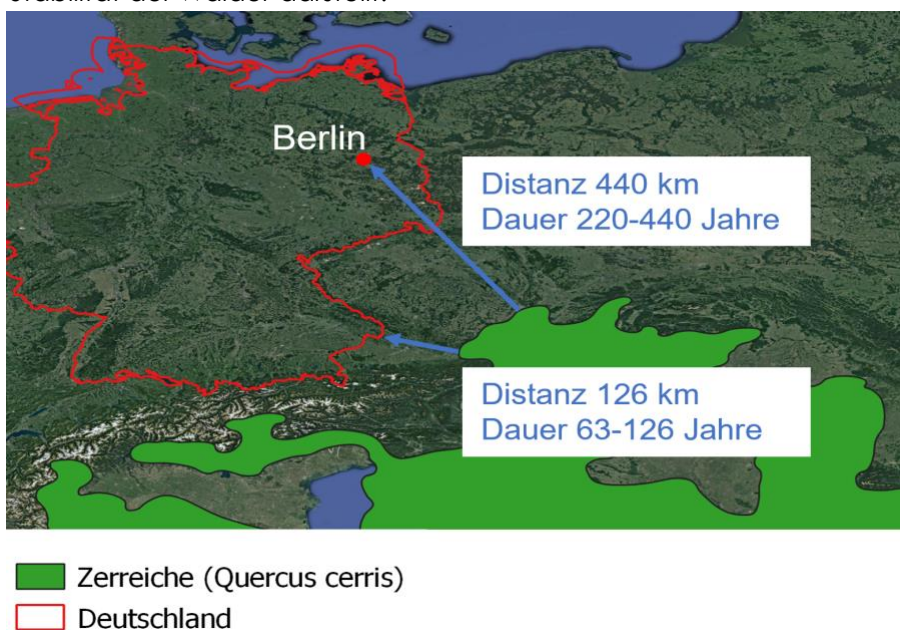


Abbildung 2 - Beispielhafte Darstellung der Verbreitungsgeschwindigkeit der Zerreiche (*Quercus cerris*) aus ihrem heutigen Vorkommen nach Deutschland.

1.2. Zielstellung

Die Ecosystemvalue Association e.V. ist im Prozess, einen Wald-Klimastandard (WKS) für Deutschland zu kreieren, um den Finanzierungsbedarf von Waldbesitzenden mit dem Kompensationswunsch des Privatsektors glaubwürdig zusammenzubringen.

Diese Studie umfasst zwei wichtige Bausteine für die Entwicklung des Wald-Klimastandards.

Im ersten Teil ging es um die Frage, welche Empfehlungen es für eine klimaangepasste Baumartenwahl derzeit bundesweit gibt und ob diese flächendeckend und in vergleichbarer Qualität vorliegen. Dazu stellen wir eine Übersicht aus bestehenden Empfehlungen und wissenschaftlichen Veröffentlichungen dar.

Im zweiten Teil wurde der Frage nachgegangen, ob und welche Empfehlungen es für waldbauliche Behandlungsprogramme zur Anpassung an den Klimawandel gibt. Das Ziel war hier, eine Übersicht für den Stand der praxisnahen- und wissenschaftlichen Diskussion zur Ableitung eines Leitbildes für mögliche und zielführende Maßnahmen zum Umbau in klimaresiliente Wälder mit hohem Potenzial an Ökosystemleistungen zusammenzustellen.

2. Ergebnisse

2.1. Praxis-Stoffsammlung für die Auswahl klimatoleranter Baumarten

Die Stoffsammlung stellte die bundesweit verfügbaren Leitfäden bzw. Werkzeuge zusammen, analysierte die diesen zugrunde liegenden Methoden und fasste sie in einem Praxisleitfaden zusammen. Dieser soll Waldbesitzenden helfen, schnell und übersichtlich ihre Auswahl von standortsangepassten klimaresilienten Baumarten für Deutschland zu treffen.

Insgesamt gibt es eine Vielzahl an unterschiedlichen Quellen zum Thema angepasste Baumarten im Klimawandel für den deutschen Wald. Hierbei muss deutlich zwischen wissenschaftlichen, praxisbezogenen und sonstigen Veröffentlichungen unterschieden werden.

Eine erste Recherche fokussierte sich auf die forstlichen Versuchsanstalten der verschiedenen Bundesländer. Hierbei konnte festgestellt werden, dass vor allem die Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF) sowie die Forstliche Versuchsanstalt Baden-Württemberg (FVA-BW) bereits eine relativ umfassende Zusammenstellung an Artensteckbriefen für klimangepasste Baumarten erstellt haben⁶⁻⁸. Hinzukommt eine frühere wissenschaftliche Veröffentlichung der Göttinger Forstwissenschaftler, die allerdings eine geringere Anzahl an Baumarten beinhaltet sowie einen stärkeren Fokus auf die Invasivität dieser legt⁹. Schließlich zeigt das Kompetenzzentrum für Klimawandelfolgen in Rheinland-Pfalz noch eine erste Sammlung an Artensteckbriefen für alternative Baumarten auf, die jedoch noch nicht in einer gesammelten wissenschaftlichen Veröffentlichung bereitgestellt wurden.

Neben diesen wissenschaftlichen Grundlagen gibt es weitere praxisorientierte Veröffentlichungen der Landesforstbetriebe aus Niedersachsen, Nordrhein-Westfalen, Rheinland-Pfalz und Thüringen, die das Thema der klimaangepassten Baumarten explizit behandeln. Dazu kommen erste Projektberichte oder andere Veröffentlichungen aus den Bundesländern. Insgesamt ergab die Recherche eine Literaturgrundlage von 15 relevanten Veröffentlichungen unterschiedlicher Qualität.

2.1.1. Hintergründe und Modellannahmen der Klimaszenarien

Die Annahmen der Klimaszenarien, die den beschriebenen Baumarten in den Veröffentlichungen zu Grunde liegen, basieren zum Teil auf unterschiedlichen Quellen. Insgesamt lässt sich jedoch feststellen, dass die Representative Concentration Pathways (RCP) Szenarien des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) am häufigsten die Grundlage bilden und auch den aktuellen wissenschaftlichen Standard für die Baumartenwahl darstellen^{3,10}. Hierbei wird in den meisten Fällen bereits das „Extremszenario“ des RCP 8.5 angenommen, was eine Temperaturzunahme von 3,2 °C in den angegebenen Zeiträumen, in der Regel bis 2100, entsprechen würde. Diese

Grundlage wurde in verschiedenen Formen umgesetzt, z.B. als Klimahüllen in Bayern oder zur Modellierung der Baumarteneignung in Rheinland-Pfalz^{8,11}. Im Gegensatz dazu ist bei der Veröffentlichung der Baumartensteckbriefe in Baden-Württemberg eine andere Methode gewählt worden. Hier wurden Baumarten, die eine Jahresdurchschnittstemperatur von 11,5 °C als prognostiziertes Mittel am Ende des 21. Jahrhunderts tolerieren können, ausgewählt⁶. In der Regel wurden anschließend die Baumarteneignungen anhand dieser Annahmen für das jeweilige Bundesland ermittelt.

2.1.2. Kriterienkatalog für die Eignung der Baumarten

Als Grundlage für die Bewertung der Baumarten im Klimawandel wurde eine Auswahl an Kriterien in den gesammelten Veröffentlichungen zusammengestellt. Hierbei wurde die regionale Gültigkeit der Empfehlungen sowie die standörtlichen Grundlagen berücksichtigt. Angestrebt wurde eine eindeutige Eignung auf den verschiedenen Skalenebenen, von regionaler, lokaler bis zur Bestandesebene. Hierbei wurde offensichtlich, dass es mangels wissenschaftlich-basierter Ergebnisse für die meisten Baumarten auf regionaler Ebene grobe Empfehlungen gibt, da nur für einige genannte Arten gesicherte waldbauliche Erfahrungen vorhanden sind. Die waldbaulich relevante Bestandesebene wurde bisher, Stand unseres Wissens, nur in Hessen und Sachsen-Anhalt in einem Online-Tool der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt (NW-FVA) in einem größeren Umfang und zur direkten Anwendung umgesetzt¹². Aktuell sind in diesem Tool allerdings relativ wenige und vor allem heimische Baumarten verfügbar.

Ein weiteres Kriterium war die Aktualität der Veröffentlichungen, wobei sich zeigte, dass die Extremereignisse, vor allem der Trockensommer 2018, eine einschneidende Erfahrung war, die den Bedarf an alternativen Bewirtschaftungsempfehlung beschleunigt haben dürfte. Dies lässt sich aus der Anzahl praktischer Veröffentlichungen seit 2019 ersehen. Die Beiträge der LWF, FVA-BW sowie die Anweisungen aus Rheinland-Pfalz und Nordrhein-Westfalen sind alle nach 2019 entstanden.

Einen wesentlichen Bestandteil der Empfehlungen von Baumarten für den Klimawandel stellen die methodischen Ansätze der Beurteilung der Eignung dar. Hier gab es zum Teil deutliche Unterschiede zwischen den Veröffentlichungen, aber auch einige Kernaspekte die Überschneidungen aufweisen. Grundsätzlich lassen sich verschiedene Kategorien der Baumarten feststellen. Zum einen wurden heimische Haupt- und Nebenbaumarten auf ihre Zukunftsfähigkeit in Bezug auf die sich verändernden Klimabedingungen eingeordnet. Unter Hauptbaumarten versteht man die Baumarten, die in einem Bestand vorherrschend sind und forstwirtschaftlich das Betriebsziel darstellen. Dies bedeutet, dass sich Verschiebungen der Eignung mit Bezug auf z.B. die Höhenlage oder die Nutzung anderer Standorte für die jeweilige Baumart ergeben. Hierbei lässt sich von einer methodisch guten Ausgangslage ausgehen, da in der Regel wissenschaftlich solide Kenntnisse über diese Baumarten und somit eine gute Grundlage für eine Einschätzung vorhanden sind¹³.

Die zweite Kategorie sind nicht-heimische Baumarten, die auf Grund ihrer Verbreitungsgebiete und sonstigen Eigenschaften als Alternativen für eine Einbringung in Frage kämen. Diese Baumarten lassen sich weiter unterteilen in solche, die auch auf

natürlichem Wege, unter den sich verändernden Klimaszenarien, ihre Verbreitung nach Mitteleuropa und Deutschland ausbreiten könnten. Im Unterschied dazu stehen Baumarten, die nur aktiv aus ihrem Herkunftsgebiet eingebracht werden können, z.B. die nordamerikanischen Alternativbaumarten. Schlussendlich lässt sich jedoch sagen, dass noch viel Forschungsbedarf bei der Eignung der Baumarten besteht. Faktoren wie die Invasivität beispielsweise lassen sich ohne Anbauversuche und praktische Untersuchungen nur schwer einschätzen¹⁴. Im Vergleich zu der Bewertung der heimischen Haupt- und Nebenbaumarten, ist die Methodik bei der Auswahl nicht-heimischer Arten weniger eindeutig nachvollziehbar und im geringeren Maße wissenschaftlich belegt. Für einige dieser Baumarten gibt es Praxisversuche, andere sind schon seit langem Teil des waldbaulichen Portfolios, für wieder andere gibt es wenig bis keine Erfahrungen¹⁵. Diese Unterschiede in der Grundlage der Baumartenauswahl stellt bei der folgenden Bewertung ein Hauptkriterium dar und sollte stets beachtet werden.

2.1.3. Literaturbasierter Kriteriensteckbrief zur Baumarteneignung

Die Übersicht der vorhandenen Veröffentlichungen, die eine Empfehlung für die Eignung der Baumarten im Klimawandel in den Bundesländern angeben, ist in Tabelle 1 im Anhang 3.1 zusammengefasst. Die Qualität der verschiedenen Quellen variieren stark, was sich auf Grund der unterschiedlichen Zielstellungen erklären lässt. So sind die praxisrelevanten, waldbaulichen Handlungsempfehlungen häufig wenig wissenschaftlich unterbaut, weisen dafür aber eine lokalere Beschreibung der jeweiligen Standortseignung für die Regionen auf.

Es lassen sich fünf Veröffentlichungen zur Baumarteneignung herausstellen, die die Baumarteneignung im Klimawandel eindeutig berücksichtigen und methodisch nachvollziehbar dargestellt haben. Diese sind für Baden-Württemberg (FVA), Bayern (LWF), Niedersachsen (NW-FVA/Landesforste), Nordrhein-Westfalen (Ministerium, Wald-und-Holz) sowie Rheinland-Pfalz (Kompetenzzentrum für Klimawandelfolgen) erstellt worden. Hierbei berücksichtigt sind ausschließlich Veröffentlichungen seit 2019, da diese zumindest teilweise die aktuellen Veränderungen seit dem Trockenjahr 2018 berücksichtigen. Für viele weitere Bundesländer ist ersichtlich, dass an Projekten zur Baumarteneignung gearbeitet wird, jedoch gibt es hier noch keine fertiggestellten Veröffentlichungen (Abbildung 3).

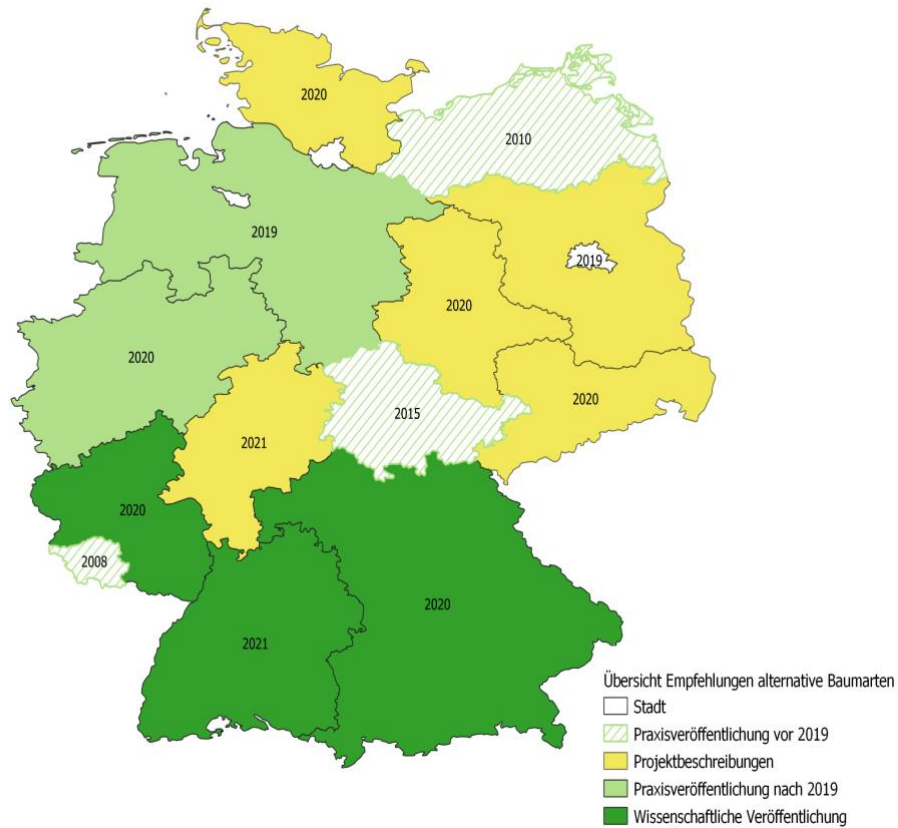


Abbildung 3 - Wissenschaftliche Veröffentlichungen, Praxisempfehlungen und Projektbeschreibungen (o.ä.) zu alternativen Baumarten im Klimawandel in den Bundesländern (Stand 10/2021).

Die Anzahl an Wissenschaftlern, die an Projekten und Forschungsvorhaben zu dem Thema Baumartenauswahl arbeiten, beläuft sich auf mehr als 100 Forschende (Abbildung 4).

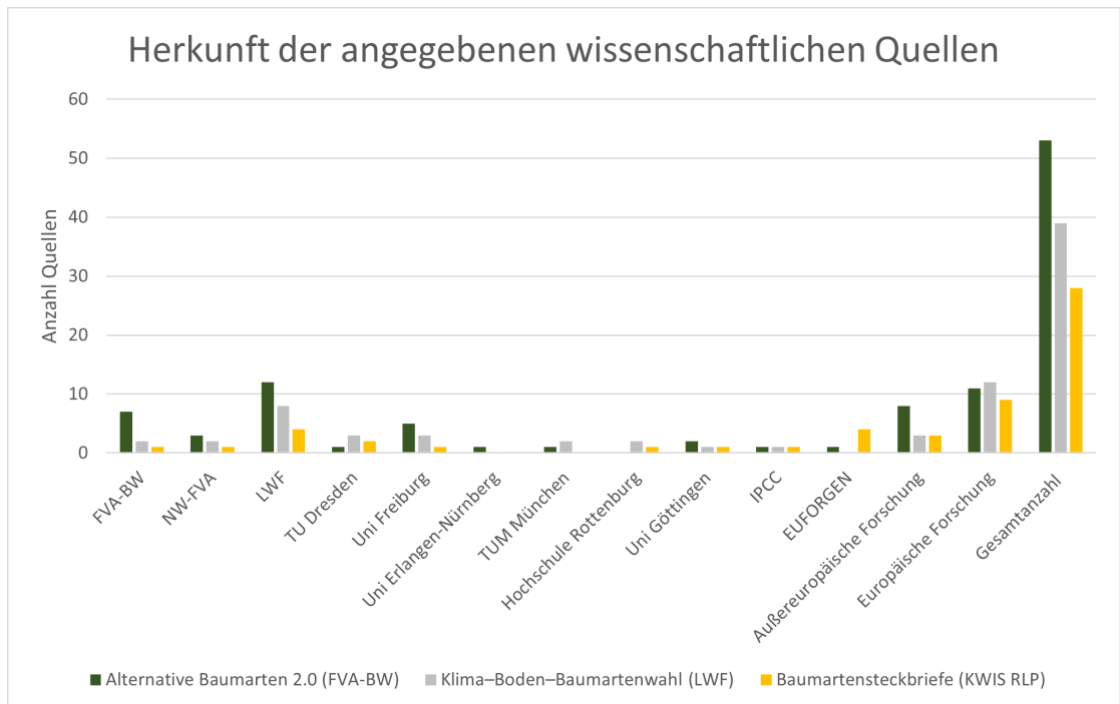


Abbildung 4 - Herkunft der zu Grunde liegenden Quellen in den drei wissenschaftlichen Publikationen zur Baumarteneignung im Klimawandel in Deutschland.

2.1.4. Einordnung und Evaluierung der Baumarten

Aus den vorliegenden Artensteckbriefen wurde eine Anzahl an relevanten Kriterien zur Einschätzung der Eignung der jeweiligen Baumart im Klimawandel zusammengefasst.

Die Bewertungskriterien lassen sich in eine allgemeine Einschätzung, Standortfaktoren und ökologische Eigenschaften sowie die praktische Ausgangslage gliedern. Im Folgenden werden die Kriterien beschrieben und die Einordnung dargestellt. Bei einigen Kriterien gibt es relativ sichere Einschätzungen in der Literatur, andere sollten berücksichtigt werden, können aber nicht an bestimmte Werte geknüpft werden.

Allgemeine Einschätzung

- Datengrundlage: die Erwähnung der jeweiligen Baumart in den vorliegenden Veröffentlichungen wurde evaluiert und die Evidenzstärke eingeordnet. Hierfür wurde bei fehlendem wissenschaftlichen Hintergrundwissen von einer geringen Eignung, bei Praxis- oder wissenschaftlichen Versuchen in Deutschland von mittlerer und bei dem Vorhandensein waldbaulicher Erfahrungen von starker Evidenz ausgegangen.
- Innovativität: Um eine Einordnung der Innovativität zu erstellen, wurde bewertet, inwieweit die jeweilige Baumart bereits im waldbaulichen Portfolio auftaucht.

Standortfaktoren und ökologischen Eigenschaften

Wasser:

- Trockentoleranz: Die Fähigkeit, Trockenperioden langfristig zu ertragen, hängt unter anderem von der Ausbildung des Wurzelsystems ab. Die Bewertung folgt in der Literatur der angegebenen Dürretoleranz, falls nicht für Deutschland vorhanden, dann basierend auf Angaben aus dem natürlichen Verbreitungsgebiet.
- Wasserbedarf in der Vegetationsperiode: für das Wachstum essenzieller minimaler Wasserbedarf. Ein hoher Wasserbedarf (>600 mm) wurde in der Literatur eher niedrig bewertet im Hinblick auf wahrscheinlich längere Trockenperioden, ein mittlerer Anspruch entspricht 200-600 mm, als gut wurde ein geringer Bedarf bewertet (<200 mm).
- Jährlicher Wasserbedarf: Grundsätzlicher, gemittelter Wasserbedarf über das Gesamtjahr, wenn nicht für Deutschland bekannt, dann basierend auf Angaben aus dem natürlichen Verbreitungsgebiet. Ein hoher Wasserbedarf (>700 mm) wurde in der Literatur niedrig bewertet, ein mittlerer Anspruch entspricht 400-700 mm, gut wurde ein geringer Bedarf bewertet (<400 mm).

Temperatur:

- Spätfrostresistenz: Die Fähigkeit einen Kälteeinbruch unter null Grad nach Beginn des Austriebs (meistens April – Juni) zu tolerieren, ohne dass das Triebwachstum im selben Jahr wesentlich beeinträchtigt ist, falls nicht für Deutschland vorhanden, dann basierend auf Angaben aus dem natürlichen Verbreitungsgebiet.
- Winterkältetoleranz: Fähigkeit den Winterfrost ohne Schäden zu tolerieren.

- Mitteltemperatur Vegetationszeit: Hier wurde das untere Limit der jeweiligen Baumart für die tolerierbare Temperatur in der Vegetationszeit beschrieben.
- Jahresmitteltemperatur

Boden:

- Anspruch an den Boden: da die Ansprüche an den Standort in einigen Kriterien (Ton-, Kalk- und Säuretoleranz) explizit bewertet wurden, dient dieses Kriterium als allgemeinere Zusammenfassung. Die jeweilige Baumart hat basierend auf ihrem Ökogramm einen speziellen Anspruch an den Standort.
- Tontoleranz: Fähigkeit von Bäumen, auch tonige Böden intensiv zu durchwurzeln. Eine niedrige Tontoleranz wurde negativ bewertet, eine hohe Toleranz bedeutet, dass mehr Standorte zur Verfügung stehen und wurde daher positiv bewertet.
- Kalktoleranz: Einige Baumarten schließen kalkhaltige Böden als Standort aus, wohingegen andere auf diesem Substrat gut zurechtkommen. Eine niedrige Kalktoleranz wurde negativ bewertet, eine hohe Toleranz bedeutet, dass mehr Standorte zur Verfügung stehen und wurde daher positiv bewertet.
- Säuretoleranz: Baumarten haben bestimmte Anforderungen an den pH-Wert des Bodens. Eine niedrige Säuretoleranz wurde negativ bewertet, eine hohe Toleranz bedeutet, dass mehr Standorte zur Verfügung stehen und wurde daher positiv bewertet.

Sonstige:

- Wachstum: Die Wuchsleistung dient als Maß für die Produktivität eines Bestandes. Hier wurden wenige Baumarten als mattwüchsig und somit niedrig bewertet, einige Baumarten hingegen zeigen eine starke Wuchsleistung. Insgesamt gibt es jedoch ein breites Mittelspektrum, da die Wuchsleistung stark vom Standort und z.T. von der Bewirtschaftung abhängt und sich somit nicht unbedingt verallgemeinern lässt.
- Schattentoleranz: Hier wurden die Baumarten in lichtbedürftig (häufig Pionierbaumarten), Halbschatt- und Schattbaumarten (häufig Klimaxbaumarten) eingeteilt.
- Höhenlage: Die Höhenlage wurde grob in niedrige Lagen, Baumarten mit einem breiten Spektrum und Berglagen eingeteilt. Dies dient vor allem der Information sowie zur Vollständigkeit.
- Invasivität: Für heimische Baumarten spielt dieses Kriterium keine Rolle und bei vielen nicht-heimischen Baumarten, denen praktische Erfahrung und somit eine fundierte, wissenschaftliche Grundlage fehlt, wird dieses Kriterium nicht in die Evaluation aufgenommen. Es sollte jedoch bei praktischer Umsetzung bzw. dem Anbau nicht-heimischer Baumarten beachtet werden.

Praktische Ausgangssituation

- Herkunft Pflanzmaterial: Ein praktischer Aspekt bei der Baumarteneignung ist die Verfügbarkeit von hochwertigem und ausreichendem Pflanzmaterial. Dies ist für die meisten Baumarten in dem Forstvermehrungsgutgesetz geregelt. Für einige Baumarten

gibt es in Deutschland keine offiziellen Quellen, für einige gibt es Quellen für Pflanzmaterial laut dem Forstvermehrungsgutgesetz, andere Baumarten können aus Naturverjüngung weiter genutzt werden.

- **Verwendungsmöglichkeiten:** Bei diesem Kriterium wurde die theoretische Bandbreite der Verwendung bewertet. Hierbei spielte die Holzqualität eine Rolle. Für einige Baumarten gibt es auf Grund der Holzeigenschaften wenige Einsatzmöglichkeiten, für andere zumindest eine wesentliche Verwendungsmöglichkeit (Papier, Biomasse, Bauholz, Furnier etc.). Die aktuelle Marktsituation spielt hier eine untergeordnete Rolle, da eine Anpassung der Verfahren erwartet wird.
- **Abiotische/biotische Risiken:** Dieses Kriterium bezieht sich auf nicht-klimabezogene Gefahren wie Insektenschäden, Pilze, Schneebruch oder ähnliches. Bei einer geringen Anzahl und hoher Resistenz aus praktischen Erfahrungen in Deutschland wurde die Eignung als gut bewertet, falls es eine oder mehrere eindeutige Gefahrenquellen (z.B. Eschentriebsterben, Fichtenborkenkäfer, Ulmensterben) wurde in der Regel eine schlechte Einschätzung getroffen.
- **Waldbauliche Anforderung:** Hier wurde in der Literatur grob bewertet, ob die waldbaulichen Anforderungen für die jeweilige Baumart anspruchsvoll, z.B. bei einer wahrscheinlichen einzelstammweisen Mischung oder einfach, z.B. in einem sich natürlich verjüngendem Reinbestand, sind. Die einzelstammweise Mischung mit anderen Baumarten zum Beispiel wurde als komplex, also zeitaufwendig und kostenintensiv eingeschätzt. Da die Bewirtschaftung von den jeweiligen waldbaulichen Zielen abhängt und der Reinbestand nicht mehr das primäre Ziel sein sollte, wurde diese Einschätzung in der Literatur stark vereinfacht dargestellt.
- **Anbaueignung im Klimawandel:** Eine hohe Eignung weisen Baumarten auf, die an das momentane und zukünftige Klima angepasst sind; eine mittlere Bewertung erfolgte, wenn nur das zukünftige Klima geeignet ist; eine niedrige Bewertung, wenn nur das heutige Klima geeignet für die jeweilige Baumart ist.

Allgemeine Einschätzung	Standortfaktoren und Ökologie	Praktische Ausgangssituation
<ul style="list-style-type: none"> • Häufigkeit Nennung • Evidenzstärke • Innovativität 	<ul style="list-style-type: none"> • Wasser <ul style="list-style-type: none"> • Trockentoleranz • Vegetationsperiode • Jährliches Mittel • Temperatur <ul style="list-style-type: none"> • Spätfrostresistenz • Vegetationszeit • Jährliches Mittel • Winterkältetoleranz • Anspruch Boden <ul style="list-style-type: none"> • Tontoleranz • Kalktoleranz • Säuretoleranz • Sonstiges <ul style="list-style-type: none"> • Wachstum • Schattentoleranz • Höhenlage • Invasivität 	<ul style="list-style-type: none"> • Herkunft Pflanzmaterial • Verwendungsmöglichkeiten • Abiotische/biotische Risiken • Waldbauliche Anforderung • Anbaueignung

Abbildung 5 - Zusammenfassende Darstellung der Auswahlkriterien für klimatolerante Baumarten.

2.1.5. Ergebnisse beispielhaft ausgewählter Baumarten

Insgesamt kamen bei der Analyse eine Anzahl von 78 genannten Baumarten zusammen. Hierbei wurden allerdings 31 aus der Betrachtung genommen, da für diese die oben genannten Kriterien teilweise oder gar nicht beantwortet werden konnten. Somit verblieben 47 Baumarten, für die eine Beurteilung der Eignung im Klimawandel erstellt werden konnte (Abbildung 6). Die gewonnenen Erkenntnisse zeigen, dass nur für eine geringe Anzahl dieser Baumarten eine praktische Anbauempfehlung in Verbindung mit der Klimateignung getroffen werden kann. Vor allem bei den Nadelbäumen ist die Auswahl auf Grund von mangelnden praktischen waldbaulichen Erfahrungen im deutschen Kontext eingeschränkt.

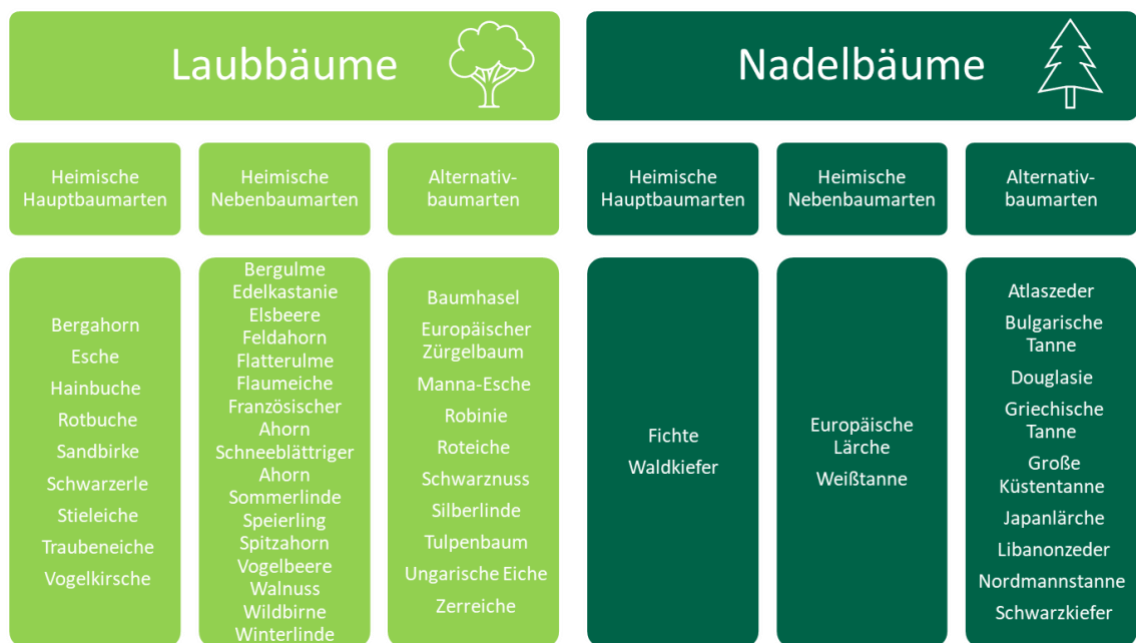


Abbildung 6 - Laub- und Nadelbaumarten, die in den Veröffentlichungen genannt und anhand der Kriterien beschrieben wurden, nach heimischen Haupt- und Nebenbaumarten sowie Alternativen Baumarten sortiert.

Eine vorläufige Einschätzung, die wissenschaftlich weiter validiert werden muss, kann für folgende Baumarten eine grundsätzliche, praktische Eignung vorlegen. Die Voraussetzung hierfür ist eine standortgerechte Baumartenwahl, welche die ökologischen Bedürfnisse der jeweiligen Art berücksichtigt.

Bei den Laubbaumarten ließen sich z.B. folgende Baumarten als geeignet einordnen:

- Heimische Hauptbaumarten: Vogelkirsche (*Prunus avium* (L.)), Traubeneiche (*Quercus petraea*), Stieleiche (*Quercus robur*)
- Heimische Nebenbaumarten: Spitzahorn (*Acer platanoides* L.), Elsbeere (*Sorbus torminalis* (L.))
- Alternative Baumarten: Roteiche (*Quercus rubra* B.A. Sm. & Abbot)

Bei den Nadelbaumarten lässt sich z.B. folgende Baumart als geeignet einordnen:

- Alternative Baumarten: Douglasie (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco)

Bei dieser ersten Einschätzung bzw. Bewertung wurden alle der 22 oben genannten Kriterien berücksichtigt. Es wurde jedoch nicht ausschließlich auf die Klimaeignung, sondern auch auf praktische Aspekte wie waldbauliche Erfahrungen, Herkunft von gesetzlich anerkannten Quellen oder erwartete Wuchsleistung und Verwendungsmöglichkeiten Wert gelegt. Viele weitere Baumarten können auf Grund ihrer standörtlichen Bedürfnisse eine Alternative darstellen, sollten jedoch in der Praxis eher versuchsweise berücksichtigt werden.

Abbildung 7 zeigt exemplarisch einige Faktoren für die Beurteilung ausgewählter Baumarten im Klimawandel. Hierbei lassen sich unterschiedliche Ergebnisse ablesen, so ist z.B. die Rotbuche als Vergleich angegeben, zeigt jedoch grundsätzlich nur eine mittlere Trockentoleranz sowie grundsätzlich eine moderate Anbaueignung im Klimawandel. Hinzu kommt unter dem Faktor Innovativität ein geringer Wert, da die Buche als Hauptbaumart bereits auf großer Fläche in Deutschland vorkommt. Dies bedeutet, dass eine Anbauempfehlung der Buche ein erhöhtes Risiko darstellen kann, falls diese Baumart in Zukunft weitere Probleme aufzeigt. Dahingegen sind Baumarten mit einer hohen Innovativität nicht häufig in Deutschland auf großer Fläche angebaut und können somit grundsätzlich zu einer Risikominimierung im Klimawandel beitragen. Es gibt zusätzlich einige Baumarten, wie hier exemplarische am Beispiel der Zerreiche dargestellt, die eine hohe Anpassung aufweisen, für die allerdings belastbare praktische Erfahrungen für Gesamtdeutschland fehlen.

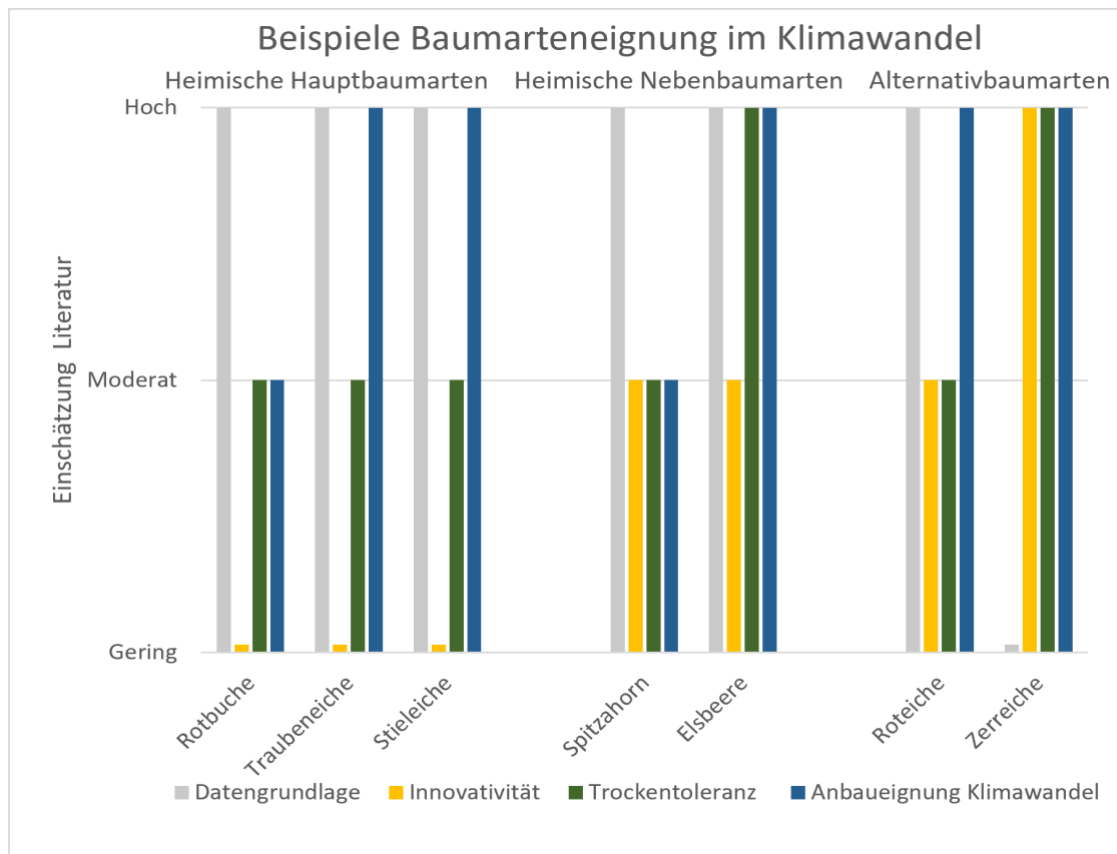


Abbildung 7 - Beispielhafte Darstellung ausgewählter, häufig genannter Faktoren zur Einschätzung der Eignung von Laubbaumarten im Klimawandel. Ein hoher Wert bedeutet eine hohe Eignung.

Im Vergleich zur Anzahl der Laubbaumarten, die sich im Klimawandel für einen Anbau eignen, ist die der Nadelbäume deutlich reduziert. Dies hängt jedoch weniger mit der grundsätzlichen Anbaueignung zusammen, als mit der Nutzbarkeit und den standörtlichen Anforderungen der jeweiligen Art. Schlussendlich zeigen zum Beispiel die Douglasie und die Große Küstentanne (*Abies grandis*) eine ähnliche Eignung im Klimawandel (Abbildung 8). Jedoch sind die Verwendungsmöglichkeiten der Küstentanne deutlich eingeschränkter, daher kann ein flächiger Anbau dieser Art nur bedingt empfohlen werden.

Insgesamt sollten bei der Baumartenwahl neben den Standortbedingungen immer die Zielsetzungen der Waldbesitzenden berücksichtigt werden. So können einige Baumarten gegebenenfalls für manche Waldbesitzende, z.B. mit dem Ziel Biomasseproduktion in Frage kommen, für andere mit dem klaren Ziel der Wertholzproduktion auf einem ähnlichen Standort eher nicht. Die Auswahl der hier genannten Baumarten ist aus einer praktischen und anwendbaren Einschätzung getroffen worden. Weitere Baumarten eignen sich z.B. zur experimentellen Einbringung als Mischbaumarten auf kleinerer Fläche.

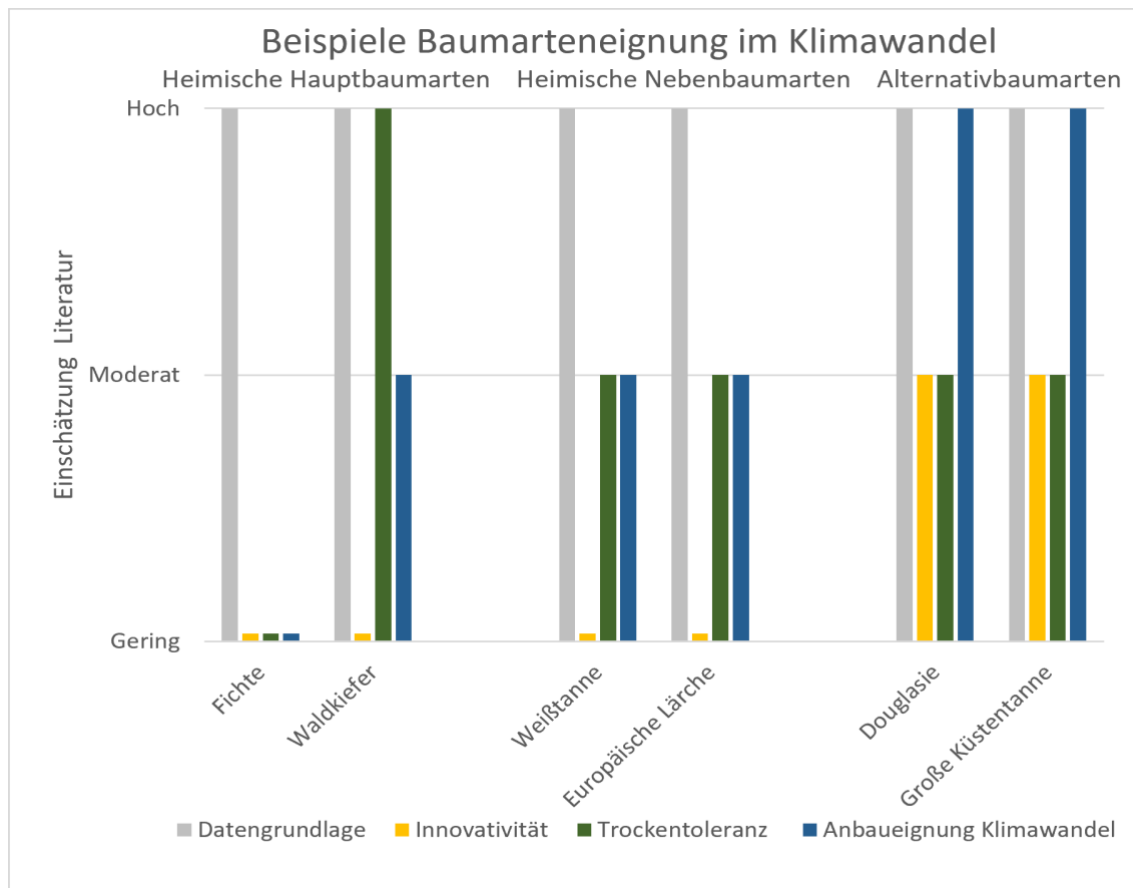


Abbildung 8 - Beispielhafte Darstellung ausgewählter, häufig genannter Faktoren zur Einschätzung der Eignung von Nadelbaumarten im Klimawandel. Ein hoher Wert bedeutet eine hohe Eignung.

Insgesamt wurden die Ergebnisse der vorliegenden Studie in einem Experteninterview mit Prof. Ammer (Professor für Waldbau und Waldökologie der gemäßigten Zonen an der Georg-August-Universität Göttingen) bestätigt. Es ist anzumerken, dass einige Quellen, z.B. in Bezug auf die Klimatoleranz von einzelnen Baumarten wie der Buche, teilweise zu unterschiedlichen Ergebnissen kommen. Dies ist auf Grund der aktuellen Dynamik sowie der wissenschaftlichen Arbeit jedoch häufig der Fall. Trotzdem lässt sich anhand der ausgewählten Quellen ein relativ vollständiges Bild der Baumartenauswahl im Klimawandel abbilden.

Eine weitere Einschätzung von Prof. Ammer bezieht sich auf die Standorteignung der Baumarten, die sich vor allem in zwei Ansätze unterscheiden lässt. So ist in der Wissenschaft ein Diskurs vorzufinden, der einerseits das Makroklima als ausschlaggebend betrachtet und somit davon ausgeht, dass die Baumartenverbreitung ohne den Menschen stark durch großklimatische Verhältnisse gesteuert wird. Dieser Ansatz ist vor allem in den Veröffentlichungen der LWF zu finden. Ein anderer Ansatz bezieht sich auf die stärkere Betrachtung des Standorts (KWB, nFK) als Ausgangssituation wobei die Baumart auch hier ins Großklima passen muss, konkrete Empfehlungen aber eindeutig standortsabhängig sind. Beide Ansätze kommen in der Regel zu relativ ähnlichen Einschätzungen der Baumarteneignung.

2.2. Praxis-Stoffsammlung für die Auswahl klimatoleranter Waldbausysteme

Im zweiten Teil der vorliegenden Arbeit geht es um die Erarbeitung von waldbaulichen Empfehlungen für einen klimatoleranten Wald. In einem ersten Schritt wurde eine umfassende Literaturrecherche durchgeführt, um den aktuellen Stand der Forschung zu erarbeiten und anhand verschiedener Kriterien bewerten zu können. Ähnlich wie im Abschnitt 2.1 zur Auswahl klimatoleranter Baumarten, erfolgte die erste Stoffsammlung in Anlehnung an die Forstlichen Versuchsanstalten sowie forstwissenschaftlichen Einrichtungen auf Länderebene. Während der Recherche stellte sich heraus, dass mehrere Länder Leitfäden oder ähnliche Produkte zu Waldentwicklungstypen oder so genannten Bestandeszieltypen veröffentlicht haben, diese sich jedoch stark in ihrer Qualität, Vollständigkeit und Aktualität unterscheiden.

Sehr ausführlich und strukturiert ausgearbeitet sind vor allem die Veröffentlichungen der FVA Baden-Württemberg¹⁶, welche allerdings aus dem Jahr 2014 und damit nicht mehr sehr aktuell ist, das NRW-Waldbaukonzept¹⁷ sowie die Veröffentlichungen der NW-FVA für Hessen und Niedersachsen^{18,19}, die alle aktuell aus den Jahren 2019 und 2020 stammen. Die Veröffentlichung aus Sachsen-Anhalt²⁰ ist ebenfalls aktuell, aus dem Jahr 2020, jedoch eher knappgehalten und auf wenige Kategorien beschränkt. Veröffentlichungen zu Waldentwicklungs-Typen vor dem Hintergrunde des Klimawandels konnten aus den anderen Bundesländern nicht gefunden werden.

Im Folgenden eine kurze Darstellung der genannten Veröffentlichungen, um einen ersten Überblick zu verschaffen:

- **Baden-Württemberg:** Richtlinie landesweiter Waldentwicklungstypen, Landesbetrieb ForstBW (2014)¹⁶
- **Hessen:** Waldentwicklungsziele (WEZ) für den hessischen Kommunal- und Privatwald, NW-FVA, Döbbeler, H.; Nagel, R.-V.; Spellmann, H.; Hamkens, H. (2020)¹⁹
- **Niedersachsen:** Klimaangepasste Baumartenwahl in den Niedersächsischen Landesforsten, NW-FVA, Niedersächsische Landesforsten (2019)¹⁸
- **Nordrhein-Westfalen:** Waldbaukonzept-NRW, Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen Referat Öffentlichkeitsarbeit (2020)¹⁷
- **Sachsen-Anhalt:** Entscheidungshilfen zur klimaangepassten Baumartenwahl im Land Sachsen-Anhalt, Sachsen-Anhalt Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft und Energie NW-FVA (2020)²⁰

2.2.1. Hintergründe und Methodik der waldbaulichen Empfehlungen

Um die verschiedenen Veröffentlichungen vergleichen und bewerten zu können sowie Wissens- und Forschungslücken zu entdecken, wurden die Dokumente anhand verschiedener Faktoren untersucht. Dabei ging es zum einen darum, die Methodik der waldbaulichen Empfehlungen besser verstehen zu können, gleichzeitig, aber auch

etwaige Unterschiede und Gemeinsamkeiten der Veröffentlichungen herauszuarbeiten. Die Übersicht Waldentwicklungstypen nach Bundesländern (Tabelle 2 im Anhang 3.2) gibt einen Überblick über die ausgewählten fünf verschiedenen Leitfäden der Waldentwicklungstypen.

Die Ergebnisse weisen fünf Veröffentlichungen mit hoher Ähnlichkeit innerhalb ihrer Struktur sowie ihren standörtlichen Grundlagen auf. Die Leitfäden der NW-FVA für Hessen, Niedersachsen und Sachsen-Anhalt¹⁸⁻²⁰ zeigen zwar Unterschiede in ihrer Präsentations- und Darstellungsform auf, nennen als standörtliche Grundlagen zur Zuordnung eines Waldentwicklungstyps jedoch dieselben Faktoren. Diese sind

- nutzbaren Feldkapazität (nFK)
- Klimatischen Wasserbilanz (KWB)
- Standortwasserbilanz (SWB)

Die Klimatische Wasserbilanz ist die Differenzgröße aus Niederschlag und potenzieller Evapotranspiration. Die potenzielle Evapotranspiration ist die maximal mögliche Verdunstung, also die Wassermenge, die von einem Pflanzenbestand in Form von Wasserdampf an die Atmosphäre abgegeben wird bei ausreichender Nährstoff- und Wasserversorgung (DWD 2021).

Klimatische Wasserbilanz (KWB) = Niederschlag (N) – potenzielle Evapotranspiration (ETp)

Zur besseren Vergleichbarkeit wird sie häufig aus Millimeter je Vegetationsmonat normiert. Ein negatives Vorzeichen bedeutet, dass der Boden trockener wird, ein positives, dass Versickerung stattfinden kann. Als Ausgangslage wird dabei angenommen, dass der Boden am Ende des Winters vollständig mit Wasser aufgefüllt ist. Für den ersten Fall bedeutet dies also, dass der Boden Feuchtigkeit verliert, der zweite hingegen bleibt unverändert, da die Versickerung etwaige Bodenfeuchteverlust ausgleicht²¹.

Aus der klimatischen Wasserbilanz und der nutzbaren Feldkapazität (nFK) berechnet sich die Standortwasserbilanz. Diese gibt die standörtliche Wasserverfügbarkeit an und gibt damit Auskunft über eine erwartete Trockenstressgefährdung für die Baumarten.

Standortwasserbilanz (SWB) = klimatische Wasserbilanz (KWB) + nutzbare Feldkapazität (nFK)

Zur standörtlichen Zuordnung der einzelnen Baumarten sowie der Waldentwicklungstypen werden außerdem folgende Faktoren beachtet:

- Trophiestufe: oligotroph, schwach mesotroph, mesotroph, gut mesotroph, eutroph und kalkeutroph
- Nährkraftstufe: arme (A), ziemlich arme (Z), mäßige (M), kräftige (K), reiche (R) oder reich-carbonatische (RC) Standorte
- Standort (terrestrisch, hydromorph)
- Höhenrahmen

Die Veröffentlichungen der FVA Baden-Württemberg¹⁶ hingegen, nennt keine konkreten Standortfaktoren, sondern Aspekte der räumlichen Einordnung, wie die Großlandschaften

Baden-Württembergs. Die Basis hierfür sind die regionalen Einheiten der forstlichen Standortkartierung in Abhängigkeit der waldgeschichtlichen Entstehung und sukzessionalen Stellung.

Das Waldbaukonzept aus Nordrhein-Westfalen¹⁷ wiederum nennt ähnliche Faktoren zur standörtlichen Zuordnung:

- Wasserverfügbarkeit: sickerwassergeprägt, stauwassergeprägt, grundwassergeprägt
- Nährstoffversorgung: sehr nährstoffarm, nährstoffarm, mäßig nährstoffhaltig, nährstoffreich, sehr nährstoffreich
- Vegetationszeit (für den Wald relevante mittlere Vegetationszeit in Tagen ≥ 10 °C Ta-Gesamtmitteltemperatur)
- Höhenstufe

Über den ersten Analyseschritt geht also klar hervor, dass vier der fünf untersuchten Veröffentlichungen als Standortfaktoren in erster Linie auf die Wasserbilanz, Trophie- und Nährkraftstufen sowie Höhenstufe und Temperatur heranziehen. Die Empfehlungen aus Baden-Württemberg hingegen geben keine klaren Informationen über die zu beachtenden Standortfaktoren¹⁶.

2.2.2. Übersicht über bestehende Tools

Neben den Waldentwicklungstypen und Baumartenempfehlungen wurde außerdem nach zusätzlichen Informationsquellen und Tools gesucht, die Auskunft über klimaangepasste waldbauliche Empfehlungen geben. Dazu wurde ebenfalls auf Länderebene nach folgenden Kategorien unterteilt:

- Baumarten-Klimarisikokarten
- Waldentwicklungstypen
- Online Tools und Apps

Die gefundenen Veröffentlichungen wurden in der Tabelle 3 im Anhang 3.3 zusammengefasst auf ihre Standortskriterien untersucht sowie als Grafik (Abbildung 9) dargestellt, um einen schnellen Überblick über die existierenden Veröffentlichungen in den jeweiligen Bundesländern zu erhalten.

Analog zum ersten Analyseschritt, dem Vergleich und der Bewertung der verschiedenen waldbaulichen Empfehlungen, sind auch hier Kriterien zu erkennen, die die Grundlage der Tools bzw. der Klimakarten darstellen und der Beurteilung welche Baumarten oder Waldentwicklungstypen an welchem Standort als angepasst bewertet und empfohlen werden, zugrunde liegen (Tabelle 3). Auch hier sind es die Standortsfaktoren Wasserbilanz, Trophie- und Nährkraftstufe sowie Höhenstufe und Temperatur, die als Grundlage der Einschätzung herangezogen werden.

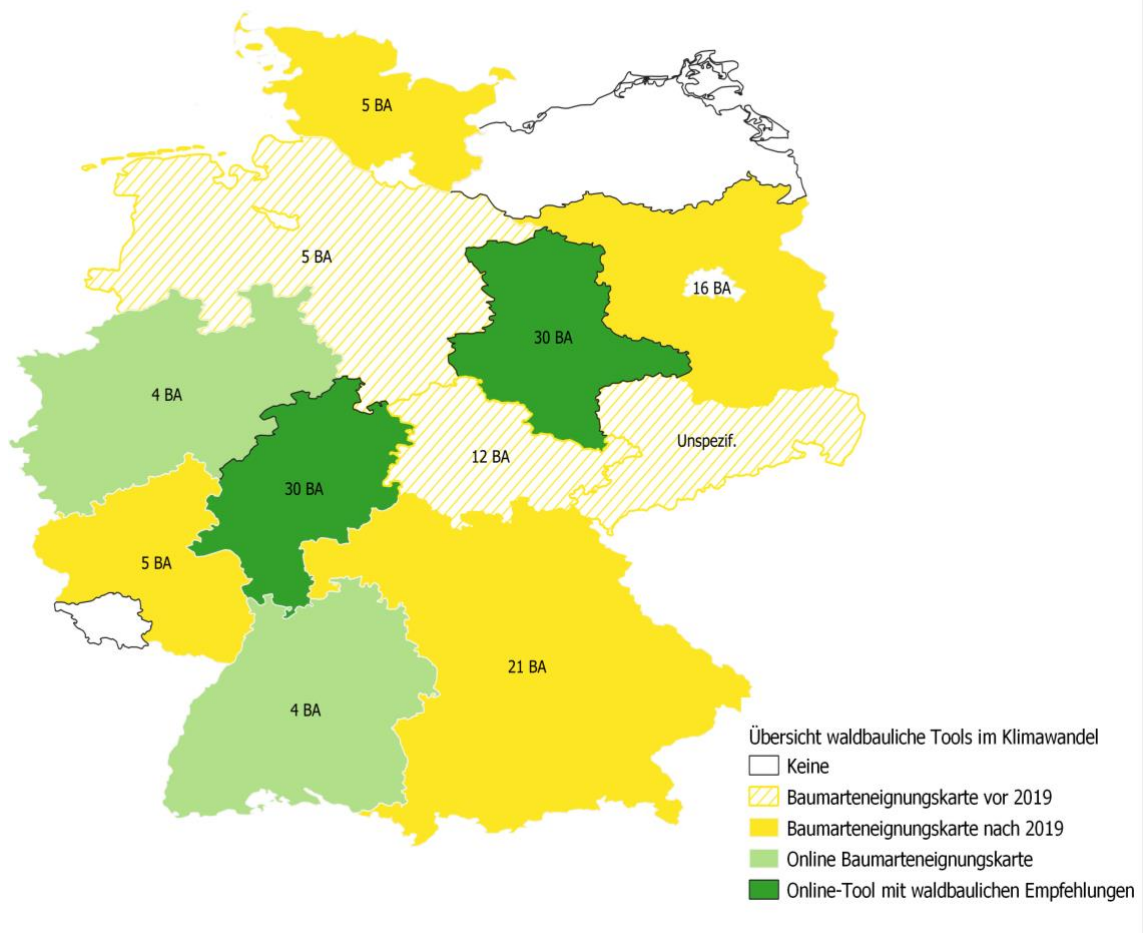


Abbildung 9 - Übersicht der Grundlagen und bestehender Tools für einen klimaangepassten Waldbau in den Bundesländern (Stand 10/2021).

Aus Abbildung 9 geht hervor, dass der Stand der waldbaulichen Tools zum Klimawandel aktuell sehr unterschiedlich ausgeprägt ist. In einigen Bundesländern, Hessen und Sachsen-Anhalt beispielsweise, gibt es das bereits erwähnte von der NW-FVA entwickelte Online-Tool²², das durch die Standortwahl, den passenden Waldentwicklungstyp angibt (Abbildung 10 und Abbildung 11). Andere Bundesländer wiederum stellen online Baumarteneignungskarten zur Verfügung, wieder andere haben bisher kein Tool zur klimaangepassten Baumartenwahl und Waldentwicklungstypen entwickelt bzw. veröffentlicht.

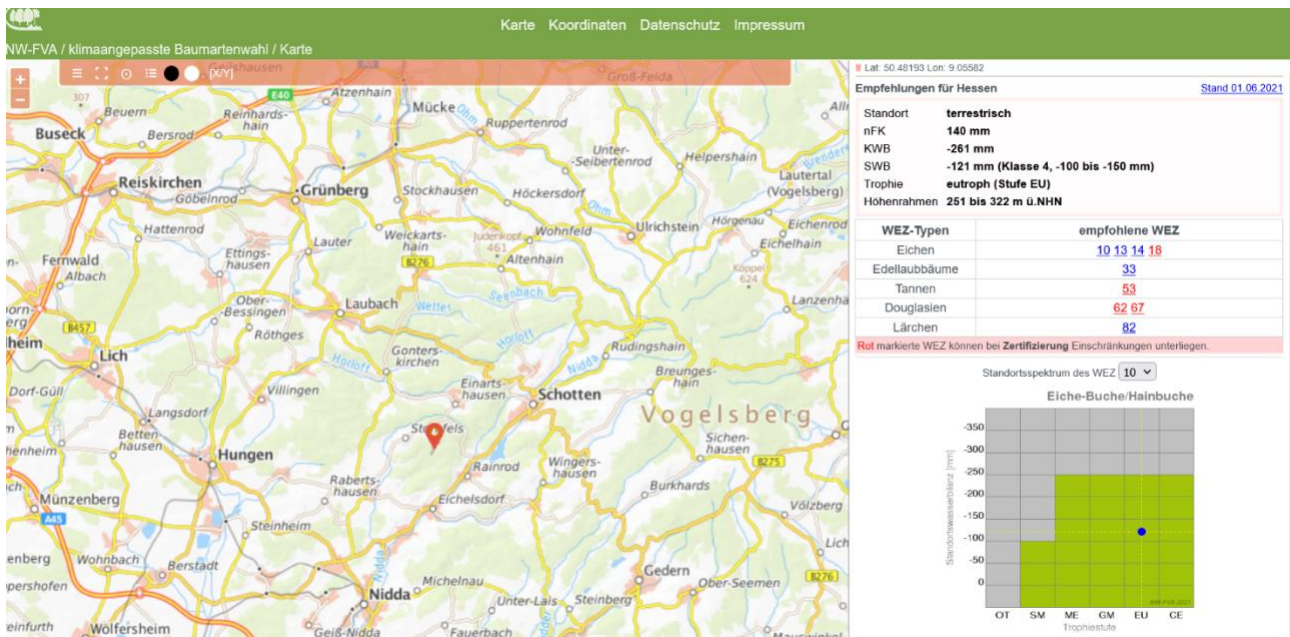


Abbildung 10 - Web-basierte Anwendung klimaangepasste Baumartenwahl

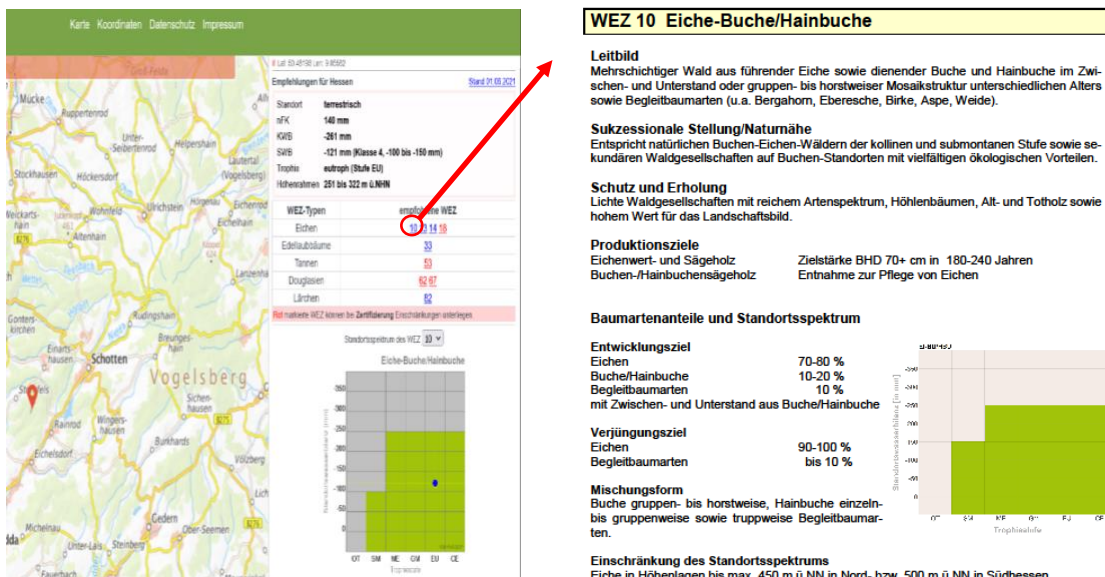


Abbildung 11 - Web-basierte Anwendung NW-FVA mit Bezug zu WEZs

2.3. Waldbauliche Empfehlungen für einen klimaresilienten Wald

Insgesamt wird in den waldbaulichen Empfehlungen ein einheitliches Leitbild zur waldbaulichen Behandlung in der Zukunft gezeichnet, das aber regionalen Unterschieden unterliegt. Anhand eines Beispiels soll dieses Leitbild verdeutlicht und besprochen werden. In dem Leitbild wird an geeigneter Stelle darauf hingewiesen, welche Ansätze zur Zertifizierung des jeweiligen Arbeitsschrittes es gibt.

Grundsätzlich wird deutlich, dass sich die Waldstruktur in Deutschland deutlich verändern wird. Dies kann auf Grund von ökologischen Gegebenheiten, also standörtlichen

Veränderungen ohne menschliches Zutun passieren, oder aktiv durch waldbauliche Eingriffe gesteuert werden. In den letzten Jahren, seit dem Trockenjahr 2018, hat sich die Dynamik in den deutschen Wäldern stark beschleunigt. Einige Bundesländer haben daher bereits jetzt neue Empfehlungen zur Bewirtschaftung erstellt.

Diese beinhalten in der Regel:

- Eine standort- und klimaangepasste Baumartenwahl unter Berücksichtigung der zukünftigen Veränderungen
- Eine stärkere Baumartenmischung als bisher zur Risikominimierung
- Eine daraus folgende Mehrschichtigkeit der entstehenden Bestände zu Erhöhung der Stabilität des Waldes
- Einen wesentlich komplexeren Waldbau auf großer Fläche als bisher auf Grund der neuen Anforderung der Bewirtschaftung
- Den Erhalt biodiversitätsrelevanter Strukturen wie Habitatbäume und Totholz auf der gesamten bewirtschafteten Fläche

Die Notwendigkeit und damit verbundenen Anforderungen an den Erhalt von Strukturen wie Habitatbäumen sowie Totholz wird durch wissenschaftliche Veröffentlichungen und praxisbezogene Empfehlungen untermauert^{23,24}. Hierbei ist vor allem das Ziel, ein stabiles Ökosystem zu erhalten bzw. zu schaffen vorrangig. Weitere Studien sind jedoch notwendig, um eine genauere Abschätzung der Anzahl und Qualität dieser Strukturen zu beschreiben.

Diese fünf Punkte fassen eine Vielzahl von standortabhängigen Faktoren zusammen, und sind somit der kleinste gemeinsame Nenner der aktuellen waldbaulichen Empfehlungen.

Grundsätzlich bestätigt Prof. Ammer, dass es zwei Hauptaspekte bei der waldbaulichen Steuerung gibt: Erstens die Baumartenzusammensetzung, die gezielt auf klimatolerante Baumarten sowie eine höhere Mischung zur Risikominimierung abzielen sollte, um den Wald klimastabil zu bewirtschaften. Zweitens spielt die Dichteregulierung durch Durchforstungen eine Hauptrolle, wobei z.B. bei Nadelbäumen eine geringere Dichte einen positiven, also reduzierenden Effekt auf den Trockenstress der Bäume hat. Bei Laubbäumen sind diese Ergebnisse noch nicht eindeutig wissenschaftlich belegt.

Zusätzlich darf die Mischungsregulierung und Steuerung der Bestandesdichte nicht vernachlässigt bzw. verpasst werden. Hier gilt: je später die Eingriffe erfolgen, desto schwieriger und risikoreicher sind sie für die jeweiligen Baumarten.

2.3.1. Zertifizierungsansätze

Für das besprochene waldbauliche Modell sowie als mögliche Standardherangehensweise zur Zertifizierung eines klimastabilen und somit als Kohlenstoffsenke tauglichen Waldes, gibt es konkrete Möglichkeiten. Für die unterschiedlichen Behandlungsschritte wird im Folgenden angegeben, wie eine Zertifizierung aussehen könnte. Es sollte möglichst versucht werden, die Zertifizierung in bestehende Inventurverfahren (Forsteinrichtung, andere Zertifizierungsmechanismen) zu integrieren, um den Aufwand für die Waldbesitzenden so niedrig wie möglich zu halten.

Bei allen Arbeitsschritten sollte die sachgemäße Ausführung ein Hauptaugenmerk der Zertifizierung sein.

Aufforstung

Bei der Etablierung eines neuen Bestandes für einen zertifizierten, klimastabilen Wald lässt sich die Zielsetzung der Baumartenmischung auf der Fläche kontrollieren. Dabei sollte schematisch vorgegangen werden, ähnlich wie bei einer Forsteinrichtung, und die gesamte Bestandesfläche begutachtet werden. Hierbei wird die Zielsetzung aus Baumarten, Anteile der Naturverjüngung bzw. Pflanzung sowie die räumliche Anordnung (Pflanzverband) überprüft. Gegebenenfalls können Fernerkundungsmethoden zur Überprüfung eingesetzt werden. Die Zertifizierung sollte spätestens zwei Jahre nach der geplanten Etablierung (teilweisen Aufforstung) geschehen.

Jungbestandspflege

Die Zertifizierung einer Jungbestandspflege kann unter Umständen im Rahmen der Forsteinrichtung (i.d.R. alle 10 Jahre) stattfinden. Hierbei sollte überprüft werden, ob die Mischbaumarten erhalten wurden und der vorher festgelegte Anteil der Bäume während der Negativauslese entnommen wurde.

Durchforstung

Ähnlich wie die Zertifizierung der Jungbestandspflege, kann bei der Durchforstung im Rahmen der Forsteinrichtung alle 10 Jahre eine Überprüfung stattfinden. Es sollte auf eine dauerhafte Markierung der Wertträger (Z-Bäume), in der Regel durch Sprühfarbe, geachtet werden. Des Weiteren sollte auch hier kontrolliert werden, ob der erforderliche Anteil an Bedrängern rund um die Wertträger entnommen wurde. Hierbei spielt vor allem eine Überprüfung des Kronen-/Stammverhältnisses eine Rolle, z.B. sollte bei Laubbäumen in der Regel die Grünkronenbasis bei 8-10 m erhalten bleiben bzw. ein Verhältnis von etwa 1/3 astfreier Schaftlänge und 2/3 Kronenlänge erhalten werden.

Hauptnutzung

Bei der Hauptnutzung lässt sich vor allem die Entnahme des geplanten Volumens sowie der Erhalt der vorher festgelegten biodiversitätsrelevanten Strukturen (stehendes Totholz, Habitatbaumgruppen) überprüfen. Des Weiteren könnte, je nach Zertifizierungsstandard, die Naturverjüngung der gewünschten zukünftigen Baumartenzusammensetzung überprüft werden.

Literaturverzeichnis

1. Brang, P. *et al.* Suitability of close-to-nature silviculture for adapting temperate European forests to climate change. *Forestry* **87**, 492–503 (2014).
2. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) Referat 515 – Nachhaltige Waldbewirtschaftung, Holzmarkt. Ergebnisse der Waldzustandserhebung 2020. 72 (2021).
3. Dyderski, M. K., Paż, S., Frelich, L. E. & Jagodziński, A. M. How much does climate change threaten European forest tree species distributions? *Glob. Change Biol.* **24**, 1150–1163 (2018).
4. Loarie, S. R. *et al.* The velocity of climate change. *Nature* **462**, 1052–1055 (2009).
5. Zimmermann, N. E. *et al.* 3.7 Baumartenverbreitung und Standorteignung. 23.
6. Avila, A. L. de *et al.* *Artensteckbriefe 2.0: alternative Baumarten im Klimawandel: eine Stoffsammlung.* (Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg, 2021).
7. Forster, M., Falk, W. & Reger, B. *Praxishilfe Klima – Boden – Baumartenwahl.* (Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF), 2019).
8. Hopf, C. *et al.* *Praxishilfe Klima – Boden – Baumartenwahl, Band II.* (Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF), 2021).
9. *Potenziale und Risiken eingeführter Baumarten: Baumartenportraits mit naturschutzfachlicher Bewertung.* (Universitätsverlag Göttingen, 2015).
10. Walentowski, H. *et al.* Assessing future suitability of tree species under climate change by multiple methods: a case study in southern Germany. *Ann. For. Res.* **60**, (2017).
11. Rheinland-Pfalz, L. *Grundsatzanweisung Waldverjüngung im Klimawandel Wiederbewaldung, Vorausverjüngung und Jungwaldpflege.* (2020).
12. Bialozy, R., Döbbeler, H., Weidig, J. & Spellmann, H. Ergebnisse aus dem IKSP-Projekt „Klimarisikokarten Forst“. *Forsch. Wiss. ImDialog* (2021).
13. Kunz, J., Löffler, G. & Bauhus, J. Minor European broadleaved tree species are more drought-tolerant than *Fagus sylvatica* but not more tolerant than *Quercus petraea*. *For. Ecol. Manag.* **414**, 15–27 (2018).
14. Brundu, G. *et al.* Global guidelines for the sustainable use of non-native trees to prevent tree invasions and mitigate their negative impacts. *NeoBiota* **61**, 65–116 (2020).
15. Springer, S., Frischbier, N. & Binder, F. Versuchsanbauten in ausgewählten warmen Regionen mit nichtheimischen Baumarten für den Wald der Zukunft. *LWF Aktuell* 5 (2019).
16. ForstBW. Richtlinie landesweiter Waldentwicklungstypen. (2014).

17. Waldbaukonzept Nordrhein-Westfalen. 200.
18. Böckmann, T. *et al.* Klimaangepasste Baumartenwahl in den Niedersächsischen Landesforsten, NW-FVA, Niedersächsische Landesforsten. (2019).
19. Döbbele, H., Nagel, R.-V., Spellmann, H. & Hamkens, H. Waldentwicklungsziele (WEZ) für den hessischen Kommunal- und Privatwald. (2020).
20. Entscheidungshilfen zur klimaangepassten Baumartenwahl. 72.
21. Gemballa, V. R. & Schlutow, A. Überarbeitung der Forstlichen Klimagliederung Sachsens. *Allg Forst Jagdztg.* 5 (2007).
22. NW-FVA. Entscheidungshilfen zur klimaangepassten Baumartenwahl, <https://www.nw-fva.de/unterstuetzen/software/baem>.
23. Grosmann, J. & Pyttel, P. Mikrohabitate und Baumdimension als Grundlage der Habitatbaum-Auswahl im Bergmischwald. *Nat. Landsch.* **94**, 531–541 (2019).
24. *Alt und Totholzkonzept Baden-Württemberg*. (Landesbetrieb ForstBW, 2015).

3. Anhang

3.1. Baumarteneignung im Klimawandel nach Bundesländern und forstlichen Versuchsanstalten

Tabelle 1 - Veröffentlichungen zur Baumarteneignung aus den Bundesländern und den forstlichen Versuchsanstalten

BUNDESLAND	TITEL DER VERÖFFENTLICHUNG	FORM DER VERÖFFENTLICHUNG	JAHR	STAND DER ENTWICKLUNG	ORGANISATION	SKALENEBENE FÜR ABFRAGE	KLIMAMODELLE	ANZAHL BAUMARTEN
Baden-Württemberg	Alternative Baumarten im Klimawandel 2.0	Wissenschaftlich	2021	Veröffentlicht	FVA-BW	Erfahrungen in BaWü und Deutschland	Im ursprünglichen Verbreitungsgebiet Jahresdurchschnittstemperaturen von 11,5°C tolerierbar?	35
Bayern	Praxishilfe Klima-Boden Baumartenwahl Band II [1]	Wissenschaftlich	2020 [2019]	Veröffentlicht	LWF	Verbreitung in Bayern aus BWI und zusätzlichen Quellen	Klimahüllen, Gegenwart (Periode 1971 – 2000), zwei Zukunftsszenarien (2061 – 2080) (RCP 4.5 mit plus 1,8 °C und RCP 8.5 mit plus 3,2 °C)	16 [16]
Brandenburg	N/A	Konzepte (keine Veröffentlichung)	2019	in der Entwicklung	Landesbetrieb Forst Brandenburg	Landesübergreifend, für Risikogebiete, Anreicherung von Verjüngungsflächen und Strukturen	N/A	Bewertung von 103 Baumarten

Hessen	Alternative Baumarten für Hessen	Bericht Projektst art	2021	Projektstar t 2020	NW-FVA			ca. 12
Mecklenbur g-Vorpommer n	Maßnahmenkonz ept zur Anpassung der Wälder MV an den Klimawandel	Bericht	2010		Ministerium für Landwirtsch aft, Umwelt und Verbraucher schutz MV (LU)			
Niedersachs en	Klimaanagepasst e Baumartenwahl in den niedersächsische n Landesforsten	Praxisori entiert	2019	Veröffentli cht	Niedersächsi sche Landesforste n/NW-FVA	Regional Unterschiede werden beachtet, Waldbauregionen und Wuchsbezirke genannt	Klimagrößen basierend auf RCP 2.6 und 8.5, Klimawerte ab 1961	22
NRW	Wiederbewaldun gskonzept NRW - Empfehlungen für eine nachhaltige Walderneuerung auf Kalamitätsflächen	Praxisori entiert	2020	Veröffentli cht	Ministerium für Umwelt, Landwirtsch aft, Natur- und Verbraucher schutz NRW	Regional Unterschiede beachtet (72 Standorttypen)	Referenz, RCP 4.5 und RCP 8.5, Bezug auf forstliche Vegetationszeit, Klimatische Wasserbilanz	42
Rheinland-Pfalz	Grundsatzanweis ung Waldverjüngung im Klimawandel - [Artensteckbriefe]	Praxisori entiert [Artensteckbrief e]	2020 [2021]	Veröffentli cht [teilweise fertig]	Landesforste n RLP [RLP Kompetenzz entrum für Klimawandel folgen]	Landesebene	Referenz und RCP 8.5	55
Saarland	Richtlinie Bewirtschaftung Staatswald	praxisori entierte Veröffentli chung	2008	Veröffentli ch	SaarForst Landesbetrie b			
Sachsen	Baumartenwahl in Zeiten des Klimawandels	kurzer Artikel	2020					

Sachsen-Anhalt	Entscheidungshilfen zur klimaangepassten Baumartenwahl	Online Tool	2020				Klimadaten des Deutschen Wetterdienstes, Klimaszenarien durch die RCP Klimaszenarien (IPCC 2014)	
Schleswig-Holstein	Waldzustandsbericht 2020	Kapitel innerhalb Waldzustandsbericht	2020		Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt, Natur und Digitalisierung SH		RCP Klimaszenarien, Messwerte Deutscher Wetterdienst	
Thüringen	Standortgerechte Baumarten- und Bestandeszieltypenwahl für die Wälder des Freistaates Thüringen auf Grundlage der forstlichen Standortkartierung unter Beachtung des Klimawandels	Praxisorientiert	2015	Veröffentlicht	Thüringenforst	Lokal, nach Wuchseinheiten aufgeteilt	Klimabereich, also der Klimabeschreibung aus Vegetationszeitlänge und klimatischer Wasserbilanz in der Vegetationszeit	13

3.2. Übersicht Waldentwicklungstypen nach Bundesländern

Tabelle 2 - Überblick Waldentwicklungstypen nach Bundesländern geordnet.

BUNDESLAN D	TITEL DER VERÖFFENTLICHUNG	JA HR	ORGANISATION	FORM DER VERÖFFENTLICHUNG	AUFBAU DES LEITFADENS	STANDÖRTLICHE GRUNDLAGEN	ANZAHL WETS
Baden-Württemberg	Richtlinie landesweiter Waldentwicklungstypen	2014	Landesbetrieb ForstBW	praxisorientierte waldbauliche Empfehlungen	<ul style="list-style-type: none"> • Standort • Verbreitungsschwerpunkte • Ökologische Situation • Angabe von Zielen • Entwicklung der Ausgangsbestände • Waldbauliche Maßnahmen • Klimawandel 	Großlandschaften Baden-Württembergs: <ul style="list-style-type: none"> • Basis regionale Einheiten der forstlichen Standortkartierung • Abhängig von Waldentstehung und Sukzession • Standortkundliche regionale Gliederung Baden-Württembergs unterteilt in 11 Regionen 	17
Hessen	Waldentwicklungsziele (WEZ) für den hessischen Kommunal- und Privatwald	2020	NW-FVA Döbbeler, H.; Nagel, R.-V.; Spellmann, H.; Hamkens, H.	praxisorientierte waldbauliche Empfehlungen	<ul style="list-style-type: none"> • Leitbild • Sukzessionale Stellung/Naturnähe • Schutz und Erholung • Produktionsziele: Zielstärke und Sortiment • Baumartenanteile und Standortsspektrum • Mischungsform • Klimawandel 	<ul style="list-style-type: none"> • Nutzbare Feldkapazität (nFK) • Klimatische Wasserbilanz (KWB) • Standortwasserbilanz (SWB) • Trophiestufe • Standort • Höhenrahmen 	30
Niedersachsen	Klimaangepasste Baumartenwahl in den Niedersächsischen Landesforsten	2019	NW-FVA, Niedersächsische Landesforsten	Leitfaden und Online Tool	<ul style="list-style-type: none"> • Klimawandel • Standort • Laub- und Nadelbaumarten • Planungsfenster 	<ul style="list-style-type: none"> • heutig und künftig: Standortwasserbilanz in der forstlichen Vegetationszeit (Verrechnung nFK und 	8 Waldbauregionen

					<ul style="list-style-type: none"> • Wuchsbedingungen • Leitbild, Waldentwicklungsziel • Sukzessionale Stellung/Naturnähe • Holzerzeugung, Schutz und Erholung • Baumartenanteile 	<p>KWB)</p> <ul style="list-style-type: none"> • heutig und künftig: Nährstoffstufe • Trockenstressrisiko der Hauptbaumarten in Bezug zur höhen abhängige Niederschlags- und Temperaturverteilung: Standortbasierte Zuordnung der WET 	
Niedersachsen	Klimaangepasste Baumartenwahl in den Niedersächsischen Landesforsten	2019	NW-FVA, Niedersächsische Landesforsten	Leitfaden und Online Tool	<ul style="list-style-type: none"> • Klimawandel • Standort • Laub- und Nadelbaumarten • Planungsfenster • Wuchsbedingungen • Leitbild, Waldentwicklungsziel • Sukzessionale Stellung/Naturnähe • Holzerzeugung, Schutz und Erholung • Baumartenanteile 	<ul style="list-style-type: none"> • heutig und künftig: Standortwasserbilanz in der forstlichen Vegetationszeit (Verrechnung nFK und KWB) • heutig und künftig: Nährstoffstufe • Trockenstressrisiko der Hauptbaumarten in Bezug zur höhen abhängige Niederschlags- und Temperaturverteilung --> Standortbasierte Zuordnung der WET 	8 Waldbauregionen
NRW	Waldbaukonzept -NRW	2019	Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz	praxisorientierte waldbauliche Empfehlungen	<ul style="list-style-type: none"> • Anwendungsmöglichkeiten • Grundlagen • Zielsetzung • Standortfaktoren • Zusammenstellung der Baumarten • Zuordnung in Waldentwicklungsphasen • Aufbau standortgerechter Mischbestände 	<ul style="list-style-type: none"> • Wasserverfügbarkeit: sickerwassergeprägt, stauwassergeprägt, grundwassergeprägt • Nährstoffversorgung: sehr nährstoffarm, nährstoffarm, mäßig nährstoffhaltig, nährstoffreich, sehr nährstoffreich • Vegetationszeit (für den 	23

					<ul style="list-style-type: none"> • Leitbild • Standort • Waldfunktionen 	Wald relevante mittlere Vegetationszeit in Tagen $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ Tagesmitteltemperatur) <ul style="list-style-type: none"> • Höhenstufe 	
Sachsen-Anhalt	Entscheidungshilfen zur klimaangepassten Baumartenwahl	20 20	Sachsen-Anhalt Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft und Energie NW-FVA	Leitfaden + Online Tool	<ul style="list-style-type: none"> • Leitbild • Sukzessionale Stellung/Naturnähe • Schutz und Erholung • Produktionsziele: Zielstärke und Sortimente • Baumartenanteile und Standortspektrum • Mischungsform • Klimawandel 	<ul style="list-style-type: none"> • nutzbaren Feldkapazität (nFK) • Klimatischen Wasserbilanz (KWB) • Standortswasserbilanz (SWB) • Nährkraftstufe • Standort • Höhenstufe 	43

3.3. Übersicht Grundlagen bestehende Tools mit Standortkriterien nach Bundesländern

Tabelle 3 - Übersicht der Grundlagen und bestehende Tools mit Standortkriterien nach Bundesländern geordnet (keine Angaben für Saarland und Mecklenburg-Vorpommern).

BUNDESLAND	KLIMAKARTEN	WET/WEZ/BZT	ONLINE-TOOL
Baden-Württemberg	Standortsbewertung: <ul style="list-style-type: none"> • Wassermangel: angegeben durch die relative Bodenwassersättigung im Wurzelraum: relative Füllung des Bodenwasserspeichers bezogen auf die nutzbare Feldkapazität Baumarteneignung: <ul style="list-style-type: none"> • Konkurrenz, Pfléglichkeit, Stabilität, Leistung 	Großlandschaften Baden-Württembergs: <ul style="list-style-type: none"> • Basis regionale Einheiten der forstlichen Standortkartierung • in Abhängigkeit der Waldentstehung und Sukzession 	/

Bayern	<ul style="list-style-type: none"> • Jahrestemperatur/-niederschlag: Kombination von Temperaturklassen mit Niederschlagsklassen ergeben Kombinationsmöglichkeiten in Form einer Matrix, anschließende Zuordnung von Anbaurisiko der Baumarten: <p>Klimakarte</p> <ul style="list-style-type: none"> • Einteilung Boden in Kategorien je nach Wasserspeicherkapazität • Berechnung des Wasserhaushaltsindex aus Klima, Geländemerkmale und Boden: Wasserhaushaltskarte • Vereinigung von Klimakarten und Wasserhaushaltskarten zu Baumartenkarte= Klimarisikokarte 	/	/
Brandenburg	<ul style="list-style-type: none"> • Ökologische Wasserbilanz = Niederschlag – potenzielle Verdunstung im Sommerhalbjahr • Wasserdefizit aus aktueller und potenzieller Evapotranspiration • Minimale Tagesmitteltemperatur (Nichtvegetationszeit) • „Spätfrostsumme“ (=Summe der Tagesminimumtemperaturen aller Tage mit Tagesminimumtemperatur <0°C in den Monaten April und Mai) • Feuchtstufen 	/	/
Hessen (NW-FVA)	<ul style="list-style-type: none"> • nutzbaren Feldkapazität (nFK) • Klimatischen Wasserbilanz (KWB) • Standortwasserbilanz (SWB) • Trophie 	<ul style="list-style-type: none"> • nFK • KWB • SWB • Trophie • Standort • Höhenrahmen 	<ul style="list-style-type: none"> • nFK • KWB • SWB • Trophie • Standort • Höhenrahmen
Niedersachsen (NW-FVA)	<ul style="list-style-type: none"> • nutzbaren Feldkapazität (nFK) • Klimatischen Wasserbilanz (KWB) • Standortwasserbilanz (SWB) • Trophie • Standort • Höhenrahmen • Baumeigenschaft: Trockenstressrisiko 	<ul style="list-style-type: none"> • heutig und künftig: Standortwasserbilanz in der forstlichen Vegetationszeit (Verrechnung nFK und KWB) • heutig und künftig: Nährstoffstufe • Trockenstressrisiko der Hauptbaumarten in Bezug zur höhenabhängige Niederschlags- und Temperaturverteilung 	/
NRW	<ul style="list-style-type: none"> • Boden (flächendeckende Datengrundlage aus Bodenkarten) 	<ul style="list-style-type: none"> • Wasserverfügbarkeit • Nährstoffversorgung 	<ul style="list-style-type: none"> • Online-Karte verfügbar, jedoch

	<ul style="list-style-type: none"> • Klima (Temperatur, Niederschlag, Verdunstung, Wärmehaushalt aus digitalem Klimaatlas NRW) • Relief (Sonnen- und Schattenhängen, Hangwasserzug) • Wasserhaushalt • Nährstoffhaushalt • Wärmehaushalt 	<ul style="list-style-type: none"> • Vegetationszeit (für den Wald relevante mittlere Vegetationszeit in Tagen ≥ 10 °C Tagesmitteltemperatur) • Höhenstufe 	nicht zu WETs, sondern mit Standortinformationen
Rheinland-Pfalz	<ul style="list-style-type: none"> • Vorkommen und Bonität der Hauptbaumarten entlang Klimagradient • Niederschlags in der Vegetationszeit und der Jahresmitteltemperatur (Klimamatrix) für das heutige und künftige mögliche Klima • Übertragung der Klimamatrix auf die Waldfläche • Zusammenführung der Hauptbaumarten und der Klimamatrix an den Standorten 	/	/
Sachsen	<ul style="list-style-type: none"> • Höhenstufen • Klimafeuchtestufen • Jahresniederschlag, Jahresmitteltemperatur • Niederschlag und Temperatur im Zeitraum Mai bis September • Vegetationszeitlänge (Tage > 10 °C) und Trockenheitsindizes • Klimatische Wasserbilanz (KWB) • Lage, Boden und Hydrologie des Standortes 	/	/
Sachsen-Anhalt (NW-FVA)	<ul style="list-style-type: none"> • nutzbaren Feldkapazität (nFK) • Klimatischen Wasserbilanz (KWB) • Standortwasserbilanz (SWB) • Nährkraftstufe • Standort • Höhenstufe 	<ul style="list-style-type: none"> • nFK • KWB • SWB • Nährkraftstufe • Standort • Höhenstufe 	<ul style="list-style-type: none"> • nFK • KWB • SWB • Nährkraftstufe • Standort • Höhenstufe
Schleswig-Holstein (NW-FVA)	<ul style="list-style-type: none"> • nutzbaren Feldkapazität (nFK) • Klimatischen Wasserbilanz (KWB) • Standortwasserbilanz (SWB) • Nährkraftstufe • Standort • Höhenstufe 	/	/

Thüringen	<p>Klimahüllenkonzept, ähnlich wie RLP</p> <ul style="list-style-type: none">• Vorkommen und Bonität der Hauptbaumarten entlang eines Klimagradienten• Niederschlags in der Vegetationszeit und der Jahresmitteltemperatur (Klimamatrix) für das heutige und künftige mögliche Klima• Übertragung der Klimamatrix auf die Waldfläche• Zusammenführung der Hauptbaumarten und der Klimamatrix an den Standorten	/	/
-----------	---	---	---

3.4. Detaillierte Übersicht Kriterien Tools und Karten

Tabelle 4 – Detaillierte Übersicht der Grundlagen und bestehende Tools mit Standortskriterien nach Bundesländern geordnet.

Bundesland	Klimakarte Baumarten	WET	Online-Tool	App	Klimakarten Standortskriterien	sWET	Online-Tool	Link
Baden-Württemberg	2019, 4BA, Fichte, Buche, Traubeneiche und Weißtanne	2014	/	x	Standortsbewertung: <ul style="list-style-type: none"> Wassermangel: angegeben durch die relative Bodenwassersättigung im Wurzelraum --> relative Füllung des Bodenwasserspeichers bezogen auf die nutzbare Feldkapazität (0-1) Baumarteneignung: <ul style="list-style-type: none"> Konkurrenz, Pfléglichkeit, Stabilität, Leistung 	Großlandschaften Baden-Württembergs: <ul style="list-style-type: none"> Basis regionale Einheiten der forstlichen Standortskartierung in Abhängigkeit der waldgeschichtlichen Entstehung und sukzessionalen Stellung 	/	Link
Bayern	2015, aktuell für 21 Baumarten vorhanden	/	/		<ul style="list-style-type: none"> Jahrestemperatur Jahresniederschlag --> Kombination von 7 Temperaturklassen mit 5 Niederschlagsklassen ergeben 35 Kombinationsmöglichkeiten in Form einer Matrix, anschließende Zuordnung von 7 Stufen Anbaurisiko der Baumarten --> Klimakarte <ul style="list-style-type: none"> Einteilung Boden in 3 Kategorien je nach Wasserspeicherkapazität Berechnung des Wasserhaushaltsindex aus Klima, Geländemerkmale und Boden --> Wasserhaushaltskarte Vereinigung von Klimakarten und Wasserhaushaltskarten zu Baumartenkarte= Klimarisikokarte 	/	/	Link und Link und Link

Fortsetzung der Tabelle 4

Bundesland	Klimakarte Baumarten	WET	Online-Tool	App	Klimakarten Standortskriterien	WET	Online-Tool	Link
Brandenburg	2020, 16BA, BAH = Bergahorn, BRU = Bergulme, DGL = Douglasie, ELA = Europäische Lärche, FRU = Feldulme, GBI = Gemeine Birke, GES = Gemeine Esche, HBU = Hainbuche, KTA = Küstentanne, REI = Roteiche, RER = Roterle, ROB = Robinie, SAH = Spitzahorn, VKI = Vogelkirsche, WLI = Winterlinde, WRU = Flatterulme	/	/		<ul style="list-style-type: none"> • Ökologische Wasserbilanz = Niederschlag – potenzielle Verdunstung im Sommerhalbjahr • Wasserdefizit aus aktueller und potenzieller Evapotranspiration (AET – PET) • Minimale Tagesmitteltemperatur (Nichtvegetationszeit) • „Spätfrostsumme“ (=Summe der Tagesminimumtemperaturen aller Tage mit Tagesminimumtemperatur <0°C in den Monaten April und Mai) • Feuchtestufen • Fünftelnährkraftstufe (A5, A4, ..., R2, R1) 	/	/	Link
Hessen	2018, 5BA, Fichte, Buche, Eiche, Douglasie, Kiefer	2020	2020		<ul style="list-style-type: none"> • nutzbaren Feldkapazität (nFK) • Klimatischen Wasserbilanz (KWB) • Standortswasserbilanz (SWB) • Trophie 	<ul style="list-style-type: none"> • nutzbaren Feldkapazität (nFK) • Klimatischen Wasserbilanz (KWB) • Standortswasserbilanz (SWB) • Trophie • Standort (Terrestrisch, hydromorph) • Höhenrahmen • Standortsspektrum: <ul style="list-style-type: none"> • Standortswasserbilanz, • Nährkraftstufe 	<ul style="list-style-type: none"> • nutzbaren Feldkapazität (nFK) • Klimatischen Wasserbilanz (KWB) • Standortswasserbilanz (SWB) • Trophie • Standort (Terrestrisch, hydromorph) • Höhenrahmen • Standortsspektrum: <ul style="list-style-type: none"> • Standortswasserbilanz, • Nährkraftstufe 	Link
Mecklenburg-Vorpommern	nichts gefunden	/	/		/	/	/	

Fortsetzung der Tabelle 4

Bundesland	Klimakarte Baumarten	WET	Online-Tool	App	Klimakarten Standortskriterien	WET	Online-Tool	Link
Niedersachsen	2018, 5BA, Fichte, Buche, Eiche, Douglasie, Kiefer	2019	/		<ul style="list-style-type: none"> • nutzbaren Feldkapazität (nFK) • Klimatischen Wasserbilanz (KWB) • Standortwasserbilanz (SWB) • Trophie • Standort (Terrestrisch, hydromorph) • Höhenrahmen Standortsspektrum: <ul style="list-style-type: none"> • Standortwasserbilanz, • Nährkraftstufe Baumeigenschaften <ul style="list-style-type: none"> • Trockenstressrisiko 	<ul style="list-style-type: none"> • heutig und künftig: Standortwasserbilanz in der forstlichen Vegetationszeit (Verrechnung nFK und KWB) • heutig und künftig: Nährstoffstufe • Trockenstressrisiko der Hauptbaumarten in Bezug zur höhenabhängige Niederschlags- und Temperaturverteilung --> Standortbasierte Zuordnung der WET 	/	Link
NRW	2020, 16 Baumarten (Douglasie, Lärche, Kiefer, Küstentanne, Weißtanne, Fichte, Schwarzerle, Sandbirke, Winterlinde, Vogelkirsche, Bergahorn, Buche, Esskastanie, Roteiche, Traubeneiche, Stieleiche)	2019	/		<p>https://www.gd.nrw.de/bo_dk_forststandortkarten.htm</p> <ul style="list-style-type: none"> • Boden (flächendeckende Datengrundlage aus Bodenkarten des GD NRW) • Klima (Temperatur, Niederschlag, Verdunstung, Wärmehaushalt aus digitalem Klimaatlas NRW) • Relief (Differenzierung von Sonnen- und Schattenhängen, Einfluss von Hangwasserzug) <p>zwei zusätzliche Varianten der Forstlichen Standortkarte auf Grundlage von Klimaprojektionen, die auf zwei ausgewählten Klimaszenarien für den Zeitraum 2071 bis 2100 basieren</p> <ul style="list-style-type: none"> • Wasserhaushalt • Nährstoffhaushalt • Wärmehaushalt 	<ul style="list-style-type: none"> • Wasserverfügbarkeit: sickerwassergeprägt, stauwassergeprägt, grundwassergeprägt • Nährstoffversorgung: sehr nährstoffarm, nährstoffarm, mäßig nährstoffhaltig, nährstoffreich, sehr nährstoffreich • Vegetationszeit (für den Wald relevante mittlere Vegetationszeit in Tagen ≥ 10 °C Tagesmitteltemperatur) • Höhenstufe 	<ul style="list-style-type: none"> • Online-Karte verfügbar, jedoch nicht zu WETs, sondern mit Standortinformationen 	Link und Link

Fortsetzung der Tabelle 4

Bundesland	Klimakarte Baumarten	WET	Online-Tool	App	Klimakarten Standortskriterien	WET	Online-Tool	Link
Rheinland-Pfalz	2019, 5BA, Traubeneiche, Buche, Fichte, Douglasie, Kiefer	/	/		<p>https://www.kwis-rlp.de/fileadmin/website/klimakompetenzzentrum/Klimawandelinformationssystem/Handlungsfelder/Wald/Klimaeignungskarten_HBA.pdf</p> <ul style="list-style-type: none"> • Vorkommen und Bonität der Hauptbaumarten entlang eines Klimagradients • Niederschlags in der Vegetationszeit und der Jahresmitteltemperatur (Klimamatrix) für das heutige und künftige mögliche Klima --> 112 möglichen Klassenkombination • Übertragung der Klimamatrix auf die Waldfläche • Zusammenführung der Hauptbaumarten und der Klimamatrix an den Standorten 	/	/	Link
Saarland	nichts gefunden	/	/		/	/		
Sachsen	2007	/	/		<ul style="list-style-type: none"> • Höhenstufen • Klimafeuchtestufen • Jahresniederschlag, Jahresmitteltemperatur, • Niederschlag und Temperatur im Zeitraum Mai bis September • Vegetationszeitlänge (Tage > 10 °C) und Trockenheitsindizes • Klimatische Wasserbilanz (Niederschlag - pot. Verdunstung) • Kombination aus Klassen der Klimatischen Wasserbilanz in der Vegetationszeit mit Klassen der Vegetationszeitlänge • Lage, Boden und Hydrologie des Standortes 	/	/	

Fortsetzung der Tabelle 4

Bundesland	Klimakarte Baumarten	WET	Online-Tool	App	Klimakarten Standortskriterien	WET	Online-Tool	Link
Sachsen-Anhalt	2019, 5BA, Eiche, Douglasie, Kiefer, Fichte, Buche	2020	2020		<ul style="list-style-type: none"> • nutzbaren Feldkapazität (nFK) • Klimatischen Wasserbilanz (KWB) • Standortwasserbilanz (SWB) • Nährkraftstufe • Standort (Terrestrisch, hydromorph) • Höhenstufe Standortspektrum: <ul style="list-style-type: none"> • Standortwasserbilanz, • Nährkraftstufe 	<ul style="list-style-type: none"> • nutzbaren Feldkapazität (nFK) • Klimatischen Wasserbilanz (KWB) • Standortwasserbilanz (SWB) • Nährkraftstufe • Standort (Terrestrisch, hydromorph) • Höhenstufe Standortspektrum: <ul style="list-style-type: none"> • Standortwasserbilanz, • Nährkraftstufe 	<ul style="list-style-type: none"> • nutzbaren Feldkapazität (nFK) • Klimatischen Wasserbilanz (KWB) • Standortwasserbilanz (SWB) • Nährkraftstufe • Standort (Terrestrisch, hydromorph) • Höhenstufe Standortspektrum: <ul style="list-style-type: none"> • Standortwasserbilanz, • Nährkraftstufe 	Link
Schleswig-Holstein	2019, 5BA, Fichte, Buche, Eiche, Douglasie, Kiefer	/	/		<ul style="list-style-type: none"> • nutzbaren Feldkapazität (nFK) • Klimatischen Wasserbilanz (KWB) • Standortwasserbilanz (SWB) • Nährkraftstufe • Standort (Terrestrisch, hydromorph) • Höhenstufe Standortspektrum: <ul style="list-style-type: none"> • Standortwasserbilanz, • Nährkraftstufe 	/	/	Link
Thüringen	2007	/	/		Klimahüllenkonzept, ähnlich wie RLP <ul style="list-style-type: none"> • Vorkommen und Bonität der Hauptbaumarten entlang eines Klimagradienten • Niederschlags in der Vegetationszeit und der Jahresmitteltemperatur (Klimamatrix) für das heutige und künftige mögliche Klima • Übertragung der Klimamatrix auf die Waldfläche • Zusammenführung der Hauptbaumarten und der Klimamatrix an den Standorten 	/	/	Link

Fortsetzung der Tabelle 4

Bundesland	Klimakarte Baumarten	WET	Online-Tool	App	Klimakarten Standortskriterien	WET	Online-Tool	Link
Niedersachsen	2018, 5BA, Fichte, Buche, Eiche, Douglasie, Kiefer	2019	/		<ul style="list-style-type: none"> • nutzbaren Feldkapazität (nFK) • Klimatischen Wasserbilanz (KWB) • Standortswasserbilanz (SWB) • Trophie • Standort (Terrestrisch, hydromorph) • Höhenrahmen Standortsspektrum: <ul style="list-style-type: none"> • Standortwasserbilanz, • Nährkraftstufe Baumeigenschaften <ul style="list-style-type: none"> • Trockenstressrisiko 	<ul style="list-style-type: none"> • heutig und künftig: Standortwasserbilanz in der forstlichen Vegetationszeit (Verrechnung nFK und KWB) • heutig und künftig: Nährstoffstufe • Trockenstressrisiko der Hauptbaumarten in Bezug zur höhenabhängige Niederschlags- und Temperaturverteilung --> Standortbasierte Zuordnung der WET 	/	Link
NRW	2020, 16 Baumarten (Douglasie, Lärche, Kiefer, Küstentanne, Weißtanne, Fichte, Schwarzerle, Sandbirke, Winterlinde, Vogelkirsche, Bergahorn, Buche, Esskastanie, Roteiche, Traubeneiche, Stieleiche)	2019	/		<p>https://www.gd.nrw.de/bo_dk_forststandortkarten.htm</p> <ul style="list-style-type: none"> • Boden (flächendeckende Datengrundlage aus Bodenkarten des GD NRW) • Klima (Temperatur, Niederschlag, Verdunstung, Wärmehaushalt aus digitalem Klimaatlas NRW) • Relief (Differenzierung von Sonnen- und Schattenhängen, Einfluss von Hangwasserzug) <p>zwei zusätzliche Varianten der Forstlichen Standortkarte auf Grundlage von Klimaprojektionen, die auf zwei ausgewählten Klimaszenarien für den Zeitraum 2071 bis 2100 basieren</p> <ul style="list-style-type: none"> • Wasserhaushalt • Nährstoffhaushalt • Wärmehaushalt 	<ul style="list-style-type: none"> • Wasserverfügbarkeit: sickerwassergeprägt, stauwassergeprägt, grundwassergeprägt • Nährstoffversorgung: sehr nährstoffarm, nährstoffarm, mäßig nährstoffhaltig, nährstoffreich, sehr nährstoffreich • Vegetationszeit (für den Wald relevante mittlere Vegetationszeit in Tagen ≥ 10 °C Tagesmitteltemperatur) • Höhenstufe 	<ul style="list-style-type: none"> • Online-Karte verfügbar, jedoch nicht zu WETs, sondern mit Standortinformationen 	Link

