



Scopus Indexed Journal

Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz – Forest Ecology, Landscape Research and Nature Conservation

www.afsv.de/index.php/waldoekologie-landschaftsforschung-und-naturschutz


Synopse von Bundesländerverfahren zur Beurteilung der forstlichen Baumarteneignung im Klimawandel

Synopsis of methods for the assessment of tree species suitability under climate change used by the German federal states

Lukas Baumbach, Norbert Kühl, Wolfgang Falk, Nico Frischbier, Erich Fritz, Rainer Gemballa, Hans Hamkens, Philipp Reiter, Jens Schröder, Eric Andreas Thurm, Alexander Weller & Axel Albrecht

Abstract

Tree species suitability assessments serve foresters as an important decision-making tool for the selection of site-adapted species, including regeneration planning under climate change conditions. This requires a comprehensive assessment covering a wide range of suitability aspects such as climate and soil conditions, mortality risks due to extreme events and pests, adaptability, growth performance, economic efficiency and the provision of ecosystem services. In the past, many such assessment approaches were developed at the level of the German federal states, resulting in a variety of different methods with different thematic priorities. To date, these methods have not been compared systematically with each other. This article provides a synopsis of the tree species suitability approaches of 13 German federal states. Particularly, we describe and compare the different aspects of suitability, methodological components, suitability classes and climatic sensitivity of the methods. In addition, we give an outlook on transferability and further development of the methods.

In summary, most of the methods are based on site mapping data and have a dynamic climate component that allows for a projection of tree species suitability under future climate conditions. However, some methods are still heavily dependent on static and non-formalized expert assessments. These need to be gradually converted into a reproducible, rule-based form and, as far as possible, be backed up with (quantitative) data to make the approaches updatable. Particularly for the assessment of tree species mortality risks and productivity there are opportunities to expand largely expert-based assessments with dynamic model-based approaches. Importantly, further development of the assessment approaches also requires improved data availability

with a focus on high-resolution, updated site mapping data.

Keywords: *methodological comparison, tree species selection, forest planning, site mapping, climate change, silvicultural risk*

Zusammenfassung

Baumarteneignungsbeurteilungen dienen der Forstpraxis als wichtige Entscheidungshilfe zur Auswahl standortangepasster Arten, u. a. zur Verjüngungsplanung unter Klimawandelbedingungen. Dafür ist eine umfassende Einschätzung nötig, die Aspekte wie Klima- und Bodenbedingungen, Mortalitätsrisiken durch Extremereignisse und Schädlinge, Anpassungsfähigkeit, Wuchsleistung, Wirtschaftlichkeit und Bereitstellung von Ökosystemleistungen beinhaltet. Hierzu haben sich im Laufe der Zeit bundeslandspezifische Bewertungsansätze entwickelt, welche teils unterschiedliche inhaltliche Schwerpunkte setzen und verschiedene Methoden verwenden. Bisher wurden die Verfahren kaum miteinander verglichen. Dieser Artikel widmet sich erstmals der Synopse der Baumarteneignungsansätze aller deutschen Flächenbundesländer entlang des gesamten Herleitungsprozesses. Hierbei werden inhaltliche Eignungsaspekte, methodische Komponenten, Gesamteignungsklassen und Klimadynamik der Verfahren systematisch erfasst und miteinander verglichen. Zudem wird ein Ausblick auf Übertragungs- und Weiterentwicklungsmöglichkeiten der Verfahren gegeben.

Aus der Zusammenschau wird ersichtlich, dass die meisten Verfahren auf Daten der Standortkartierungen basieren und zudem eine klimadynamische Komponente besitzen, sodass sie die Baumarteneignung auch unter zukünftigen Klimabedingungen abbilden können. Allerdings sind Teile der Verfahren immer noch stark abhängig von statischen und schwer nachvollziehbaren gutachterlichen Einschätzungen. Diese gilt es nach und nach in eine reproduzierbare,

regelbasierte Form zu überführen und soweit möglich mit (quantitativen) Daten zu hinterlegen, um Objektivität und Anpassbarkeit der Verfahren zu steigern. Unterschiede und Erweiterungsmöglichkeiten bestehen vor allem hinsichtlich Risiko- und Leistungsbewertung der Baumarten. Nicht zuletzt erfordert eine Weiterentwicklung auch eine Verbesserung der Datenlage. Hier sollte der Fokus vor allem auf der Bereitstellung hochaufgelöster, aktualisierter Daten aus der Standortkartierung liegen.

Schlüsselwörter: Methodenvergleich, Baumartenwahl, Waldplanung, Standortkartierung, Klimawandel, Anbaurisiko

1 Einleitung

Angesichts der projizierten zukünftigen Klimaentwicklung bis zum Ende des 21. Jahrhunderts (HÜBENER et al. 2017, BRIENEN et al. 2020, IPCC 2023) und der in den letzten Jahren auf den Klimawandel zurückgeführten Waldschäden (BMEL 2024) steht die Forstpraxis aktuell vor Fragen der Wiederbewaldung von Schadflächen und des Waldumbaus hin zu wärme- und trockenoleranten Baumarten. Die dabei zu berücksichtigenden Faktoren beinhalten Klima- und Bodenbedingungen, Mortalitätsrisiken durch Extremereignisse und Schädlinge, Anpassungsfähigkeit, Wuchsleistung, Pflegeaufwand und Wirtschaftlichkeit sowie die Erfüllung vielfältiger Ökosystemleistungen (REIF et al. 2009). Geleitet wird die Forstpraxis dabei unter anderem durch die Baumarteneignungsbeurteilungen auf Länderebene, welche von den Bundesländern eigenverantwortlich für die jeweilige Landesfläche erarbeitet werden. Durch diese föderale Arbeitsweise können regional unterschiedliche Bedingungen im engen Austausch mit der Praxis fein herausgearbeitet werden. Gleichzeitig sind im Laufe der Zeit dadurch teilweise sehr unterschiedliche und regional optimierte Verfahren zur Herleitung der Baumarteneignung entstanden. Diese beruhten in der Vergangenheit lange Zeit auf statischen forstlichen Standortkarten in Verbindung mit Eignungstabellen. Die Grundlage dafür bildeten zumeist kleinräumige empirische Erkenntnisse, da auf lokaler Ebene Boden und Lage den Einfluss großräumiger, weitestgehend konstanter Klimabedingungen überprägten. Im Rahmen des rasant voranschreitenden Klimawandels verlor diese lokale Empirie jedoch zunehmend ihre Gültigkeit. Stattdessen trat die klimatische Eignung als Grundvoraussetzung für die Baumartenwahl in den Vordergrund. In der Folge setzte in den Bundesländern ein Anpassungsprozess ein, in welchem die Bundesländer innerhalb der letzten drei Jahrzehnte fortwährend aktualisiert, ergänzt und dynamisiert wurden (TIEBEL & AXER 2021).

Bislang standen die Baumarteneignungsbeurteilungen der Bundesländer allerdings größtenteils isoliert nebeneinander. Dabei liegt in der Gesamtheit aller Verfahren eine große methodische und inhaltliche Breite vor, die großes Potenzial zur Erweiterung der individuellen Verfahren und der Steigerung ihrer Robustheit im Hinblick auf die unsichere zukünftige Klimaentwicklung bietet. Durch bisherige synoptische Studien zu den Standortkartierungsverfahren der Länder (WOLFF et al. 1999, SCHMIDT et al. 2015, ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG 2016, PETZOLD et al. 2016, PETZOLD & BENNING 2017) und Maßnahmen zur Anpassung der Landeswälder an den Klimawandel (TIEBEL & AXER 2021) wurden bereits erste Schritte unternommen, um z. B. Boden- bzw. Standortinformationen der Länder bundesweit einheitlich darstellen

zu können. Diese Ländervergleiche setzen jedoch vor bzw. nach dem eigentlichen Prozess der Baumarteneignungsbeurteilung an. Nach AMERELLER et al. (2009) ist aber gerade ein Vergleich der Methodik der Bewertungsverfahren von großer Relevanz, um zwischen den Ländern abweichende Baumartenempfehlungen zu verstehen und eine Zusammenarbeit der Länder im Umgang mit den Herausforderungen des Klimawandels zu stärken.

Dieser Artikel bietet eine vergleichende Übersicht über aktuelle Länderverfahren zur Baumarteneignung. Hierbei sollen folgende Forschungsfragen untersucht werden:

1. Welche inhaltlichen Eignungsaspekte sind in den Eignungsverfahren vorhanden?
2. Wie verläuft der Herleitungsprozess von Eingangsdaten über Ableitungsverfahren und Indikatorwerten bis hin zur Gesamteignung und waldbaulichen Interpretation?
3. Wie werden zukünftige klimatische Änderungen in den Verfahren berücksichtigt? Welche Komponenten sind klimadynamisch?

Anhand dieser Kernfragen werden zunächst Gemeinsamkeiten und Unterschiede zwischen den einzelnen Verfahren herausgestellt. Im Anschluss werden aktuelle Entwicklungen zur Verbesserung der Eignungsempfehlungen dargestellt und mögliche gegenseitige Lern- und Übertragungsmöglichkeiten der Verfahren diskutiert.

2 Material und Methoden

Die Basis für den Vergleich stellen die Bewertungsansätze der forstlichen Forschungsinstitutionen aller deutschen Flächenbundesländer dar. Dazu zählen Baden-Württemberg (BW), Bayern (BY), Brandenburg (BB), Hessen (HE), Mecklenburg-Vorpommern (MV), Niedersachsen (NI), Nordrhein-Westfalen (NRW), Rheinland-Pfalz (RP), Saarland (SL), Sachsen (SN), Sachsen-Anhalt (ST), Schleswig-Holstein (SH) und Thüringen (TH). Einen Sonderfall bilden dabei die Bundesländer Hessen, Niedersachsen, Sachsen-Anhalt und Schleswig-Holstein, welche gemeinschaftlich durch die Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (NW-FVA) beraten werden.

Als erster Schritt wurde zunächst eine Literatursammlung aus Publikationen, die die aktuell verwendeten Länderverfahren und ihre Einzelkomponenten (z. B. Standortkartierung, forstliche Klimagliederung, Risikomodelle, etc.) inhaltlich und methodisch beschreiben, zusammengestellt (Tab. 1). Dies wurde durch weiterführende Informationen im Austausch mit den forstlichen Forschungsinstitutionen ergänzt. Auf dieser Grundlage wurden sodann für alle Bewertungsansätze Flussdiagramme erstellt, welche die Herleitung der jeweiligen Gesamt-Baumarteneignung systematisch in

- a) Eingangsvariablen,
- b) Ableitungsverfahren,
- c) Indikatorwerte und
- d) Eignungskomponenten

strukturieren und deren Abhängigkeiten untereinander sichtbar machen. Im Anschluss daran wurden alle Verfahren

systematisch aus verschiedenen Perspektiven miteinander verglichen. Ein inhaltlicher Vergleich erfolgte dabei über die abgedeckten Themenfelder, welche für die Eignungsbeurteilung berücksichtigt wurden, nachfolgend als „Eignungsaspekte“ bezeichnet (z. B. Klimabedingungen oder Nährstoffversorgung). Folgende Beispiele verdeutlichen den Zusammenhang zwischen Eignungsaspekten (Themenfeld der Eignung) und den zuvor genannten Eignungskomponenten (methodische Bausteine für die Gesamteignung).

- Beispiel 1: Die Eignungskomponente „Anbaurisiko Moore“ deckt gleichzeitig die Eignungsaspekte „Wasserhaushalt“ und „Trophie“ ab.
- Beispiel 2: Der Eignungsaspekt „Wasserhaushalt“ wird durch die Eignungskomponenten „Bodenfeuchtestufe“, „Wasserhaushaltsstufe“ und „Substrattyp“ beschrieben.

Zudem wurden aus einer technischen Perspektive heraus die verwendeten Daten- und Methodentypen verglichen, welche zur Herleitung von Eignungskomponenten verwendet wurden (z. B. modellgestützte Analysen oder gutachterliche Beurteilungen). Als dritte Vergleichsebene diente die Zielgröße der Eignung und deren Klassenausprägungen, welche die Empfehlung für die Praxis darstellen (z. B. Beurteilung des Anbaurisikos einer Baumart auf einer 3-stufigen Skala von gering bis hoch). Die Art, wie die Eignungsempfehlungen schließlich in die Praxis einfließen können, wurde aus der Perspektive der waldbaulichen Interpretation heraus verglichen. Zuletzt wurden alle Verfahren auch auf ihre Berücksichtigung des Klimawandels analysiert. Dabei lag der Fokus insbesondere auf der Klimasensitivität der Verfahren, getroffenen Annahmen, Selektionen von Klimaszenarien und Betrachtungszeiträumen, dem Umgang mit Unsicherheit und damit letztendlich der Fähigkeit der Verfahren, auf den Klimawandel abgestimmte Bewertungen vornehmen zu können.

Tab. 1: Literaturüberblick zu den Baumarteneignungsverfahren der betrachteten Bundesländer.

Tab. 1: Literature overview of tree species suitability assessment approaches of the studied federal states.

Bundesland und Forschungsinstitution	Quelle(n)	Informationen
Baden-Württemberg <i>Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg (FVA-BW)</i>	<i>CULLMANN (2019)</i>	Beschreibung des multikriteriellen dynamisierten Eignungsverfahrens
	<i>ALDINGER & MICHIELS (1997)</i>	Erläuterungen zu Konkurrenz und Pfleglichkeit
	<i>YUE et al. (2016), HÄNDEL & CULLMANN (2019), PUHLMANN et al. (2019), KAUTZ & HÄNDEL (2019), ALBRECHT & ALMEHASNEH (2019), YUE et al. (2019)</i>	Beschreibung der einzelnen Wirkmodelle zu Artverbreitung, Wasserhaushalt bzw. Trockenstress, Buchdruckerrisiko, Sturmrisiko und Bonitätsänderung
	<i>MLR BADEN-WÜRTTEMBERG (2024)</i>	Herleitung der Risikostufen für die Waldentwicklungstypen
Bayern <i>Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF)</i>	<i>TAEGER et al. (2016)</i>	Herleitung Gesamtanbaurisiko
	<i>FALK & MELLERT (2011), THURM et al. (2018), FALK et al. (2019), THURM & FALK (2019)</i>	Beschreibung des Ansatzes zur Artverbreitungsmodellierung
	<i>LWF (2019), LWF (2020)</i>	Zusätzliche Informationen für Forstpraktiker (Leistung etc.)
	<i>BECK et al. (2012), HÄRING et al. (2012), HÄRING (2013), OSENSTETTER et al. (2013)</i>	Herleitung der Datengrundlagen
Brandenburg <i>Landeskompetenzzentrum Forst Eberswalde (LFE)</i>	<i>MLUK BRANDENBURG (2022)</i>	Baumartenmischungstabellen nach Standort
	<i>SCHRÖDER et al. (2023)</i>	Herleitung Baumarteneignung
Mecklenburg-Vorpommern <i>Landesforstanstalt Mecklenburg-Vorpommern (LFOA-MV)</i>	<i>THURM & WIRNER (2023)</i>	Herleitung Baumarteneignung
	<i>MLU MECKLENBURG-VORPOMMERN (2018)</i>	Beschreibung der forstlichen Klimagliederung
Nordrhein-Westfalen <i>Landesbetrieb Wald und Holz Nordrhein-Westfalen (LB WH NRW)</i>	<i>ASCHE (2001), MULNV NORDRHEIN-WESTFALEN (2021)</i>	Eignungsmatrix Baumarten, Mischungsanteile Waldentwicklungstypen
	<i>DWORSCHAK & SCHULTE-KELLINGHAUS (2018), SCHULTE-KELLINGHAUS et al. (2020)</i>	Herleitung der Eingangsvariablen

Hessen, Niedersachsen, Sachsen-Anhalt, Schleswig-Holstein <i>Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (NW-FVA)</i>	<i>HAMKENS et al. (2022)</i> <i>BURESCH et al. (2023)</i>	Übersicht zum generellen aktuellen Eignungsverfahren
	<i>DÖBBELER et al. (2020)</i>	Baumartenwahl Hessen
	<i>BÖCKMANN et al. (2019)</i>	Baumartenwahl Niedersachsen
	<i>HAMKENS et al. (2020)</i>	Baumartenwahl Sachsen-Anhalt
	<i>BÖCKMANN et al. (2024)</i>	Baumartenwahl Schleswig-Holstein
Rheinland-Pfalz <i>Forschungsanstalt für Wald-ökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz (FAWF)</i>	<i>VASCONCELOS et al. (2013)</i>	Beschreibung des Klimateignungskarten-Ansatzes, Beschreibung des dynamischen Wassershaushaltsindex
	<i>KLEBER et al. (2022)</i>	Beschreibung des Klimahüllen-Ansatzes
	<i>GAUER (2009), LANDESFORSTEN RHEINLAND-PFALZ (2021)</i>	Beschreibung des Standortinformations-systems zur Unterstützung der Baumartenwahl im Klimawandel (StOIS-BAE)
Saarland <i>SaarForst Landesbetrieb (SFL)</i>	<i>SAARFORST LANDESBETRIEB & MUV SAARLAND (2021)</i>	Generelle Beschreibung der landesweiten Waldentwicklungstypen
Sachsen <i>Staatsbetrieb Sachsenforst Kompetenzzentrum Wald und Forstwirtschaft (SBS-KWuF)</i>	<i>SACHSENFORST (2013)</i>	Ableitung von Waldentwicklungstypen aus der forstlichen Standortkartierung
	<i>GEMBALLA & SCHLUTOW (2007), GEMBALLA & EISENHAUER (2016)</i>	Herleitung der dynamischen forstlichen Klimagliederung
	<i>SCHLUTOW & GEMBALLA (2008), GEMBALLA et al. (2016)</i>	Herleitung der Leitwaldgesellschaften und Arealverschiebung unter Klimawandel
	<i>SCHLUTOW et al. (2024)</i>	
Thüringen <i>Forstliches Forschungs- und Kompetenzzentrum Gotha, ThüringenForst-AöR (FFK Gotha)</i>	<i>SCHLUTOW et al. (2009), FRISCHBIER et al. (2010)</i>	Beschreibung der Komponenten des Eignungsverfahrens
	<i>FRISCHBIER & PROFFT (2008), PROFFT & FRISCHBIER (2008), FRISCHBIER et al. (2010)</i>	Berücksichtigung des Klimawandels im Eignungsverfahren
	<i>FFK GOTH A (2015a), FFK GOTH A (2015b)</i>	Herleitung Baumarteneignung und Anspruchsmatrix
alle	<i>ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG (2016)</i>	Beschreibung und Vergleich der Standortskartierungsverfahren aller Bundesländer
	<i>BENNING et al. (2015)</i>	Erläuterung der Standortbeschreibungen aus der Standortkartierung (Ziffern und Buchstaben)

3 Ergebnisse

3.1 Eignungsaspekte

Über alle Länderverfahren hinweg dominieren als übergeordnete Eignungsaspekte die Themen klimatische Eignung, Wasserhaushalt, Nährstoffversorgung, Mortalitätsrisiken (biotisch und abiotisch), Wuchseistung, waldbauliche Aspekte und Naturnähe (siehe Tab. 2A). Dabei fokussieren sich Methoden zur Bestimmung der klimatischen Eignung insbesondere auf die Toleranzbereiche der Baumarten hinsichtlich zumeist großräumiger mittlerer Klimabedingungen (im Sinne der Makroökologie und Niscentheorie). Diese werden in allen Ländern über Temperatur und Niederschlag

beschrieben, oft als abgeleitete Variablen wie Vegetationszeitlänge (VZ) oder klimatische Wasserbilanz (KWB). Gelegentlich werden sie mit der nutzbaren Feldkapazität (nFK) oder auch topographischen Informationen (z. B. Exposition, Höhenstufe, geographische Lage) ergänzt. Dem Eignungsaspekt Wasserhaushalt lassen sich hingegen Methoden zuordnen, welche kleinstandörtliche Unterschiede in der Bodenwasserverfügbarkeit untersuchen. Dafür werden unter anderem Informationen zu Grund- oder Stauwasser-einfluss, Substrattypen (und deren Wasserhaltevermögen) sowie Gelände und damit verbundenen Trockenstressrisiken herangezogen. Aspekte der Nährstoffversorgung fließen durch die Betrachtung chemischer Bodeneigenschaften (z. B. pH-Wert, Basensättigung, freier Kalk), Substratinformationen

oder auch Zeigervegetation in die Eignungsbeurteilung ein. Mortalitätsrisiken finden über die Länderverfahren hinweg auf verschiedene Art und Weise Berücksichtigung. So gibt es methodische Ansätze zur jeweils individuellen Beurteilung abiotischer Risikofaktoren (z. B. Extremereignisse wie Sturm oder Überflutung in BW und BY), biotischer Risikofaktoren (z. B. Borkenkäfermodell in BW) und aggregierter/unspezifischer Risiken (z. B. gutachterliche Risikobeurteilung in BB, NRW, RP und TH). Überdies spielt auch die Wuchsleistung als Eignungsaspekt eine Rolle, abgebildet durch methodisch recht unterschiedlich hergeleitete Bonitätsschätzungen. Der Aspekt der Naturnähe findet in vielen Fällen über Indikatoren wie die potentielle natürliche Vegetation (PNV) Eingang in die Eignungsbeurteilungen. Nicht zuletzt werden auch waldbauliche und betriebswirtschaftliche Aspekte z. B. hinsichtlich Konkurrenzstärke, Pflegeaufwand (Verjüngung, Durchforstung) oder ökonomischer Überlegungen berücksichtigt. Insgesamt werden die Aspekte Klima, Wasserhaushalt und Trophie von fast allen Länderansätzen für die Ermittlung der Gesamteignung einbezogen (siehe Abb. 2). Alle anderen Aspekte finden nur jeweils in etwa der Hälfte aller Länderansätze Berücksichtigung.

Zudem ist zu berücksichtigen, dass die einzelnen Eignungsaspekte miteinander in Verbindung stehen und durch die Länderverfahren verschiedentlich im Bewertungsverfahren angeordnet werden. So werden beispielsweise im Verfahren der NW-FVA und in Nordrhein-Westfalen aus standörtlichen Aspekten sequentiell Risiko und Leistung abgeleitet (über Trockenstressmatrix bzw. Anspruchsmatrix). Im Beispiel von Baden-Württemberg hingegen findet eine parallele modellgestützte Beurteilung der grundlegenden klimatischen Standortseignung (über ein Artverbreitungsmodell), der Leistung (über ein Bonitätsmodell) und möglicher Mortalitätsrisiken (Sturmmodell, Borkenkäfermodell für Fichte) statt.

3.2 Herleitungsprozess

Bei der Mehrzahl der Verfahren liefern die Standortskartierungen (forstliche Standortskartierung, Bodenkartierungen) eine wichtige Datengrundlage zur Ableitung von Eignungskomponenten (Abb. 1A-D). Dies trifft insbesondere bei den Eignungsaspekten Wasserhaushalt und Nährstoffversorgung zu. Gleichzeitig haben einige Länder begonnen, diese dort nur in Form großflächiger Standortspolygone zur Verfügung stehenden Daten mittels verschiedener statistischer Methoden auf eine feinere räumliche Auflösung zu skalieren (z. B. BY, HE). In anderen Bundesländern erfolgte die Standortskartierung historisch räumlich sehr fein aufgelöst und wird aktuell um Kennziffern zum Bodenwasserhaushalt ergänzt (z. B. SN, TH). Teilweise werden auch Messwerte z. B. aus Bodenprofilen erhoben und entweder den Standorteinheiten hinterlegt oder zur Präzisierung und Validierung herunterskalierter Rasterdaten genutzt. Als Ausgangsinformation zur Beschreibung klimatischer Parameter dienen wiederum vornehmlich Rasterdaten aus Klimaprojektionen, d. h. Outputs von (globalen) Klimamodellen unter Annahme eines bestimmten Emissionsszenarios. Des Weiteren werden zur Kalibrierung und Plausibilitätsprüfung der Verfahren in Einzelfällen auch Beobachtungsdaten benutzt. Auch diese im Original oft grobskaligen Daten werden teilweise zur feineren räumlichen Differenzierung von Standorten über Algorithmen herunterskaliert.

Zur Herleitung von Eignungskomponenten aus den Eingangsvariablen bedienen sich die Bundesländer einer großen Vielfalt an Methoden. Diese lassen sich grob in drei Typen unterteilen:

- a) modellgestützte Analysen,
- b) standardisierte expertenbasierte Klassifikation (z. B. Regeln, Matrizen, Entscheidungsbäume)
- c) nicht-standardisierte Expertenempfehlungen.

Modellgestützte Analysen werden bisher vor allem zur Beurteilung der klimatischen Eignung und Mortalitätsrisiken genutzt. Dazu zählen Artverbreitungsmodelle (BW, BY, RP) sowie Modelle zum Sturmrisiko, Borkenkäferbefallsrisiko und der Wuchsleistung (alle BW). Zudem findet das BERN-Modell (SCHLUTOW & HÜBENER 2004) zur Einschätzung des natürlichen Entwicklungspotenzials der Waldgesellschaften in Sachsen und Thüringen Anwendung (Abb. 1D). Die Mehrheit der Eignungsaspekte wird über standardisierte expertenbasierte Klassifikationsverfahren hergeleitet (siehe Abb. 2). Dies beginnt bei der Erhebung von Eingangsdaten aus der Standortskartierung, welche oftmals bereits eine Klassifikation von Standortseigenschaften in Stufen vornimmt (z. B. Bodenwasserhaushalt, Klimastufe, Bodenform und Trophie in BB, MV, SN und TH). In manchen Verfahren werden zudem als weiterer Verarbeitungsschritt Risikostufen für einzelne Baumarten abgeleitet. Dies geschieht auf Basis von Zuordnungstabellen und Entscheidungsbäumen, die empirische Beobachtungen, Erkenntnisse aus der Literatur und gutachterliche Einschätzungen vereinigen. Beispiele hierfür sind die Standortfaktoren-Tabelle in Bayern, welche je Baumart eine gutachterliche Einschätzung hydrologischer und die Basenversorgung betreffender Anbaurisiken vornimmt; die Trockenstressrisikostufen in Hessen, Niedersachsen, Sachsen-Anhalt und Schleswig-Holstein; die Herleitung der Stabilität über einen Entscheidungsbaum in Baden-Württemberg oder auch die Meidung von Fichte auf azonalen Standorten in Thüringen auf der Basis von Schadensanalysen nach dem Wintersturm Kyrill (CLASEN et al. 2008). Aus den Klassifikationsverfahren resultieren schließlich Indikatorwerte, welche als Bewertungskriterien in die Gesamteignung einfließen. Diese sind in allen Verfahren ordinal skaliert mit i. d. R. drei bis sechs möglichen Ausprägungen (in Einzelfällen bis zu neun). Im Laufe der Zeit wurde die Stufenanzahl teilweise erweitert, um z. B. neuen klimatischen Bedingungen in Zukunft gerecht zu werden.

Die anschließende Zusammenführung der einzelnen Eignungsaspekte in eine Gesamteignungsempfehlung erfolgt in den meisten Verfahren über expertenbasierte Standort-Baumart/Waldtyp Zuordnungsmatrizen (MV, NRW, RP, SL, SN, TH). Diese folgen häufig dem Schema „Standorttyp A bei Klimatyp X ergibt die Beurteilung ‚geeignet‘ für Baumart 1 und die Beurteilung ‚möglich‘ für Baumart 2“. Als weitere Aggregationsmethodik werden kumulative, regelbasierte Verfahren verwendet. Diese treten in unterschiedlichen Erscheinungsformen wie Entscheidungsbäumen oder mehrstufigen Beurteilungen auf (BW, BB, HE/NI/ST/SH, RP). Beim Verfahren der NW-FVA dienen beispielsweise neben einer generellen Erstbeurteilung über eine Zuordnungsmatrix zusätzliche regelbasierte Einstufungen als Hilfswerkzeug, um Anpassungen für die vier Trägerländer z. B. im Hinblick auf standörtliche Besonderheiten oder strategische Ziele einzubetten. In Rheinland-Pfalz existieren aktuell sogar drei

parallele Eignungsansätze, welche verschiedene Schwerpunkte setzen. So kombiniert eine Klimaeignungsmatrix für fünf Hauptbaumarten Wuchsleistung und klimatische Eignung (VASCONCELOS et al. 2013), ein Klimahüllenansatz analysiert die klimatische Eignung für weitere Baumarten (KLEBER et al. 2022) und ein Ansatz auf Basis der Standortskartierung und eines Wasserhaushaltsmodells (WASIM-ETH 8.2) berücksichtigt die vier Komponenten Wärmestufe, Wasserhaushaltsstufe, Hydromorphie und Substratreihe (LANDESFORSTEN RHEINLAND-PFALZ 2021). Einen weiteren Sonderfall bildet das bayerische Verfahren, welches die Einzelrisikobeurteilungen über das Liebigsche Gesetz des Minimums ableitet: der am stärksten limitierende Risikofaktor bestimmt dort die Gesamteignung.

Die Gesamteignung bezieht sich in den Bundesländern entweder auf einzelne Baumarten oder Bestandstypen (wie z. B. Waldentwicklungstypen, Bestockungszieltypen, Waldentwicklungsziele, usw.). Beurteilungen von einzelnen Baumarten werden dabei über Kriterien wie Anbaurisiko, Vitalität oder Dominanz im Bestand vorgenommen. Dementsprechend können die resultierenden Eignungsklassen Ausprägungen wie geringes/erhöhtes/hohes Risiko, geeignet/möglich/ungeeignet oder führende Baumart/Mischbaumart/Begleit- bzw. Nebenbaumart annehmen (siehe Tab. 3). Empfehlungen zu Mischbestandstypen lassen wiederum oft Rückschlüsse auf die Eignung der einzelnen Baumarten innerhalb des Bestandes zu, was in der Regel über ihre Dominanz und dementsprechende Mischungsanteile ausgedrückt wird. Während auf dieser gröberen Ebene eine größere Unschärfe bei den Empfehlungen zu einzelnen Baumarten entsteht, sind im Gegenzug oft Konkurrenzbeziehungen bereits berücksichtigt. Diese fehlen wiederum oft in den baumartenbezogenen Ansätzen bzw. werden der Einschätzung durch die Waldbesitzenden überlassen. Trotz Unterschieden in der Bezugsebene der Gesamteignung nehmen alle Verfahren eine Abstufung in mindestens drei Klassen vor, welche als Entscheidungshilfe für die Praxis dienen soll. Die waldbauliche Interpretation dieser Eignungsklassen ist dabei eher auf Wachstumspotenziale einzelner Baumarten bzw. langfristige Entwicklungsziele hin zu klimawandelangepassten Beständen ausgelegt. Zudem sind die Eignungsbeurteilungen häufig fördermittelrelevant und werden zum Teil auch mit Waldzertifizierungsstandards (z. B. FSC, PEFC) verknüpft.

3.3 Berücksichtigung des Klimawandels

Zukünftige klimatische Entwicklungen sind auf vielfältige Weise in die Bewertungsansätze eingebunden. Hauptunterschiede entstehen hier bei der Auswahl der globalen Klimamodelle (GCMs), Regionalisierungen (z. B. durch regionale Klimamodelle oder statistische Downscaling-Verfahren), Emissionsszenarien (z. B. hinsichtlich Treibhausgaskonzentrationen, Strahlungsantrieb und Szenariengeneration), Klimaperioden, der Berücksichtigung der bestehenden Bandbreite möglicher Klimaszenarien und deren Einwertung als Einzellauf oder Aggregation zu Ensembles (Tab. 2B). Die Bezugsperioden der zukünftigen Empfehlungen variieren dabei zwischen Projektionen für die mittlere (ca. 2041–2070) und ferne Zukunft (ca. 2071–2100). Der Großteil der Verfahren realisiert dabei aktuell nur einen dieser beiden Zeiträume. Etwa die Hälfte aller Ansätze verwendet mehrere Klimaprojektionen (siehe Tab. 2, Teil B). Diese werden in manchen Fällen einzeln zur Bewertung der zukünftigen Baumarteneignung eingesetzt (z. B. BY, RP). In anderen Fällen sind

mehrere Klimaprojektionen zu einem Ensemble zusammengefasst und bilden gemeinsam die Bewertungsgrundlage (BW, HE/NI/ST/SH, NRW). Einen Sonderfall stellt hierbei das Verfahren der NW-FVA dar, welches über die Verwendung mehrerer Klimäläufe (Kernensemble-Auswahl aus dem ReKliEs-De Referenzensemble, siehe HÜBENER et al. 2017) innerhalb eines Emissionsszenarios und einer Klimaperiode zusätzlich zur Einzelempfehlung von Baumarten eine Bewertung der Robustheit von Waldentwicklungstypen bereitstellt. Der überwiegende Teil der verwendeten Klimadaten geht auf die CMIP5 Generation (RCP-Szenarien) zurück (FLATO et al. 2014). In vier Bundesländern (MV, RP, SN, TH) werden Daten der CMIP4 Generation (SRES-Szenarien) genutzt, in Sachsen ist eine Umstellung auf ein RCP-Szenario bereits in Umsetzung. Die meisten der genutzten Klimaszenarien entstammen dem DWD-Kernensemble v2018 (DWD, 2024). Der Fokus liegt dabei auf dem Emissionsszenario RCP8.5, teilweise ergänzt mit RCP4.5. Neben dem Aspekt der klimatischen Eignung wirken diese Klimadaten in manchen Verfahren auch auf verknüpfte Aspekte wie Wasserhaushalt, Leistung und Mortalitätsrisiken (BW und NRW). Da beim brandenburgischen Verfahren keine direkte Kopplung der Eignung an Klimaprojektionsdaten besteht, werden Klimawandeleffekte dort durch eine Verschiebung der Standorte in ein trockeneres Standortcluster simuliert. Im Saarland hingegen werden zukünftige Klimaentwicklungen über bestehende Erkenntnisse zur Klimawandeltoleranz einzelner Baumarten in unterschiedlichen Waldentwicklungstypen gutachterlich in die Eignungsempfehlung mit einbezogen und eine Orientierung an Erfahrungen anderer Länder angestrebt.

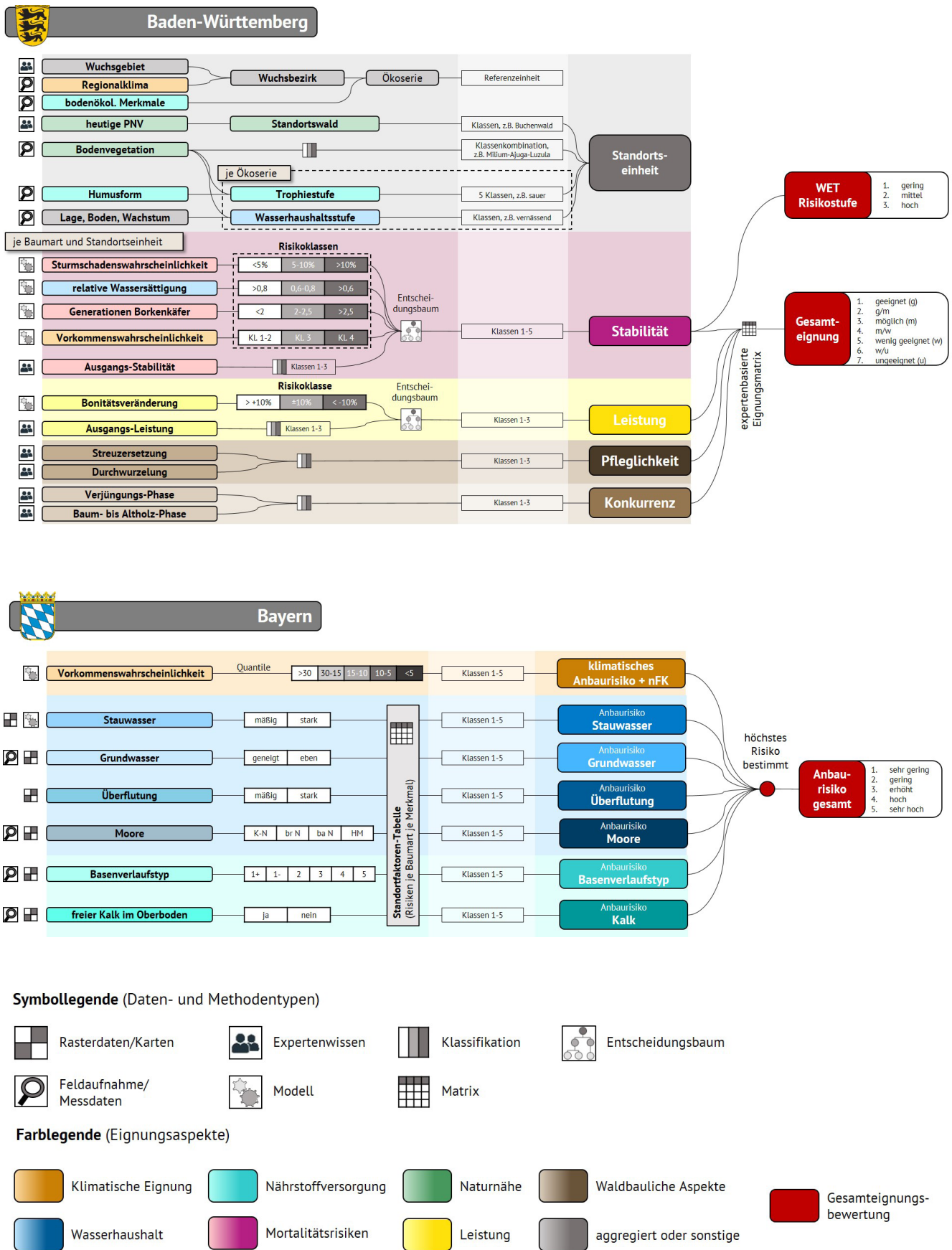


Abb. 1A: Flussdiagramme zur Herleitung der Eignungsbewertung in Baden-Württemberg und Bayern (Abkürzungen siehe Text).

Fig. 1A: Flowcharts showing the suitability assessment process of Baden-Württemberg and Bavaria (for abbreviations see main text).

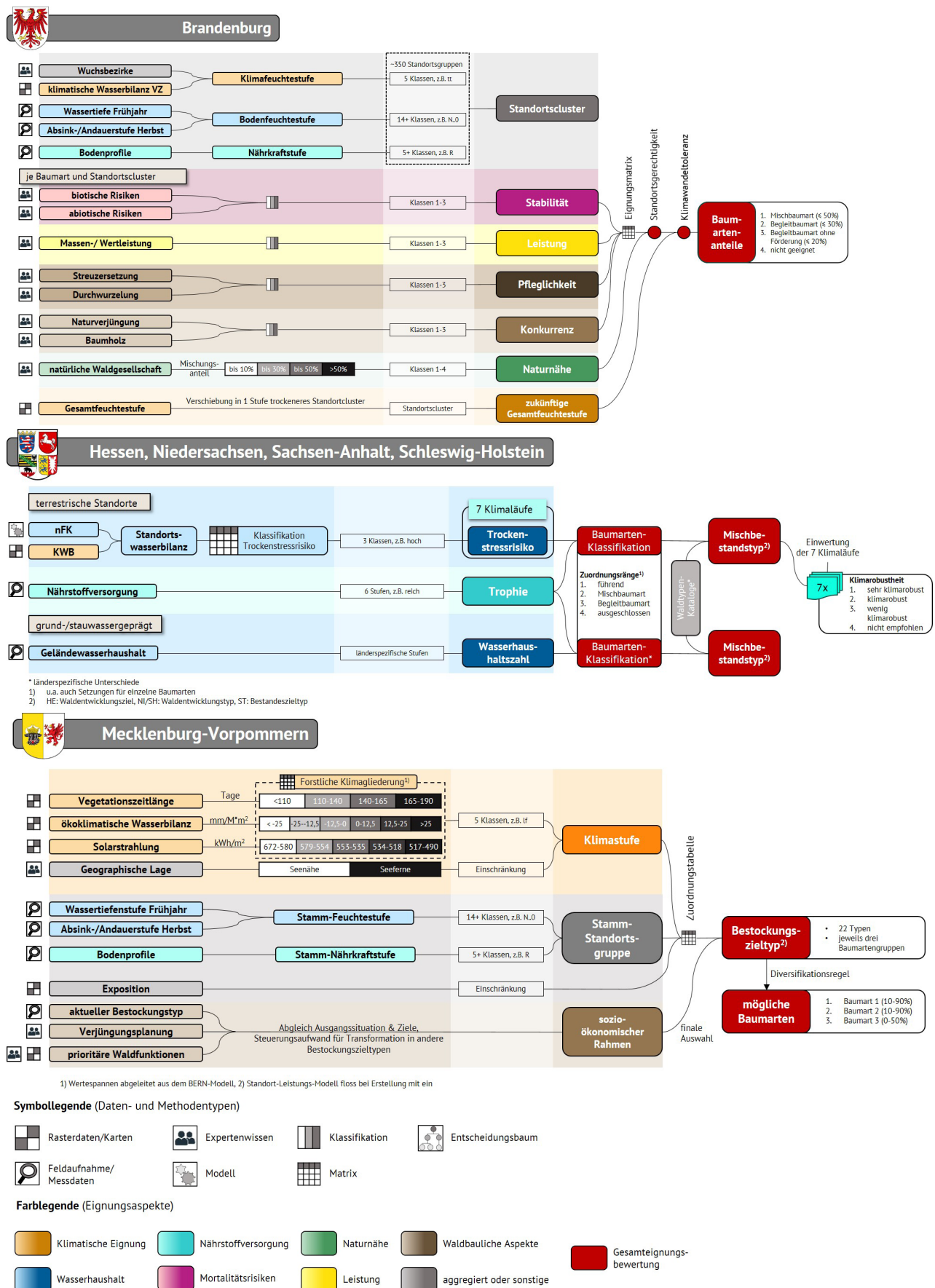


Abb. 1B: Flussdiagramme zur Herleitung der Eignungsbewertung in Brandenburg, Hessen, Niedersachsen, Sachsen-Anhalt, Schleswig-Holstein und Mecklenburg-Vorpommern (Abkürzungen siehe Text).

Fig. 1B: Flowcharts showing the suitability assessment process of Brandenburg, Hesse, Lower Saxony, Saxony-Anhalt, Schleswig-Holstein and Mecklenburg-Western Pomerania (for abbreviations see main text).

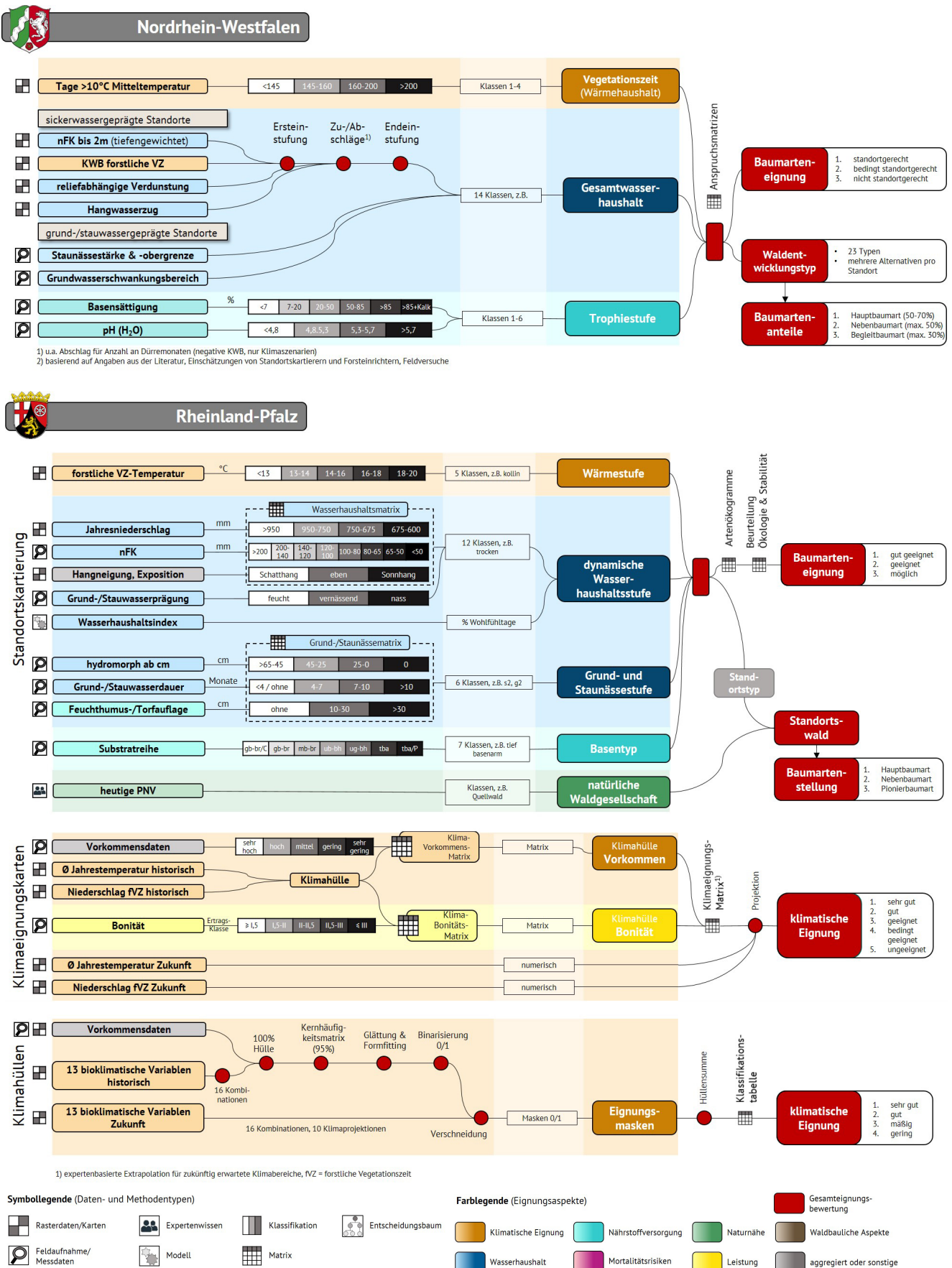


Abb. 1C: Flussdiagramme zur Herleitung der Eignungsbewertung in Nordrhein-Westfalen und Rheinland-Pfalz (Abkürzungen siehe Text).

Fig. 1C: Flowcharts showing the suitability assessment process of North Rhine-Westphalia and Rhineland-Palatinate (for abbreviations see main text).

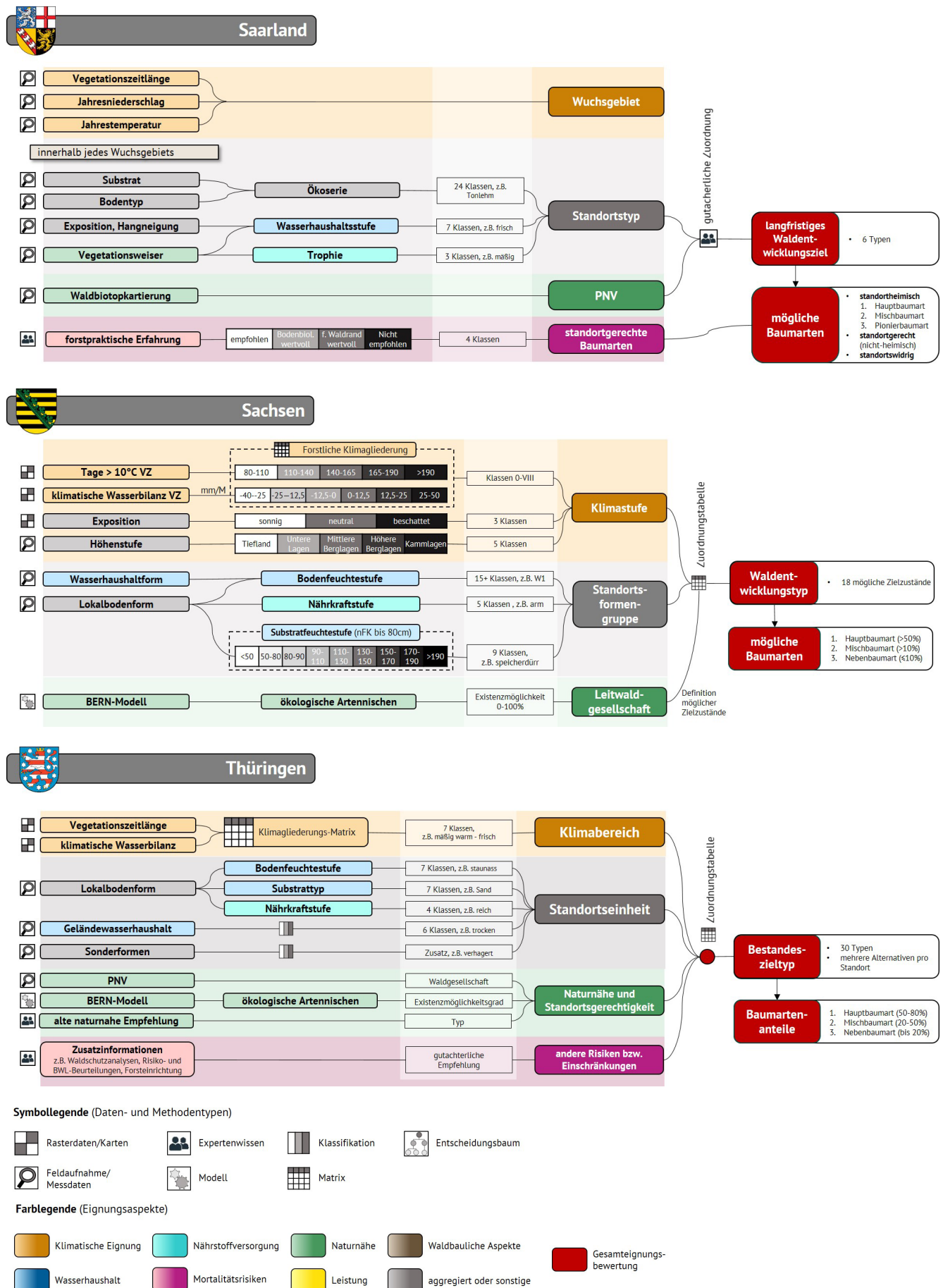


Abb. 1D: Flussdiagramme zur Herleitung der Eignungsbewertung im Saarland, in Sachsen und in Thüringen (Abkürzungen siehe Text).

Fig. 1D: Flowcharts showing the suitability assessment process of Saarland, Saxony and Thuringia (for abbreviations see main text).

Tab. 2A: Berücksichtigung verschiedener Eignungsaspekte durch die Länderverfahren. Farbcode: rot = nicht-standardisierte gutachterliche Beurteilung, gelb = standardisiertes expertenbasiertes Verfahren, türkis = teils expertenbasiert, teils modellgestützte Methode, blau = modellgestützte Methode. Sternchen (*): klimadynamische Elemente. KE = Klimaeignungs-Ansatz, KH = Klimamahüllen-Ansatz, StOKa = Standortskartierungs-Ansatz, (a) = bisherige Version, (b) = in Umsetzung).

Tab. 2A: Suitability aspects covered by the approaches of the federal states. Color legend: red = non-standardized expert-based assessment, yellow = standardized expert-based method, turquoise = partly expert-based, partly model-based method, blue = model-based method. An asterisk (*) marks climate sensitive elements. KE = climate suitability approach, KH = climate envelope approach, StOKa = approach based on site mapping. (a) = current version, (b) = implementation pending.

	Klimatische Eignung	Wasserhaushalt	Nährstoffversorgung	Mortalitätsrisiken	Naturnähe	Leistung	Waldbauliche Aspekte	Beurteilte Zeiträume
BW	Artverbreitungsmodell*	Trockenstressmodell (LWF-Brook90)*	Trophiestufe (optional)	Borkenkäfermodell*, Sturmschadensmodell	Standortswald (zu Standorteinheit)	Bonitätsmodell*	Pfleglichkeit, Konkurrenz	2041-2070, 2071-2100
BY	Artverbreitungsmodell*	Anbaurisiko Stau-, Grundwasser, Überflutung, Moore	Anbaurisiko Basenverlauftyp, Kalk, Moore	Anbaurisiko Überflutung	-	-	-	1991-2020, 2071-2100
BB	Gesamtfeuchtestufe	Bodenfeuchtestufe	Nährkraftstufe	Stabilität	Natürliche Waldgesellschaft	Massen-/Wertleistung	Pfleglichkeit, Konkurrenz	1961-1990, ca. 2051-2100
HE, NI, ST, SH	Standortswasserbilanz*	Standortswasserbilanz*, Wasserhaushaltsstufe (Wasserhaushaltsziffer, Geländewasserhaushalt, etc.)	Trophie (länderspezifisch)	-	WET-Beschreibung	implizit in Trockenstressrisikomatrix	WET-Beschreibung	2041-2070, 2071-2100
MV	Klimastufe*	Feuchtestufe	Nährkraftstufe	-	BZT-Beschreibung (Naturnähe)	Teil des BZT (mit StandortLeistungs-Modell hergeleitet)	Sozioökonomischer Rahmen, BZT-Beschreibung (Bestandesaufbau und -behandlung)	1981-2010, 2041-2100
NRW	Wärmehaushalt*	Gesamtwasserhaushalt*	Trophiestufe	implizit in Ampelsystem	-	implizit in Ampelsystem	WET-Beschreibung	1981-2010, 2071-2100
RP	Klimahülle Vorkommen*, Klimahülle Bonität*	-	-	-	-	Klimahülle Bonität*	-	1971-2000, 2021-2050, 2071-2100
	Klimahüllen*	-	-	-	-	-	-	1986-2015, 2071-2100
StOKa	Wärmestufe*	Wasserhaushaltsstufe (dynamisiert mit Modell WASIM)*, Stau-/Grundnässe	Substratreihe (Basentyp)	Stabilitätsstufe	Standortswald	-	Konkurrenz	1961-2000, 2021-2050, 2071-2100
SL	gutachterliche Beurteilung	Wasserhaushaltsstufe (via Vegetationsweiser)	Trophie (via Vegetationsweiser)	-	PNV	-	-	ca. 1960-1990
SN	Klimastufe*	Bodenfeuchtestufe, Substratfeuchtestufe	Nährkraftstufe	-	BERN-Modell	-	Zielzustände (z. B. Verjüngung)	1971-2000 (a), 2091-2100 (a), 2011-2020 (b), 2041-2070 (b)
TH	Klimabereich*	Bodenfeuchtestufe, Substratfeuchtestufe, Geländewasserhaushalt	Nährkraftstufe	gutachterliche Beurteilung	PNV Karte, BERN-Modell	gutachterliche Beurteilung	gutachterliche Beurteilung	2041-2070

Tab. 2B: Genutzte Klimadaten für die Projektion der Eignungskomponenten im Klimawandel (GCM = globales Klimamodell).**Tab. 2B:** Climate data used for projecting suitability components under climate change (GCM = global climate model).

	Klima- periode	GCM	Regionali- sierung	Emissions- szenario	Ensemble?	Genutzt für
BW	2021–2050, 2071–2100	MPI-ESM	REMO	RCP4.5, 8.5	nein	Trockenstressmodell, Borkenkäfermodell, Bonitätsmodell
	2041–2060, 2061–2080	HadGEM2-ES	-	RCP4.5, 8.5	nein	Artverbreitungsmodell (BAE 2.0)
	2041–2060, 2061–2080	CM5A-LR, GISS- E2-R, HadGEM2-CC, IPSL, MPI-ESM-LR	-	RCP4.5, 8.5	Ja, Mittelung der Eingangs- Klimadaten	Artverbreitungsmodell (BAE 2.1)
BY	2071–2100	EC-EARTH, MPI-ESM	CCLM4, RCA4	RCP4.5, 8.5	Ja, Mittelung der Modellergebnisse je Emissions- szenario	Artverbreitungsmodell
BB	pauschale Verschiebung in trockeneres Standortcluster				nein	Gesamtfeuchtestufe
HE, NI, ST, SH	2041–2070 2071–2100	EC-EARTH, Had-GEM2, MIROC, MPI-ESM	CCLM4, RACMO , WETTREG, WRF	RCP8.5	Ja, Aggregation der Gesamteignung	Standortswasserbilanz
MV	2041–2100	ECHAM5	REMO-UBA	SRES-A1B	nein	Klimastufe
NRW	2071–2100	CanESM2, EC-EARTH, HadGEM2-ES, MIROC5, MPI-ESM-LR	CCLM4, RACMO, REMO, WRF	RCP4.5, 8.5	Ja, Mittelung der Eingangs- Klimadaten	Wärmehaushalt, Gesamtwasserhaushalt
RP	2021–2050, 2071–2100	EC-EARTH, HadGEM, MIROC5, MPI-ESM	CCLM4, RACMO, RCA4, WRF	RCP8.5	Ja, Summierung der Modellergebnisse je Emissionsszenario	Klimahüllen
	2021–2050, 2071–2100	MPI-ESM	WETTREG	SRES-A1B	nein	Klimahülle Vorkom- men, Klimahülle Bonität, Wärme- stufe, dynamische Wasserhaushaltsstufe
SL	expertenbasierte Beurteilung zukünftiger klimatischer Verhältnisse				nein	Beurteilung standorts- gerechte Baumarten
SN	2091–2100	ECHAM5	WEREX V	SRES-B1	nein	Klimastufe (bisherige Version)
	2041–2070	ECHAM6	WEREX VI	RCP8.5	nein	Klimastufe (neue Ver- sion, in Umsetzung)
TH	2041–2070	ECHAM5	WETTREG	SRES-A1B	nein	Klimabereich

4 Diskussion & Ausblick

4.1 Datengrundlagen

Für alle Länderansätze sind klimatische und bodenökologische Eingangsdaten unerlässlich. Die Verfügbarkeit und Eigenschaften dieser Eingangsdaten bestimmt somit auch

die Analysemöglichkeiten sowie die räumliche und zeitliche Genauigkeit der Eignungsbewertung. Die genutzten Klimadaten für Zukunftsszenarien sind dabei allesamt aus globalen Klimamodellen abgeleitet. Diese arbeiten auf einer sehr groben räumlichen Auflösung von meist mehreren Grad (ARIAS et al. 2021). Dadurch können sie über lange Zeiträume (bis zu mehreren hunderttausend Jahren) rechnen und eine

Tab. 3: Vergleich der Gesamteignungsklassen und deren Bedeutung (KE = Klimaeignungs-Ansatz, KH = Klimahüllen-Ansatz, StOKa = Standortkartierungs-Ansatz).

Tab. 3: Comparison of suitability classes and their meaning (KE = climatic suitability approach, KH = climate envelope approach, StOKa = approach based on site mapping).

Bundesland	Bezugsgröße der Empfehlung	Stufennamen	Waldbauliche Interpretation
BW	Baumart (Eignung)	① geeignet, ② geeignet/möglich, ③ möglich, ④ möglich/wenig geeignet, ⑤ wenig geeignet, ⑥ wenig geeignet/ungeeignet, ⑦ ungeeignet	Einschränkungen für den Anbau, Verknüpfung mit potentiellen Mischungsanteilen als führende, beigemischte oder temporäre Art
	Mischbestand (Anbaurisiko)	① gering, ② mittel, ③ hoch	Gefährdungs- bzw. Störungspotenzial (ursprünglich für die namensgebende Hauptbaumart)
BY	Baumart (Anbaurisiko)	① sehr gering, ② gering, ③ erhöht, ④ hoch, ⑤ sehr hoch	Einschränkungen für den Anbau, ursprünglich Verknüpfung mit potentiellen Mischungsanteilen von sehr gering bis führend für Hauptbaumarten
BB	Baumart (Mischungsanteil)	① Mischbaumart, ② Begleitbaumart, ③ nicht geeignet	Maximale Mischungsanteile
HE, NI, ST, SH	Baumart (Mischungsanteil)	① führend, ② Mischbaumart, ③ Begleitbaumart, ④ ausgeschlossen	Baumartenstellung im Bestand
	Mischbestand (mit Baumartenanteilen)	① sehr klimarobust, ② klimarobust, ③ wenig klimarobust, ④ ausgeschlossen	Anbaurisiko unter Klimawandel, Förderrelevanz in HE und ST
MV	Mischbestand (mit Baumartenanteilen)	① geeignet, ② ungeeignet	Grober Rahmen für Artenwahl, limitierte Kombinationsmöglichkeiten über Baumartengruppen
	Baumartenanteile (in Mischbestand)	① Baumart 1, ② Baumart 2, ③ Baumart 3	Minimale und maximale Mischungsanteile
NRW	Baumart (Eignung)	① standortgerecht, ② bedingt standortgerecht, ③ nicht standortgerecht	Vitalität und Anbaurisiko
RP	KE Baumart (Eignung)	① sehr gut geeignet, ② gut geeignet, ③ geeignet, ④ bedingt geeignet, ⑤ nicht geeignet	Leistungsniveau
	KH Baumart (Eignung)	① sehr gut, ② gut, ③ mäßig, ④ gering	Generelle klimatische Eignung
	StOKa Baumart (Eignung)	① gut geeignet, ② geeignet, ③ möglich	Konkurrenzstärke (ökologische Eignung) und Ausfallrisiko (Stabilität)
SL	Baumart (Mischungsanteil)	① Hauptbaumart, ② Mischbaumart, ③ Pionierbaumart	Baumartenstellung im Bestand
SN	Mischbestand (mit Baumartenanteilen)	① empfohlen, ② nicht empfohlen	Vitalster, durchsetzungsstärkster und forstwirtschaftlich umsetzbarer Waldtyp
	Baumart (Mischungsanteil)	① Hauptbaumart, ② Mischbaumart, ③ Nebenbaumart	Minimale und maximale Mischungsanteile
TH	Mischbestand (mit Baumartenanteilen)	① empfohlen, ② nicht empfohlen	mehrere alternative Waldbilder zur Auswahl, Förderrelevanz
	Baumart (Mischungsanteil)	① Hauptbaumart, ② Mischbaumart, ③ Nebenbaumart	Minimale und maximale Mischungsanteile

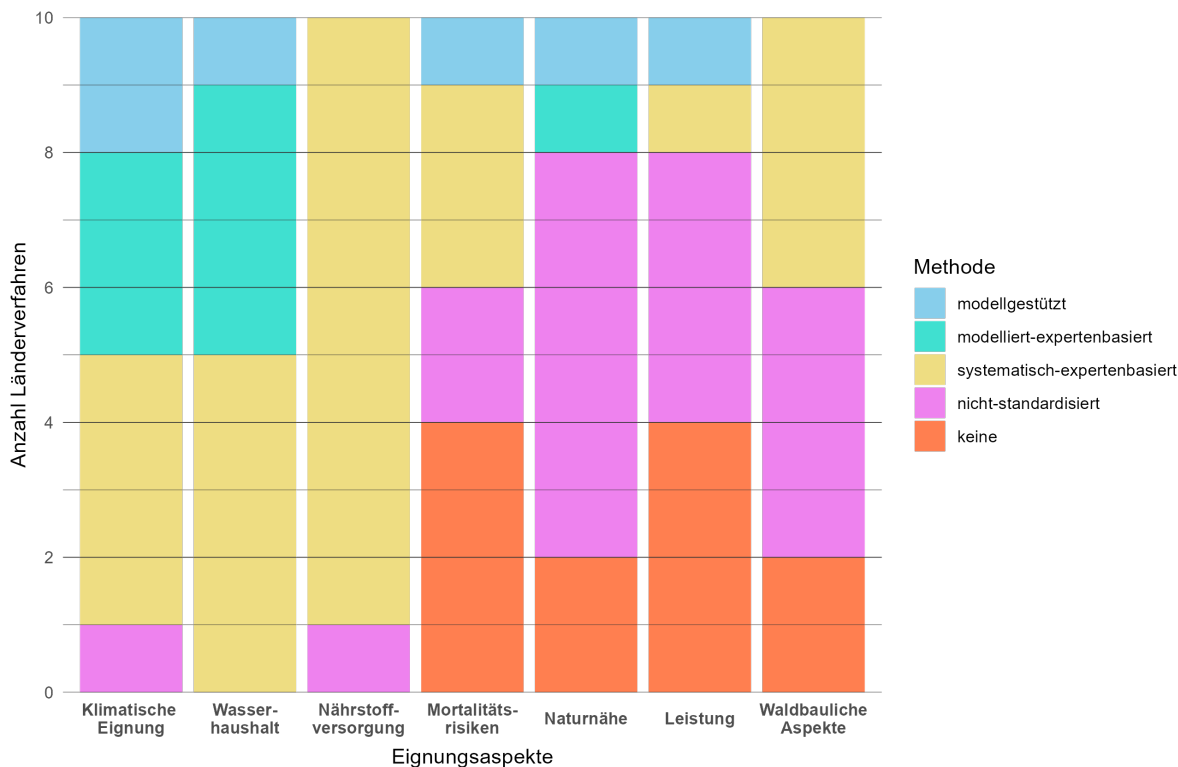


Abb. 2: Häufigkeit genutzter Methodentypen je Eignungsaspekt.

Fig. 2: Count chart of method types used for each suitability aspect.

zeitlich hohe Auflösung (bis hin zu stündlichen Daten) bieten. Die erzeugten Outputs sind in diesem Format noch nicht für eine regionale Anwendung nutzbar, können aber unter Zuhilfenahme regionaler Klimamodelle oder statistischer Downscaling-Methoden (z. B. unter Verwendung von Geländemodellen) auf räumliche Auflösungen von Kilometern bis hin zu wenigen Metern gebracht werden. Hiervon macht die Mehrzahl der Länderverfahren Gebrauch, wenngleich sich Datenquellen und Regionalisierungsmethoden unterscheiden. Letztlich bleiben Klimadaten aber vor allem auf kleinräumiger Ebene mit großen Unsicherheiten behaftet, u. a. auch in Hinblick auf das Mikroklima und Bestandsinnenklima, und werden in absehbarer Zeit weiterhin die Genauigkeit der Baumarteneignungsbeurteilung einschränken.

Bodendaten werden größtenteils über Standortskartierungen aufgenommen. Diese liegen über die Länder hinweg in unterschiedlichen räumlichen Aufnahmedichten vor (PETZOLD et al. 2016). Während immer höher aufgelöste Fernerkundungsverfahren zumindest zur Verbesserung der aktuellen Aufnahme meteorologischer Kenngrößen beitragen können (BERGER et al. 2012, NAGEL et al. 2020), ist dies aufgrund der geringen Oberflächendurchdringung zur Erhebung von Bodendaten nur bedingt nützlich (BABAEIAN et al. 2019, ABDULRAHEEM et al. 2023). Daher bleibt die Aufnahme von Bodendaten im Feld, z. B. im Rahmen der Standortskartierung, von prioritärer Bedeutung für die Baumarteneignungsbeurteilung. Während bisherige Standortsaufnahmen zumeist von einer relativen Konstanz der beobachteten Umweltbedingungen ausgingen, ist im Zuge des Klimawandels mit einer teilweise recht schnellen Veränderung von Standorten zu rechnen (BOLTE et al. 2009). Im Umkehrschluss wird damit auch eine dynamisierte Bereitstellung von bodenökologischen Daten notwendig. Dies ist nicht allein auf Basis der Standortskartierung möglich, welche durch den enormen Arbeitsaufwand in

manchen Bundesländern noch Lücken aufweist und nur über längere Zeiträume hinweg aktualisiert werden kann (PETZOLD et al. 2016). Als Hilfsmittel könnten hier z. B. machine-learning Ansätze dienen, die auf Basis von geologischen und bodenkundlichen Karten, Geländemodellen und Klimadaten eine Abschätzung von Bodeneigenschaften erlauben (ZIRLEWAGEN & WILPERT 2011, BEHRENS et al. 2014, BALTENSWEILER et al. 2021, ZIRLEWAGEN 2021, FRANKENBERG et al. 2024). Durch Verknüpfung mit bestehenden Monitoringverfahren wie der Bodenzustandserhebung wäre zudem eine fortlaufende flächige Aktualisierung denkbar. Auch dynamische Einschätzungen zum Wasserhaushalt könnten in Zukunft mithilfe von Modellen hergeleitet werden. Hierfür wurde beispielsweise in Baden-Württemberg, Bayern, Niedersachsen und Sachsen-Anhalt bereits die Nutzung des Wasserhaushaltsmodells LWF-Brook90 getestet (WEIS et al. 2023).

4.2 Fachwissen und Modellansätze

Die aktuellen Methoden zur Baumarteneignungsbeurteilung basieren in den meisten Bundesländern auf gutachterlichen Einschätzungen von Fachleuten der Forstwissenschaften, Standortskunde oder Ökologie. Dies trifft insbesondere auf die Zuordnung von Baumarten bzw. Waldtypen zu Standorten zu. Diese Zuordnungsschemata sind in vielen Fällen historisch gewachsen (z. B. geprägt von wissenschaftlichen Erkenntnissen und forstpolitischen Strömungen) und wurden über die Jahre hinweg verfeinert und erweitert. Einerseits kann auf dieser Basis ein breites Spektrum an Informationsquellen wie z. B. Literatur, Labor- und Feldversuche, Anbauerfahrungen anderer Länder, etc. qualitativ zusammengeführt werden. Andererseits sind die Zuordnungen oft nur bedingt nachvollziehbar bzw. reproduzierbar, da die zugrundeliegenden gutachterlichen Einschätzungen i. d. R.

nicht auf klar definierter Datengrundlage erfolgen. Weiterhin ist davon auszugehen, dass sich Klima-Standort-Kombinationen verändern werden - und damit auch empirisch ermittelte ökologische Zusammenhänge für die Arteneignung (BASCOMPTÉ et al. 2019, KHAROUBA & WILLIAMS 2024). Infolgedessen wird es notwendig, klimasensitive (z. B. niederschlags- und temperaturabhängige) Elemente der Baumarteneignung so weit wie möglich zu dynamisieren und zu objektivieren. Dazu sollten quantitative Ansätze genutzt werden, um Expertenwissen datengetrieben zu hinterlegen. Modellgestützte Methoden können diese Anforderungen erfüllen, indem sie unter anderem:

1. projizierte Klimaänderungen dynamisch berücksichtigen
2. kontinuierliche Wertebereiche aufspannen, die graduelle Änderungen messbar machen
3. es ermöglichen, Hypothesen zur Interaktion mehrerer Faktoren zu testen (MARÉCHAUX et al. 2021).

Darüber hinaus sollten sich Artencharakterisierungen (wie sie beispielsweise momentan in Baumarteneignungstabellen hinterlegt sind) so weit wie möglich auf ökologisch relevante Messwerte stützen. So könnten Zusammenhänge von Art-Umwelt-Interaktionen über artspezifische funktionale Eigenschaften („functional traits“) wie Hitzeempfindlichkeit (z. B. des Photosystems II), hydraulische Kapazität (z. B. Turgorverlustpunkt, Xylemwasserpotential) oder Toleranz gegenüber Trockenheit und Nährstoffmangel (z. B. über KWB und Basentyp) abgebildet und in eine nachvollziehbare und messbare Form gebracht werden (MELLERT et al. 2018, LEUSCHNER 2024).

Nichtsdestotrotz bleibt die Einbindung von Expertenwissen von großer Bedeutung. So sind vor allem Naturnähe (z. B. PNV und Konkurrenzkraft), waldbauliche und sozioökonomische Aspekte (z. B. Bestandespflege oder Waldfunktion) nur schwer modellhaft abzubilden, was eine gut informierte, qualitative, aber eben expertenbasierte Einschätzung notwendig macht. Zuletzt erfordert die Aggregation einzelner Eignungsaspekte zur Gesamteignung eine Gewichtung, welche an eine synoptische Einschätzung durch Expertengremien gebunden ist, um forstökologische und gesellschaftspolitische Rahmenbedingungen zu vereinen. Um die Vorteile sowohl modell- als auch expertenbasierter Verfahren zu nutzen, erscheint die Kombination beider für die methodische Weiterentwicklung sinnvoll. Expertenbasierte Elemente sollten dabei so weit wie möglich in Regelform gebracht und gut dokumentiert werden, damit resultierende Bewertungen nachvollziehbar werden und an den jeweils aktuellsten Wissensstand angepasst werden können.

4.3 Klimadynamik

Nahezu alle Länderansätze sind klimadynamisch aufgestellt und können somit auch für die Zukunft projizierte Klimabedingungen in den Eignungsbewertungen berücksichtigen. Viele Ansätze sind darauf ausgelegt, Empfehlungen für einzelne oder gemittelte Klimaprojektionen (z. B. Mediane aus einem Modellensemble) sowie ausgewählte Klimaperioden auszugeben. Dies geschieht zum einen, um die Ergebnisbreite für die Anwendung überschaubar zu halten. Zum anderen erfordern limitierte Rechenressourcen oftmals eine Selektion von Klimaprojektionen, da eine Verarbeitung des gesamten

Pools an verfügbaren Klimaprojektionen aufgrund der großen Datenmenge nur auf Hochleistungsrechnern (Supercomputer/ Computercluster) machbar ist. Zur Erleichterung der Auswahl greifen viele Bundesländer auf vorselektierte Klimaprojektionen (z. B. LINKE 2024) zurück. Die Auswahl der betrachteten Klimaperioden geschieht hingegen zumeist auf Grundlage der Datenverfügbarkeit und der je Bundesland individuellen Einschätzung, welche Planungshorizonte in der Praxis von Interesse sind und wie unsicher Projektionen für das Ende des 21. Jahrhunderts sind (KNUTTI 2008, PROFFT & FRISCHBIER 2008, BERNHOFER et al. 2015). Dabei ist zu beachten, dass weder die klimatische Entwicklung noch der waldbauliche Planungshorizont am Ende des Jahrhunderts endet, sondern lediglich die derzeit zur Verfügung stehenden Klimadaten.

Der Nachteil einer starken Datenselektion und -reduktion ist jedoch, dass so nur ein Teil des projizierten zukünftig möglichen Klimaraums abgedeckt werden kann. Auch das Verhältnis zwischen Klimaparametern wie z. B. Temperatur und Niederschlag sowie räumliche Muster können zwischen den verwendeten Klimaprojektionen und -perioden stark variieren. Die Wirkung dieser Variabilität und auch der Klimamodellunsicherheit auf die Baumarteneignungsbeurteilung kann mit Einzelauf- bzw. Mittelwert-Ansätzen kaum berücksichtigt und kommuniziert werden. Vor allem in Randbereichen des Standortspektrums von Baumarten können je nach Klimadatenauswahl sehr unterschiedliche Eignungsbewertungen resultieren. Aktuell arbeiten daher viele Bundesländer an der Ausweitung von berücksichtigten Klimaprojektionen und der Implementierung von Ensembleansätzen. Damit kann zukünftig auch klimatische Unsicherheit, die aus der Bandbreite der Läufe resultiert, in der Eignungsbeurteilung verankert werden. Gleichzeitig ist für eine klare Kommunikation mit der Praxis auch eine Komplexitätsreduktion der wissenschaftlichen Ergebnisse notwendig. Um dabei eine Bandbreite an Klimaprojektionen zu berücksichtigen, bietet sich statt einer Reduktion der Eingangsdaten auf eine gemittelte Klimaprojektion eher eine Synthese der Modellergebnisse an. Der Ansatz der NW-FVA zur Klimarobustheit liefert dafür ein Beispiel, indem die Eignung von Baumarten und Mischbeständen zunächst separat auf Basis von sieben Klimaprojektionen des RCP8.5 ermittelt wird. Erst im letzten Schritt wird anhand der Übereinstimmung der Eignungsbewertungen die Robustheit der Mischbestände beurteilt. Nichtsdestotrotz müssen bei der Verwendung von Klimaprojektionen grundsätzliche Schwächen der zugrundeliegenden Klimamodelle beachtet werden. Aktuelle Klimamodelloutputs zeigen beispielsweise bei der Intensität und Verteilung von Niederschlägen noch substantielle Abweichungen von Messperioden auf, u. a. da konvektive Prozesse bislang nicht in der benötigten Genauigkeit modelliert werden können (DOBLER et al. 2023). Über Adjustierungsverfahren werden diese Daten teils massiv verändert, um in plausible Größenordnungen zu kommen. Insofern ist die Ableitung von Kriterien zur Robustheit ein wichtiger Schritt, die zentrale Unsicherheit rührt aber von der bislang beschränkten Genauigkeit der Klimamodelle her.

Einen weiteren wichtigen Punkt für die Klimadynamik der Eignungsansätze stellt auch die Menge der klimatisch beeinflussbaren Eignungskomponenten dar. In den meisten Länderansätzen ist bisher nur eine Komponente klimadynamisch (z. B. Klimastufe, Artverbreitungsmodell, Standortwasserbilanz, etc.). Im Hinblick auf Auswirkungen von Klimaänderungen auf weitere Aspekte wie den

Wasserhaushalt, Mortalitätsrisiken oder Wuchsleistung stellt eine Ausweitung der klimadynamischen Elemente eine wichtige Erweiterungsoption der Länderansätze dar. Die Herleitung der baden-württembergischen Stabilitätsziffer aus mehreren klimasensitiven Modellen, die unterschiedliche Eignungsaspekte abdecken, kann hier als ein mögliches Beispiel zur Implementierung dienen (ALBRECHT et al. 2019).

Hinsichtlich der Aktualität der Klimaprojektionsdaten in den Länderverfahren bleibt festzustellen, dass die forstlichen Fachverfahren nur verzögert Neuerungen aus der Klimawissenschaft und -modellierung umsetzen können. Hier besteht eine lange Vorkette bis zur Bereitstellung verwertbarer Daten für die Waldforschung. Diese beginnt mit der Definition von Emissions- und sozioökonomischen Szenarien durch das IPCC sowie der Entwicklung und Validierung globaler Klimamodelle. Hieran schließen sich Downscaling-Prozesse mit erneuter Validierung und weitere Datenverarbeitungsschritte an, an deren Ende schließlich die Bereitstellung von Datenprodukten für die Anwendung in den Länderverfahren steht.

4.4 Mortalitätsrisiken und Wuchsleistung

Neben der grundsätzlichen Beurteilung eines Standorts hinsichtlich sich nur langsam verändernder Faktoren wie Substrat oder Lage, spielt die zeitdynamische Berücksichtigung von Wuchsleistung und Mortalitätsrisiken eine wichtige Rolle für die Baumarteneignungsbeurteilung. Insbesondere das großflächige Absterben einzelner Baumarten durch extreme Witterungsverhältnisse und Schädlingsbefall hat in den letzten Jahren deren zukünftige Eignung infrage gestellt (z. B. Fichtenborkenkäfer oder Buchensterben). Bislang berücksichtigt die Mehrzahl der Länderansätze diese Aspekte für die Eignungsbeurteilung nur sehr eingeschränkt. Meist erfolgt eine Risikoeinschätzung nur für ausgewählte Baumarten und Schadorganismen, da großskalige Modelle oder sonstige Ansätze mit zumindest bundeslandesweiter Einsetzbarkeit bisher fehlen. Methodisch steht hierfür jedoch inzwischen eine Reihe von modellgetriebenen Ansätzen zur Verfügung, z. B. phänologische Schädlingsmodelle, Standort-Leistungs-Modelle, Überlebenszeitmodelle, statistische Windwurfmodelle oder Brandgefahrenindizes. Inwiefern diese Ansätze bundesweit anwendbar sind, um die Eignungskomponenten der Länderverfahren zu dynamisieren, wird aktuell u. a. im Rahmen des Projektes „MultiRiskSuit“ untersucht (FNR 2023). Hierfür werden mehr als zwanzig Modelle auf Basis identischer Ausgangsdaten für alle Flächenbundesländer unter Klimawandelbedingungen projiziert, miteinander verglichen und auf Anwendbarkeit für die bestehenden Länderverfahren überprüft. Darüber hinaus werden in Hessen, Niedersachsen, Sachsen-Anhalt und Schleswig-Holstein aktuell Beurteilungen zu Sturmrisiko, Borkenkäferschadholzaufkommen und Standort-Leistung vorbereitet. In Bayern befindet sich eine dynamische Berücksichtigung des Trockenstressrisikos in Planung.

Insgesamt besteht zur Thematik Mortalität und Wachstum weiterhin großer Forschungsbedarf. Von besonderer Wichtigkeit erscheint dabei, dass zukünftige Modelle auch unter Klimawandelbedingungen Abschätzungen treffen können, flächig anwendbar sind und Extrapolationen vermeiden. Hierzu sollte die Modellentwicklung möglichst auf Basis ökologischer Prozesse erfolgen (CUDDINGTON et al. 2013). Dies erfordert wiederum die Erforschung numerischer Zusammenhänge u. a. zu Mortalitätsfaktoren, um eine fundierte Grundlage

für die Modellentwicklung zu bieten. Insbesondere zu aktuell verstärkt auftretenden Schäden durch Buchen-/Eichen-/Kiefernprachtkäfer, Eichenprozessionsspinner, Maikäfer oder das *Diplodia*-Triebsterben (FISCHER 2024) liegen bisher kaum großflächige Erkenntnisse vor. Aufgrund des erwarteten hohen Schadpotentials wären hier weitere Untersuchungen von großer Relevanz.

4.5 Konkurrenz und Artenmischung

Konkurrenzbeziehungen zwischen Baumarten stellen einen weiteren wichtigen Aspekt zur Beurteilung der Baumarteneignung dar. Die Länderansätze sprechen diese Thematik auf verschiedene Art und Weise an:

1. mit waldbaulichem Fokus hinsichtlich der Durchsetzungsfähigkeit der Einzelbaumart während ihres Lebenszyklus mit oder ohne Eingriffe (BB, BW: Verjüngungs-/Altholzphase)
2. im ökologischen Sinne im Hinblick auf die natürliche Vegetationsentwicklung ohne menschliche Eingriffe (PNV in SN, TH)
3. strategisch durch die Vorgabe von Waldtypen mit idealtypischer Zusammensetzung ökologisch und ökonomisch kompatibler Baumarten (HE/NI/ST/SH, MV, NRW, SN, TH).

Da Mischbestände gegenüber Reinbeständen vor dem Hintergrund des Klimawandels und sich häufender Störungsereignisse Vorteile bieten können (BAUHUS et al. 2017, PARDOS et al. 2021, SACHSENMAIER et al. 2024), verschiebt sich die Zielgröße der Eignungsbeurteilung von Baumarten zunehmend hin zur Empfehlung von Mischbestandstypen (vgl. auch TIEBEL & AXER 2021). Neben der teilweisen Berücksichtigung von Konkurrenzbeziehungen bietet diese Betrachtungsweise für die Forstpraxis ein klar umrissenes Waldbild und beinhaltet i. d. R. auch Hinweise zu waldbaulichen Aspekten. Nichtsdestotrotz stellt eine explizite Berücksichtigung von Wechselbeziehungen zwischen Baumarten eine wichtige Eignungskomponente dar, welche im Zusammenspiel mit klimatischen Änderungen dynamisch und anders als in der Vergangenheit wirken kann. Hierzu besteht noch großer Forschungsbedarf, insbesondere auch für die Beurteilung bislang gebietsfremder Baumarten sowie unbekannter Baumartenkombinationen (PRETZSCH et al. 2015, LIESEBACH et al. 2021).

Danksagung

Dieser Artikel entstand im Rahmen des Verbundvorhabens „MultiRiskSuit“. Es wird zu gleichen Teilen mit Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) und des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) unter dem Förderkennzeichen 2220WK41A4 durch die Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe (FNR) im Förderprogramm Waldklimafonds (WKF) gefördert.

Weiterhin möchten wir Julius Schuck (FAWF), Sebastian Peters (BW-FVA), Tobias Mette (LWF), Michael Wirner (LFOA MV), Jens-Peter Nasse (LFOA MV) und Matthias Schmidt (NW-FVA) für Ihre fachliche Unterstützung und hilfreichen Hinweise zu diesem Artikel danken.

Literatur

- ABDULRAHEEM, M.I., ZHANG, W., LI, S., MOSHAYEDI, A.J., FAROOQUE, A.A., HU, J. (2023): Advancement of Remote Sensing for Soil Measurements and Applications: A Comprehensive Review. *Sustainability*, **15**(21): 15444. DOI: <https://doi.org/10.3390/su152115444>
- ALBRECHT, A., ALMEHASNEH, A. (2019): Berechnung des Sturmrisikos. *FVA-einblick*, **23**(2): 37-41.
- ALBRECHT, A., MICHIELS, H.-G., KOHNLE, U. (2019): Baumarteneignung 2.0 und Vulnerabilitätskarten - Konzept und landesweite Hauptergebnisse. *FVA-einblick*, **2019**(2): 9-12.
- ALDINGER, E., MICHIELS, H.-G. (1997): Baumarteneignung in der forstlichen Standortskartierung Baden-Württemberg. *AFZ-DerWald*, **52**(5): 234-238.
- AMERELLER, K., KÖLLING, C., BOLTE, A., EISENHAEUER, D.-R., GROSS, J., HANEWINKEL, M., RÖHE, P. (2009): Die »20 Freisinger Punkte« – Eine gemeinsame Basis der deutschsprachigen forstlichen Ressortforschung. *LWF aktuell*, **73**: 46-48.
- ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG (2016): Forstliche Standortsaufnahme. IHW, Eching: 400 S.
- ARIAS, P., BELLOUIN, N., COPPOLA, E., JONES, R., KRINNER, G., MAROTZKE, J., ROGELJ, J. (2021): Climate Change 2021: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change; technical summary. DOI: <https://doi.org/10.1017/9781009157896.002>
- ASCHE, N. (2001): Standortgerechte Baumartenwahl in Nordrhein-Westfalen. *AFZ-DerWald*, **56**(16): 826-829.
- BABAEIAN, E., SADEGHI, M., JONES, S.B., MONTZKA, C., VEREECKEN, H., TULLER, M. (2019): Ground, Proximal, and Satellite Remote Sensing of Soil Moisture. *Reviews of Geophysics*, **57**(2): 530-616. DOI: <https://doi.org/10.1029/2018RG000618>
- BALTENSWEILER, A., WALTHER, L., HANEWINKEL, M., ZIMMERMANN, S., NUSSBAUM, M. (2021): Machine learning based soil maps for a wide range of soil properties for the forested area of Switzerland. *Geoderma Regional*, **27**: e00437. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2021.e00437>
- BASCOMPTE, J., GARCÍA, M.B., ORTEGA, R., PIRONON, S. (2019): Mutualistic interactions reshuffle the effects of climate change on plants across the tree of life. *Science Advances*, **5**(5): eaav2539. DOI: <https://doi.org/10.1126/sciadv.aav2539>
- BAUHAUS, J., FORRESTER, D.I., GARDINER, B., JACTEL, H., VALLEJO, R., PRETZSCH, H. (2017): Ecological Stability of Mixed-Species Forests. In: PRETZSCH, H., et al. (ed.): *Mixed-Species Forests*. Springer, Berlin, Heidelberg: 337-382.
- BECK, J., DIETZ, E., FALK, W. (2012): Digitales Standortinformationssystem für Bayern. *LWF aktuell*, **87**: 20-23.
- BEHRENS, T., SCHMIDT, K., RAMIREZ-LOPEZ, L., GALLANT, J., ZHU, A.-X., SCHOLTEN, T. (2014): Hyper-scale digital soil mapping and soil formation analysis. *Geoderma*, **213**: 578-588. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.07.031>
- BENNING, R., DANIGEL, J., PROFFT, I., PETZOLD, R. (2015): „Waldproduktivität – Kohlenstoffspeicherung – Klimawandel“. Modul 1 „Zusammenstellung und Harmonisierung der Bodendaten“. Staatsbetrieb Sachsenforst, K. f. W. u. F., Referat 43 „Bodenmonitoring, Standortserkundung und Labor“; ThüringenForst AöR, Forstliches Forschungs- und Kompetenzzentrum Gotha (FFK Gotha).
- BERGER, M., MORENO, J., JOHANNESSEN, J.A., LEVELT, P.F., HANSEN, R.F. (2012): ESA's sentinel missions in support of Earth system science. *Remote Sensing of Environment*, **120**: 84-90. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.07.023>
- BERNHOFER, C., FRANKE, J., KÖRNER, P., DONIX, T. (2015): Bandbreiten regionaler Klimaprojektionen für Sachsen hinsichtlich relevanter Kenngrößen für die Klimafolgenabschätzung. *Schriftenreihe des LfULG*, **2015**(13): 1-113.
- BMEI (2024): Ergebnisse der Waldzustandserhebung 2023. Bonn: 80 S.
- BÖCKMANN, T., HANSEN, J., HAUSKELLER-BULLERJAHN, K., JENSEN, T., NAGEL, J., NAGEL, R.-V., WOLLBORN, P. (2019): Klimaangepasste Baumartenwahl in den Niedersächsischen Landesforsten. Aus dem Walde – Schriftenreihe Waldentwicklung in Niedersachsen, **61**: 1-86.
- BÖCKMANN, T., BURESCH, M., EVERS, J., HAMKENS, H., NAGEL, R.-V., SUTMÖLLER, J. (2024): Entscheidungshilfen zur klimaangepassten Baumartenwahl in Schleswig-Holstein. *Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt*: 57 S.
- BOLTE, A., EISENHAEUER, D.-R., EHRHART, H.-P., GROSS, J., HANEWINKEL, M., KÖLLING, C., AMERELLER, K. (2009): Klimawandel und Forstwirtschaft – Übereinstimmungen und Unterschiede bei der Einschätzung der Anpassungsnotwendigkeiten und Anpassungsstrategien der Bundesländer. *Landbauforschung – vTI Agriculture and Forestry Research*, **59**(4): 269-278.
- BRIENEN, S., WALTER, A., BRENDL, C., FLEISCHER, C., GANSKE, A., HALLER, M., STANLEY, K. (2020): Klimawandelbedingte Änderungen in Atmosphäre und Hydrosphäre: Schlussbericht des Schwerpunktthemas Szenarienbildung (SP-101) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertennetzwerks: 157 S.
- BURESCH, M., EVERS, J., HAMKENS, H., MEESENBURG, H., NAGEL, R.-V., PAAR, U., SUTMÖLLER, J. (2023): Grundlagen der klimaangepassten Baumartenempfehlung. In: Versuchsanstalt, N. F. (ed.) *Regionale Waldbauplanung in Sachsen-Anhalt als Beitrag zur Klimafolgenanpassung und nachhaltigen Sicherung der Waldfunktion*. Universitätsverlag Göttingen, Göttingen: 47-64.
- CLASEN, C., FRISCHBIER, N., ZEHNER, T. (2008): Ursachenanalyse zum Schadausmaß des Sturmes „Kyrill“ in Thüringen. *AFZ-DerWald*, **63**(14): 746-748.
- CUDDINGTON, K., FORTIN, M.-J., GERBER, L.R., HASTINGS, A., LIEBHOLD, A., O'CONNOR, M., RAY, C. (2013): Process-based models are required to manage ecological systems in a changing world. *Ecosphere*, **4**(2): 1-12. DOI: <https://doi.org/10.1890/ES12-00178.1>
- CULLMANN, D. (2019): Verfahren Multikriterieller Bewertungen - Baumarteneignung 2.0 und Vulnerabilitäten. *FVA-einblick*, **23**(2): 15-19.
- DÖBBELER, H., BURESCH, M., HEITKAMP, F., NAGEL, R.-V., SPELLMANN, H. (2020): Entscheidungshilfen zur klimaangepassten Baumartenwahl in Hessen. Ergebnisse aus dem Integrierten Klimaschutzplan Hessen 2025: Projekt L-12 „Klimarisiko- und Zielbestockungskarten Forst“. *Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt*: 12 S.
- DOBLER, A., FELDMANN, H., MEREDITH, E., ULBRICH, U. (2023): Grenzen und Herausforderungen der regionalen Klimamodellierung. In: BRASSEUR, G.P., et al. (ed.): *Klimawandel in Deutschland*. Springer Spektrum, Berlin: 47-56.
- DWORSCHAK, M., SCHULTE-KELLINGHAUS, S. (2018): Forstlich-standortkundliche Auswertung auf Basis der Bodenkarte 1 : 50 000. Projektbericht. Geologischer Dienst Nordrhein-Westfalen, Krefeld: 72 S.

- FALK, W., MELLERT, K.H. (2011): Species distribution models as a tool for forest management planning under climate change: risk evaluation of *Abies alba* in Bavaria. *Journal of Vegetation Science*, **22**(4): 621-634. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1654-1103.2011.01294.x>
- FALK, W., THURM, E.A., METTE, T., SCHUSTER, O., KLEMMT, H.J. (2019): Anbaurisiko-Karten für nichtheimische Baumarten. LWF aktuell, **4/2019**: 23-27.
- FFK GÖTHA (2015a): Standortgerechte Baumarten- und Bestandeszieltypenwahl für die Wälder des Freistaates Thüringen auf Grundlage der forstlichen Standortskartierung unter Beachtung des Klimawandels - Tabellenwerk: 172 S.
- FFK GÖTHA (2015b): Standortgerechte Baumarten- und Bestandeszieltypenwahl für die Wälder des Freistaates Thüringen auf Grundlage der forstlichen Standortskartierung unter Beachtung des Klimawandels - Fachliche Erläuterungen: 36 S.
- FISCHER, J. (2024): Übersicht Waldschutz 2023/2024. AFZ-Der Wald, **2024**(9): 12-15.
- FLATO, G., MAROTZKE, J., ABIODUN, B., BRACONNOT, P., CHOU, S.C., COLLINS, W., RUMMUKAINEN, M. (2014): Evaluation of Climate Models. In: STOCKER, T.F., et al. (ed.): *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, New York: 741-866.
- FNR (2023): Vergleichende Baumarteneignungsbeurteilungen – MultiRiskSuit. URL: <https://www.fnr.de/projektfoerderung/ausgewaehlte-projekte/projekte/vergleichende-baumarteneignungsbeurteilungen-multirisksuit> [abgerufen am: 30/08/2024]
- FRANKENBERG, R., PETERS, S., RIVERA, E.A., MICHELS, H.-G. (2024): Vereinfachte Standortsinformation: Modellgestützt zur Standortsprognose. *standort.wald*, **53**.
- FRISCHBIER, N., PROFFT, I. (2008): Praxisorientierte Regionalisierung forstlich relevanter Klimawerte und -szenarien für Thüringen. *Forst und Holz*, **63**(10): 24-29.
- FRISCHBIER, N., PROFFT, I., ARENHÖVEL, W. (2010): Die Ausweisung klimawandelangepasster Bestandeszieltypen für Thüringen. *Forst und Holz*, **65**(2): 28-35.
- GAUER, J. (2009): Böden als Waldstandorte. In: BLUME, H.-P., et al. (ed.): *Handbuch der Bodenkunde*, 32. Ergänzungslieferung. Wiley-VCH, Weinheim.
- GEMBALLA, R., SCHLUTOW, A. (2007): Überarbeitung der Forstlichen Klimagliederung Sachsens. *AFZ-DerWald*, **62**(15): 822-826.
- GEMBALLA, R., EISENHAEUER, D.-R. (2016): Von der zonalen, quasistabilen zur dynamischen forstlichen Klimagliederung. In: EICHHORN, J., et al. (ed.): *Waldbauliche Klimaanpassung im regionalen Fokus. KLIMZUG. oekom, München*: 109-113.
- GEMBALLA, R., SCHLUTOW, A., EISENHAEUER, D.-R. (2016): Arealverschiebungen von Baumarten und Leitwaldgesellschaften. In: EICHHORN, J., et al. (ed.): *Waldbauliche Klimaanpassung im regionalen Fokus. KLIMZUG. oekom, München*: 126-134.
- HAMKENS, H., SPELLMANN, H., NAGEL, R.-V., BURESCH, M. (2020): Entscheidungshilfen zur klimaangepassten Baumartenwahl im Land Sachsen-Anhalt: 69 S.
- HÄNDEL, M., CULLMANN, D. (2019): Klimasensitive Artverbreitungsmodelle. *FVA-einblick*, **23**(2): 20-21.
- HÄRING, T., DIETZ, E., OSENSTETTER, S., KOSCHITZKI, T., SCHRÖDER, B. (2012): Spatial disaggregation of complex soil map units: A decision-tree based approach in Bavarian forest soils. *Geoderma*, **185-186**: 37-47. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.04.001>
- HÜBENER, H., BÜLOW, K., FÖCKEN, C., FRÜH, B., HOFFMANN, P., HÖPP, S., WOLDT, M. (2017): *ReKliEs-De Ergebnisbericht*. DOI: https://doi.org/10.2312/WDCC/ReKliEsDe_Ergebnisbericht
- IPCC (2023): *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge: 2392 S.
- KAUTZ, M., HÄNDEL, M. (2019): Abschätzung des Buchdrucker-risikos mithilfe des Modells PHENIPS. *FVA-einblick*, **23**(2): 27-31.
- KHAROUBA, H.M., WILLIAMS, J.L. (2024): Forecasting species' responses to climate change using space-for-time substitution. *Trends in Ecology & Evolution*, **39**(8): 716-725. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tree.2024.03.009>
- KLEBER, A., REITER, P., MATTHES, U. (2022): Artensteckbriefe ergänzender Baumarten Rheinland-Pfalz. *Mitteilungen aus der Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz*, **89/22**: 78 S.
- KNUTTI, R. (2008): Should We Believe Model Predictions of Future Climate Change? *Philosophical Transactions: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, **366**(1885): 4647-4664. DOI: <https://doi.org/10.1098/rsta.2008.0169>
- LANDESFORSTEN RHEINLAND-PFALZ (2021): Standortsinformationssystem zur Unterstützung der Baumartenwahl im Klimawandel (StOIS-BAE). Internes Dokument.
- LEUSCHNER, C. (2024): Trockenstress- und Hitzeempfindlichkeit wichtiger Baumarten – Vitalität von Norddeutschlands Wäldern im Klimawandel. *Berichte der Reinhold-Tüxen-Gesellschaft*, **32**: 133-156.
- LIESEBACH, M., WOLF, H., BEEZ, J., DEGEN, B., ERLEY, M., HAVERKAMP, M., VOTH, W. (2021): Identifizierung von für Deutschland relevanten Baumarten im Klimawandel und länderübergreifendes Konzept zur Anlage von Vergleichsanbauten - Empfehlungen der Bund-Länder-Arbeitsgruppe „Forstliche Genressourcen und Forstsamtgutrecht“ zu den Arbeitsaufträgen der Waldbaureferenten. Thünen Working Paper, **172**. DOI: <https://doi.org/10.3220/WP1617712541000>
- LINKE, C. (2024): Leitlinien zur Interpretation regionaler Klimamodelldaten des Bund-Länder-Fachgespräches „Interpretation regionaler Klimamodelldaten“.
- LWF (2019): *Praxishilfe Klima – Boden – Baumartenwahl Band I. 1*. Freising: 109 S.
- LWF (2020): *Praxishilfe Klima – Boden – Baumartenwahl Band II. 2*. Freising: 124 S.
- MARÉCHAUX, I., LANGERWISCH, F., HUTH, A., BUGMANN, H., MORIN, X., REYER, C.P.O., BOHN, F.J. (2021): Tackling unresolved questions in forest ecology: The past and future role of simulation models. *Ecology and Evolution*, **11**(9): 3746-3770. DOI: <https://doi.org/10.1002/ece3.7391>
- MELLERT, K.H., CANULLO, R., METTE, T., ZICHE, D., GÖTTLEIN, A. (2018): Die klimatische Trockengrenze häufiger Baumarten hängt vom Bodennährstoffstatus ab. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen*, **169** (6): 323–331. DOI: <https://doi.org/10.3188/szf.2018.0323>

- MLR BADEN-WÜRTTEMBERG (2024): Waldentwicklungstypen im Klimawandel. Stuttgart: 266 S.
- MLU MECKLENBURG-VORPOMMERN (2018): Forstliche Klimagliederung in Mecklenburg-Vorpommern auf der Grundlage der Klimawerte von 1981–2010. Die Grundsätze der Naturnahen Forstwirtschaft **Heft A6**. Schwerin: 19 S.
- MLUK BRANDENBURG (2022): Empfehlungen zur Mischung von Baum- und Straucharten im Wald. Die Baumartenmischungstabelle. Brandenburgische Universitätsdruckerei und Verlagsgesellschaft Potsdam mbH, Potsdam: 92 S.
- MULNV NORDRHEIN-WESTFALEN (2021): Waldbaukonzept Nordrhein-Westfalen - Empfehlungen für eine nachhaltige Waldbewirtschaftung. umwelt.nrw, Düsseldorf: 190 S.
- NAGEL, G.W., NOVO, E.M.L. D. M., KAMPEL, M. (2020): Nanosatellites applied to optical Earth observation: a review. *Revista Ambiente & Água*, **15**: e2513. DOI: <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2513>
- OSENSTETTER, S., FALK, W., REGER, B., BECK, J. (2013): Wasser, Luft und Nährstoffe – alles, was ein Baum zum Leben braucht. LWF aktuell, **94/2013**: 12-17.
- PARDOS, M., DEL RÍO, M., PRETZSCH, H., JACTEL, H., BIELAK, K., BRAVO, F., CALAMA, R. (2021): The greater resilience of mixed forests to drought mainly depends on their composition: Analysis along a climate gradient across Europe. *Forest Ecology and Management*, **481**: 118687. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118687>
- PETZOLD, R., BENNING, R., GAUER, J. (2016): Bodeninformationen in den verschiedenen Standortserkundungssystemen Deutschlands: Gegenwärtiger Stand und Perspektiven. *Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz – Forest Ecology, Landscape Research and Nature Conservation*, **16**: 7-17.
- PETZOLD, R., BENNING, R. (2017): Standortskartierung – Wissen von gestern? *AFZ-DerWald*, **2017(15)**: 25-28.
- PRETZSCH, H., FORRESTER, D.I., RÖTZER, T. (2015): Representation of species mixing in forest growth models. A review and perspective. *Ecological Modelling*, **313**: 276-292. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2015.06.044>
- PROFFT, I., FRISCHBIER, N. (2008): Möglichkeiten und Grenzen der Integration von Klimaszenarien in forstlichen Anpassungsstrategien an den Klimawandel. *Forst und Holz*, **63(9)**: 22-27.
- PUHLMANN, H., WOLF, T., STACKELBERG, N., HOCH, R., HALLAS, T. (2019): Wasserhaushalt und Trockenstress von Wäldern: Wohin geht die Reise? *FVA-einblick*, **23(2)**: 22-26.
- REIF, A., BRUCKER, U., KRATZER, R., SCHMIEDINGER, A., BAUHUS, J. (2009): Waldbau und Baumartenwahl in Zeiten des Klimawandels aus Sicht des Naturschutzes. Abschlussbericht eines F+E-Vorhabens im Auftrag des Bundesamtes für Naturschutz: 128 S.
- SAARFORST LANDESBETRIEB & MUV SAARLAND (2021): Waldbewirtschaftungsrichtlinie für den Staatswald des Saarlandes. Stand September 2021. 65 S.
- SACHSENFORST (2013): Richtlinie zu den Waldentwicklungstypen im Staatswald des Freistaates Sachsen (Teil 1): 27 S.
- SACHSENMAIER, L., SCHNABEL, F., DIETRICH, P., EISENHAEUER, N., FERLIAN, O., QUOSH, J., WIRTH, C. (2024): Forest growth resistance and resilience to the 2018–2020 drought depend on tree diversity and mycorrhizal type. *Journal of Ecology*, **112(8)**: 1787-1803. DOI: <https://doi.org/10.1111/1365-2745.14360>
- SCHLUTOW, A., HÜBENER, P. (2004): The BERN Model. Bioindication for Ecosystem Regeneration towards Natural conditions. UBA-Texte **22/2004**. Umweltbundesamt, Berlin: 56 S.
- SCHLUTOW, A., GEMBALLA, R. (2008): Sachsens Leitwaldgesellschaften - Anpassung in Bezug auf den prognostizierten Klimawandel. *AFZ-DerWald*, **63(1)**: 28-31.
- SCHLUTOW, A., PROFFT, I., FRISCHBIER, N. (2009): Das BERN-Modell als Instrument zur Einschätzung der Anpassbarkeit von Waldgesellschaften und Baumarten an den Klimawandel in Thüringen. *Forst und Holz*, **64(4)**: 31-37.
- SCHLUTOW, A., KRAFT, P., SCHEUSCHNER, T., SCHLUTOW, M., SCHRÖDER, W. (2024): Bioindication for Ecosystem Regeneration towards Natural conditions: the BERN data base and BERN model. *Environmental Sciences Europe*, **36(14)**: DOI: <https://doi.org/10.1186/s12302-023-00826-0>
- SCHMIDT, W., STÜBER, V., ULLRICH, T., PAAR, U., EVERS, J., DAMMANN, K., SCHMIDT, M. (2015): Synopse der Hauptmerkmale der forstlichen Standortskartierungsverfahren der Nordwestdeutschen Bundesländer. Beiträge aus der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt **12**. Universitätsverlag Göttingen: 136 S.
- SCHRÖDER, J., GRÜLL, M., DEGENHARDT, A., STÄHR, F., POMMER, U., KONOPATZKY, A. (2023): Aus BZT wird BMT – Waldbauliche Empfehlungsgrundlagen für den Wald in Brandenburg. In: BRANDENBURG, M., BRANDENBURG, L.F. (ed.): Wissenstransfer in die Praxis. Tagungsband zum 17. Eberswalder Waldkolloquium am 7. Juli 2022. Brandenburgische Universitätsdruckerei und Verlagsgesellschaft Potsdam mbH, Eberswalde: 5-12.
- SCHULTE-KELLINGHAUS, S., WELLER, A., WOLFF, I. (2020): Erweiterung der Forstlichen Standortskarte von Nordrhein-Westfalen auf der Grundlage von Klimaprojektionen und zur Entwicklung von Karten zur Eignung von Baumarten und Waldentwicklungstypen – Projektbericht.
- TAEGER, S., JANTSCH, M., KÖLLING, C. (2016): Einfluss besonderer Standortfaktoren auf die Baumartenwahl. *AFZ-DerWald*, **2016(4)**: 14-18.
- THURM, E., WIRNER, M. (2023): Bestockungszieltypen im Klimawandel für die Wälder des Landes Mecklenburg-Vorpommern. **Heft A3**: 78 S.
- THURM, E.A., HERNANDEZ, L., BALTENSWEILER, A., AYAN, S., RASZTOVITS, E., BIELAK, K., FALK, W. (2018): Alternative tree species under climate warming in managed European forests. *Forest Ecology and Management*, **430**: 485-497. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.08.028>
- THURM, E.A., FALK, W. (2019): Standortsansprüche seltener Baumarten. *AFZ-DerWald*, **2019(15)**: 32-35.
- TIEBEL, K., AXER, S. (2021): Abschlussbericht Synopse zu den Anpassungen der großen Landesbetriebe an den Klimawandel (LanAnKli): 84.

- VASCONCELOS, A.C., MATTHES, U., KONOLD, W. (2013): Auswirkungen des Klimawandels auf den Wald in Rheinland-Pfalz. Schlussberichte des Landesprojekts Klima- und Landschaftswandel in Rheinland-Pfalz (KlimLandRP), Teil 4, Modul Wald: 333 S.
- WEIS, W., AHREND, B., BÖHNER, J., FALK, W., FLECK, S., HABEL, R., WOLF, T. (2023): Standortsfaktor Wasserhaushalt im Klimawandel. Schriftenreihe des Zentrums Wald-Forst-Holz Weihenstephan **224**. Zentrum Wald Forst Holz Weihenstephan, Freising: 190 S.
- WOLFF, B., HÖLZER, W., BONK, S., FRÖMDLING, D., BARITZ, R. (1999): Harmonisierung von Ergebnissen der forstlichen Standortskartierung. Forst und Holz, **54**(10): 291-298.
- YUE, C., KAHLE, H.-P., VON WILPERT, K., KOHNLE, U. (2016): A dynamic environment-sensitive site index model for the prediction of site productivity potential under climate change. Ecological Modelling, **337**: 48-62. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2016.06.005>
- YUE, C., ALBRECHT, A., KLÄDTKE, J., KOHNLE, U. (2019): Bonitäten: Dynamischer als gedacht. FVA-einblick, **23**(2): 32-36.
- ZIRLEWAGEN, D., WILPERT, K. V. (2011): Regionalisierung bodenphysikalischer Eingangsgrößen für bodenhydraulische Pedotransferfunktionen. Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz – Forest Ecology, Landscape Research and Nature Conservation, **12**: 73-83.
- ZIRLEWAGEN, D. (2021): Aktualisierungen und Neuerstellungen von Regionalisierungen von Bodendaten im Rahmen des Notfallplans Wald gegen Baumschäden in Baden-Württemberg. Interra, Kenzingen: 87 S.

submitted: 20.09.2024

reviewed: 08.10.2024

accepted: 20.10.2024

Autorenanschriften

Dr. Lukas Baumbach
 Dr. Norbert Kühl
 Dr. Axel Albrecht
 Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg (FVA-BW)
 Wonnhaldestraße 4
 79100 Freiburg

E-Mail:
Lukas.Baumbach@forst.bwl.de
Norbert.Kuehl@forst.bwl.de
axel.albrecht@Forst.bwl.de

Wolfgang Falk
 Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF)
 Hans-Carl-von-Carlowitz-Platz 1
 85354 Freising

E-Mail: Wolfgang.Falk@lwf.bayern.de

Dr. Nico Frischbier
 Forstliches Forschungs- und Kompetenzzentrum Gotha,
 ThüringenForst-AöR (FFK Gotha)
 Jägerstraße 1
 99867 Gotha

E-Mail: Nico.Frischbier@forst.thueringen.de

Erich Fritz
 SaarForst Landesbetrieb (SFL)
 Kepplerstraße 18
 66117 Saarbrücken

E-Mail: Die.Fritzens@t-online.de

Rainer Gemballa
 Staatsbetrieb Sachsenforst Kompetenzzentrum Wald und Forstwirtschaft (SBS-KWuF)
 Bonnewitzer Straße 34
 01796 Pirna

E-Mail: Rainer.Gemballa@smekul.sachsen.de

Dr. Hans Hamkens
 Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (NW-FVA)
 Grätzelstraße 2
 37079 Göttingen

E-Mail: hans.hamkens@nw-fva.de

Philipp Reiter
 Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft
 Rheinland-Pfalz (FAWF)
 Hauptstraße 16
 67705 Trippstadt

E-Mail: Philipp.Reiter@wald-rlp.de

Prof. Dr. Jens Schröder
 Landeskompetenzzentrum Forst Eberswalde (LFE)
 Heinrich-Mann-Allee 103
 14473 Potsdam

E-Mail: Jens.Schroeder@LFB.Brandenburg.de

Dr. Eric Andreas Thurm
 Landesforstanstalt Mecklenburg-Vorpommern (LFOA-MV)
 Zeppelinstraße 3
 19061 Schwerin

E-Mail: eric.thurm@lfoa-mv.de

Alexander Weller
 Landesbetrieb Wald und Holz Nordrhein-Westfalen (LB WH NRW)
 Albrecht-Thaer-Straße 34
 48147 Münster

E-Mail: Alexander.Weller@wald-und-holz.nrw.de