

Baumarteneignungs- und Vulnerabilitätskarten FVA

Methodischer Hintergrund, Stand 1/2025

Die FVA Baden-Württemberg hat 2010, 2019 und 2024 Karten mit Geoinformationen zur Waldbauplanung und Waldentwicklung unter Klimawandel veröffentlicht. Die dargestellten Inhalte betreffen vorwiegend bewirtschaftete Wälder.

*Interessieren Sie sich dafür, welche Baumarten in Ihrem Wald unter Klimawandel geeignet sind, können Sie die **Baumarteneignungskarten 2.1** für die wichtigen Baumarten Fichte, Buche, Weißtanne, Traubeneiche, Bergahorn, Waldkiefer und Douglasie betrachten. Interessieren Sie sich dafür, wo in Ihrem Wald die klimawandelbedingte Gefährdung der Waldbestände aktuell am größten ist, können Sie die **Vulnerabilitätskarten** (Stand 2019/2020) heranziehen.*

Baumarteneignungskarten sind nur für standortskartierte Waldflächen für die sieben genannten wichtigen Baumarten verfügbar, Vulnerabilitätskarten für alle Waldflächen, auf denen die vier Hauptbaumarten Fichte, Buche, Weißtanne und Traubeneiche aktuell vorkommen.

*Interessieren Sie sich für die **Eignungsbeurteilung 27 weiterer alternativer Baumarten**, suchen Sie im [Geoportal-BW](#) nach „Alternativbaumarten“ und lesen im „[Leitfaden Alternativbaumarten](#)“ der FVA-BW über die methodischen Hintergründe.*

1 Übersicht Baumarteneignungs- und Vulnerabilitätskarten

Die klimadynamischen **Baumarteneignungskarten 2.1** stufen die wichtigen Baumarten Fichte, Buche, Weißtanne, Traubeneiche, Bergahorn, Waldkiefer und Douglasie hinsichtlich ihrer forstlichen Anbaueignung ein – unter Berücksichtigung von zwei unterschiedlichen Szenarien des Klimawandels. Sie sind konzipiert als waldbauliche Entscheidungshilfe für die **Baumartenwahl** und dienen damit der langfristigen Waldentwicklungsplanung (> 10 Jahre). Die Logik ist eine Potentialbetrachtung ohne Berücksichtigung der heutigen Bestockungssituation und kann für Baumartenvergleiche „auf der grünen Wiese“ verwendet werden. Die Darstellung der klimadynamischen Baumarteneignung erfolgt in Ampelfarben abgestuft in sieben Klassen von geeignet bis ungeeignet. Die Klassenbildung entspricht damit derjenigen, die seither schon in der Baumarteneignungsbeurteilung der forstlichen Standortskartierung in Baden-Württemberg üblich ist (Aldinger und Michiels, 1997).

Die im Jahr 2024 veröffentlichte Modellgeneration 2.1 beinhaltet im Wesentlichen die Erweiterung um die Baumarten Bergahorn, Waldkiefer und Douglasie sowie eine Überarbeitung der Karten für die Traubeneiche. Die methodischen Grundlagen sind jedoch weitgehend unverändert.

Die im Jahr 2019 veröffentlichte Modellgeneration 2.0 ist eine methodische Weiterentwicklung der 2010 veröffentlichten [Klima-Baumarteneignungskarten 1.0 der FVA](#). Die Ausgangsbewertung beruht auch weiterhin auf den statischen Einstufungen der forstlichen Standortskartierung. Die Berechnungen der bezüglich Klimawandel dynamisierten Baumarteneignung wurden von einem mono- zu einem multikriteriellen Verfahren weiterentwickelt. Das bedeutet, dass die 2010 veröffentlichte, nur auf Artverbreitungsmodellen basierende, Einschätzung der Baumarteneignung unter Klimawandel nun um die weiteren Eignungskriterien der Veränderungen von Bodenwasserhaushalt, Borkenkäferisiko, Sturmrisiko und Wuchsleistung erweitert wurde. Die Baumarteneignungskarten für Buche, Tanne und Fichte entsprechen weiterhin dem Bearbeitungsstand des Jahres 2019.

Die **Vulnerabilitätskarten** klassifizieren die heutigen Waldbestände hinsichtlich ihrer Gefährdung durch klimawandeltypische Mortalitätsrisiken. Sie wurden 2019 als neues Produkt der Klimafolgenforschung an der FVA eingeführt und dienen der kurz- und mittelfristigen Waldbauplanung (1-10 Jahre). Auf den Vulnerabilitätskarten werden besonders gefährdete Bereiche identifiziert, um Anpassungsmaßnahmen zielgerichtet hier zu beginnen und eine Reihenfolge für die **Verjüngungsplanung** zu ermitteln. Die Vulnerabilitätskarten sind farblich in Gelb-Brauntönen, in vier Klassen von sehr gering bis sehr hoch dargestellt. In Ergänzung zur Potentialbetrachtung der Baumarteneignungskarten sind die Vulnerabilitätskarten eine *in-situ*-Gefährdungsbeurteilung der heutigen Waldbestände hinsichtlich klimabedingter natürlicher Risiken. Auch die Vulnerabilitätskarten sind als multikriterielles Verfahren konzipiert, sodass die klimawandelbedingte Gefährdung nicht nur anhand einzelner, sondern mehrerer Risiken errechnet wird.

Das Zusammenspiel der Baumarteneignungs- und Vulnerabilitätskarten besteht darin, dass in einem ersten Schritt die besonders gefährdeten Wälder anhand der Vulnerabilitätskarte identifiziert werden können, um in einem zweiten Schritt dann dort Waldumbau- und andere Anpassungsmaßnahmen durchzuführen. Dabei ist die Beurteilung der Baumarteneignung eine wichtige Entscheidungsgrundlage für die Baumartenwahl.

Die Baumarteneignungskarte wurden in einer Horizontalauflösung von 62,5 m (Fichte, Tanne, Buche) sowie 25m (Traubeneiche, Bergahorn, Waldkiefer, Douglasie) für die mittlere (2021-2050) und ferne Zukunft (2071-2100) und für die Klimaszenarien RCP 4.5 und RCP 8.5 erstellt. Obwohl mit dem sechsten Sachstandsbericht des Weltklimarates neue sogenannte SSP-Szenarien veröffentlicht wurden, waren die RCP-Szenarien zum Stichtag für die Erweiterung der Baumarteneignungskarten (Version 2.1) die aktuellsten Szenarien des Weltklimarats (IPCC, 2013) mit bereits veröffentlichten und bearbeitbaren Klimadaten. Die RCP-Szenarien stellen die mögliche zukünftige Klimaentwicklung unter verschiedenen Annahmen zur globalen Entwicklung dar. Das Szenario 8.5 ist das extremste, pessimistische und derzeit realistische Szenario, wohingegen in Szenario 4.5 ein erhebliches sofortiges Gegensteuern mit Klimaschutzmaßnahmen mit Wirkung ab Mitte des 21. Jahrhunderts angenommen wird. Aufgrund aktueller Erdbeobachtungsdaten erscheint jedoch das Szenario 4.5 derzeit nicht mehr realistisch. Im Zuge der Überarbeitung zur Version 2.1 wurden für die mittlere Zukunft die Bezugsjahre 2041-2060 sowie für die ferne Zukunft die Jahre 2061-2080 verwendet, da der verwendete Klimadatensatz (Chelsea) nur bis maximal ins Jahr 2080 reicht. Diese Uneinheitlichkeit der Bezugsjahre zwischen Version 2.0 und 2.1 wurde jedoch akzeptiert, da der neue Klimadatensatz erhebliche andere Vorteile gegenüber dem alten Datensatz von Version 2.0 aufweist.

Die Vulnerabilitätskarten (nur für Buche, Traubeneiche, Fichte und Tanne, Stand 2019/2020) wurden in der baumartenweisen Darstellungsform in einer Horizontalauflösung von 20 m erstellt. Die baumartenübergreifende Gesamtvulnerabilitätskarte wurde in einer Auflösung von 250m erstellt. Die Vulnerabilitätskarten liegen für die heute aktuellen klimatischen Verhältnisse vor.

Die Eignungsbeurteilung weiterer, hier nicht dargestellter Baumarten ist standortsspezifisch teilweise im Geoportal des Landes BW einsehbar (<https://www.geoportal-bw.de>). Ergänzend liegt eine systematische Literatursammlung in Form der [Artensteckbriefe der FVA](#) vor, die jedoch keinen konkreten Ortsbezug herstellt. Weitere Informationen zur Übersicht über den Themenbereich Baumarteneignung sind in einem Merkblatt zusammengestellt (https://www.fva-bw.de/fileadmin/publikationen/fva-praxisnah/Baumarteneignung_im_Klimawandel.pdf).

2 Welche klimawandeldynamischen Teilaspekte wurden berücksichtigt?

2.1 Trockenstress / Wasserhaushalt unter Klimawandel (*Layername: relative_bodenwassersaettigung*)

Zur Abschätzung des Bodenwasserhaushalts und von Trockenstress wurde ein hydrologisches Modell (LWF-Brook90) angewendet, das den Niederschlag, die Temperatur und weitere klimatische Kenngrößen sowie zahlreiche bodenkundliche Parameter wie die Bodenart und die Bodentiefe berücksichtigt (Hammel und Kennel, 2001; Puhmann, 2013). Als Indikator für Wassermangel wurde die relative Bodenwassersättigung im Wurzelraum ausgewählt. Diese beschreibt die relative Füllung des Bodenwasserspeichers bezogen auf die nutzbare Feldkapazität. Die modellierten Tageswerte wurden über jede Vegetationsperiode gemittelt und daraus langjährige Mittelwerte für die mittlere (2021-2050) und ferne (2071-2100) Zukunft berechnet. Die relative Bodenwasserspeicherfüllung kann Werte zwischen Null und unendlich annehmen, wobei Werte > 1 bedeuten, dass in der Vegetationsperiode die Bodenwasserspeicherfüllung im langjährigen Mittel oberhalb der Feldkapazität liegt. Werte zwischen 0 und 1 besagen, dass die Bodenwasserspeicherfüllung im Mittel zwischen permanentem Welkepunkt und Feldkapazität liegt. Der Wert 0 bedeutet, dass die Bodenwasserspeicherfüllung im Mittel gleich dem Wassergehalt am permanenten Welkepunkt ist (Totwassergehalt).

Die relative Bodenwassersättigung wurde landesweit und flächendeckend jeweils für einen Buchen- und einen Fichtenbestand berechnet. Die Baumarten unterschieden sich mit Bezug zum Bodenwasserhaushalt überwiegend hinsichtlich ihrer Interzeptionseigenschaften. Die tatsächlichen Werteunterschiede zwischen Buche und Fichte sind allerdings überwiegend gering. Als Eingangsgrößen in die Karten zur Baumarteneignung und Vulnerabilität wurden die Modellergebnisse der Buche für alle Laubbaumarten und die Werte der Fichte für alle Nadelbaumarten verwendet.

Als physiologisch bedeutsamer Grenzwert der relativen Bodenwassersättigung gilt 0,4, ab dessen Unterschreitung Bodenwasser für Bäume nur noch eingeschränkt verfügbar ist. Um besonders extreme Unterschreitungen der optimalen Wasserverfügbarkeit abbilden zu können, wird häufig der Wert 0,2 verwendet. Beide Grenzwerte haben Gültigkeit bei Betrachtung von Tageswerten der Bodenwasserverfügbarkeit.

Für die Bewertung des Eignungskriteriums Stabilität wurden als Grenzwerte 0,6 (bei Waldkiefer und Traubeneiche 0,5) und 0,8 ausgewählt. Diese Werte liegen etwas höher und damit etwas weniger streng als die genannten Grenzwerte bei täglicher Auflösung, da in der vorliegenden Beurteilung langfristige Veränderungen in Form 30-jähriger Mittelwerte abgebildet werden und sich damit die Signale singulärer Extremereignisse rechnerisch abschwächen. Das Eignungskriterium „Stabilität“ wurde bei Über- und Unterschreiten dieser Schwellenwerte herauf- bzw. herabgesetzt.

2.2 Borkenkäferisiko

Als derzeit wichtigstes pathogenes Schadinsekt in Baden-Württemberg wurde der Buchdrucker (*Ips typographus*) an Fichte ausgewählt. Um das Befallsrisiko zu charakterisieren wurde mithilfe des Phänologiemodells PHENIPS (Baier *et al.*, 2007) das 30-jährige Mittel der potentiellen Anzahl an Buchdrucker-Generationen für die RCP-Szenarien 4.5 und 8.5 sowie die Perioden 1981 - 2010, 2021 - 2050 und 2071 – 2100 berechnet. Die Ergebnisse zeigen das potentielle Risiko für Buchdruckerbefall der Baumart Fichte für die gesamte Waldfläche von Baden-Württemberg.

Die Buchdruckergefährdung bildet allein das temperaturbedingte Gefährdungspotential ab. Sie berücksichtigt andere Einflussfaktoren auf die Gefährdung nicht, also ob z. B. bereits ein Vorbefall in räumlicher Nähe vorkam, ob durch Sturmschäden erhöhtes Brutraumangebot vorhanden ist, ob Fichten überhaupt und wenn ja in welcher Dimension vorhanden sind, oder ob waldhygienische Maßnahmen durchgeführt wurden.

Der Buchdrucker steht stellvertretend auch für andere rindenbrütende Borkenkäfer und andere Schadinsekten, für die jedoch keine eigenen Berechnungsmodelle zur Verfügung standen.

Für die Baumarteneignungsbeurteilung wurden die Schwellenwerte 2,0 sowie 2,5 Generationen verwendet. Das Eignungskriterium „Stabilität“ wurde bei Über- und Unterschreiten dieser Schwellenwerte herab- bzw. heraufgesetzt.

2.3 Artverbreitung unter Klimawandel

Mithilfe von Artverbreitungsmodellen wurden großräumige mögliche Veränderungen des Vorkommens wichtiger Baumarten abgeschätzt. Dafür wurden Korrelationen zwischen dem heutigen Vorkommen dieser Arten innerhalb Europas und bioklimatischen Variablen ermittelt. Unter Verwendung von Werten dieser bioklimatischen Variablen wurde für die Klima-Zukunftsszenarien RCP 4,5 und RCP 8,5 und die Zeiträume 2041-2061 und 2061-2080 die zukünftige Vorkommenswahrscheinlichkeit einer Art abgeschätzt.

Für die Baumarten Fichte, Buche und Tanne wurden als Vorkommensdaten der Baumarten Level 1-Daten (siehe Erläuterungen in Hanewinkel *et al.*, 2014) und als Klimadatengrundlage WorldClim-Daten (Hijmans *et al.*, 2005) verwendet. Bei den Baumarten Traubeneiche (überarbeitet 2022-2024), Douglasie, Waldkiefer und Bergahorn wurden als Vorkommensdaten EU-Forest-Daten (Mauri *et al.*, 2017) und als Klimadaten der CHELSA-Datensatz (Karger *et al.*, 2017) verwendet. Dabei wurde bei Douglasie das Nichtvorkommen im EU-Forest-Datensatz im Schwarzwald an solchen Punkten in ein Vorkommen geändert, an denen langjährige und vitale waldwachstumskundliche Douglasien-Versuchsflächen bekannt sind, und die Standortskartierung mindestens die Eignungskategorie „möglich“ oder besser auswies. Bei Kiefer wurde das sehr häufige Vorkommen in Skandinavien gutachtlich reduziert, um die überstarke boreale Klimasignatur der Baumart abzuschwächen und

auch die bekannten Kiefernorkommen im gemäßigten Klimaraum deutlicher spürbar abzubilden (Details siehe Projektbericht Nr. 1813, S. 7-8).

Für die Beurteilung der Baumarteneignung wurden die vorhergesagten Vorkommenswahrscheinlichkeiten in aussagekräftige Klassen unterteilt (Hanewinkel *et al.*, 2014). Bei Über- bzw. Unterschreiten bestimmter (artspezifischer) Schwellenwerte wurde das Eignungskriterium „Stabilität“ um einen Punkt erhöht bzw. abgesenkt.

Artverbreitungsmodelle beschreiben die realisierte ökologische Nische einer Art, nicht die fundamentale ökologische Nische. Sie subsumieren gleichzeitig mehrere demographische Prozesse, wie z. B. die Fähigkeit einer Art zur Reproduktion, die Konkurrenzstärke gegenüber anderen Arten, oder die Mortalität. Artverbreitungsmodelle können methodenbedingt die fundamentale ökologische Nische von Arten nicht abbilden. In bewirtschafteten Ökosystemen beinhalten Artverbreitungsmodelle die Artpräferenzen der Bewirtschaftenden implizit und können zur Einschätzung großräumiger geoökologischer Besiedlungstrends verwendet werden.

2.4 Sturmwurfgefährdung

Die Sturmwurfgefährdung wurde für die Baumarteneignung und die Vulnerabilität getrennt berechnet. Sie liegt getrennt für die fünf Baumartengruppen Tanne mit Douglasie (TaDgl), Buche mit Eiche (BuEi), Fichte (Fi), Kiefer mit Europäischer Lärche (KieLae) sowie andere Laubhölzer mit niedriger und hoher Lebensdauer (ALHALN) vor. Die Trennung von Tanne und Douglasie sowie Buche und Eiche ist nicht möglich, da sich diese Baumarten im verwendeten Modell nicht signifikant unterscheiden. Der in den Karten dargestellte Prozentwert ist die Wahrscheinlichkeit, mit der ein Einzelbaum beim Auftreten eines durchschnittlichen, landesweit einheitlichen Normsturms geschädigt würde (Bruch oder Wurf).

Für die Berücksichtigung der Sturmwurfgefährdung bei der **Baumarteneignung** wurde das Sturmschadenspotential mithilfe sogenannter Durchschnittsbäume für eine Horizontalauflösung von 25 m berechnet (*layername sturmschadenspotential*). Das bedeutet, dass an jedem Ort in Baden-Württemberg ein Baum mit der gleichen Baumhöhe und dem gleichen Baumdurchmesser verwendet wurde. Das Festsetzen dieser Parameter ermöglicht dann den Vergleich zwischen den Baumarten unter sonst gleichen Bedingungen, sodass die Risikoeinschätzung als Potentialbetrachtung erfolgen kann.

Zur Ermittlung dieser durchschnittlichen Normbäume wurde die Bundeswaldinventur 3 herangezogen. Dabei wurden je Baumartengruppe die Höhe des 80. Perzentils und der h/d-Wert des 50. Perzentils verwendet. Dadurch werden adulte Bäume nahe ihrer Maximalhöhe und mit mittlerem h/d-Wert zugrundegelegt. Diese Eingangswerte wurden in Kombination mit Daten zur topographischen Exponiertheit, und für Fichte auch Staunässe, unter Anwendung eines statistischen Sturmschadensmodells (Schmidt *et al.*, 2010) in Sturmschadenswahrscheinlichkeiten umgerechnet. Als Schwellenwerte für die Baumarteneignungsbeurteilung wurden Wahrscheinlichkeiten von 0.05 und 0.1 verwendet, bei deren Über- und Unterschreitung das Teilkriterium Stabilität modifiziert wurde.

Für die Berücksichtigung der Sturmwurfgefährdung bei der **Vulnerabilität** wurde der heutige Zustand der Wälder in Baden-Württemberg mit einer Horizontalauflösung von 20 m verwendet. Hierfür wurden alle Waldpixel anhand von Satellitendaten des Jahres 2018 in Baumartengruppen eingeteilt.

Aus Stereoluftbildern wurde die Höhe der vorhandenen Bäume in m als Vegetationsoberhöhe ermittelt (nDSM der Jahre 2014-2017). Unter Verwendung von Daten zur topographischen Exponiertheit (Topex-Index) wurde mit einem statistischen Sturmschadensmodell (Schmidt *et al.*, 2010) eine Wahrscheinlichkeit für Sturmschaden berechnet. Die Sturm-Vulnerabilität (*layername sturmschadensrisiko_real*) ist damit abhängig von der real vorhandenen Baumart, der realen Baumhöhe, dem h/d-Wert, der topographischen Exponiertheit und bei Fichte auch von Staunässe (ja/nein). Für die Berechnung der Vulnerabilität fließt die Sturmschadenswahrscheinlichkeit als kontinuierlicher Wert ein.

Die Sturmwurfwahrscheinlichkeit bei der Vulnerabilitätsbetrachtung liefert Hinweise auf besondere Gefährdungs-Hotspots der heutigen Wälder. Ist eher das abstrakte baumartenbezogene Risikopotential von Interesse, kann die Karte des Sturmschadenspotentials bei der Baumarteneignung nachgeschlagen werden.

Die Sturmwurfgefährdung unterscheidet sich für die verschiedenen Klimaszenarien nicht und fließt deshalb in allen Szenarien gleich ein. Gründe hierfür sind, dass es erstens nicht klar ist, ob in Zukunft großflächige Winterstürme in Häufigkeit oder Intensität signifikant zunehmen (Albrecht *et al.*, 2009; Feser *et al.*, 2015; Mölter *et al.*, 2016), und dass zweitens keine entsprechenden Klimaprojektionsdaten vorliegen, die in Form verschiedener Böengeschwindigkeiten für die verschiedenen Klimaszenarien berücksichtigt werden könnten. Mehr Informationen zur Methodik können bei Albrecht und Almehasneh (2018) eingesehen werden.

2.5 Bonität

Die möglichen Veränderungen des Waldwachstums unter Klimawandel wurden mithilfe eines Bonitätsmodells für die Baumarten Fichte, Buche, Eiche und Tanne berechnet (Yue *et al.*, 2016). Berücksichtigt werden in diesem Modell Veränderungen von Niederschlag und Temperatur in der Vegetationszeit, der Ariditätsindex sowie Stickstoff- und Schwefeldepositionen. Ausgehend vom Ausgangszustand der Bonitäten heute, der auf der Basis von Bundeswaldinventur- und Versuchsflächendaten unter Anwendung von Random Forest Modellen zur Regionalisierung erstellt wurde (*layername ausgangsbonitaet_current*), wurden veränderte Bonitäten für die Zukunftsszenarien berechnet. Aus diesen Projektionswerten wurden relative Bonitätsveränderungen errechnet (*layername relative_bonitaetsveraenderung*), um die großen Unterschiede der absoluten Oberhöhenbonitäten zwischen Laub- und Nadelbaumarten besser vergleichbar zu machen.

Das ausgewählte Modell deckt leider die Baumarten Bergahorn, Waldkiefer und Douglasie nicht ab. Für diese Baumarten erfolgt deshalb die klimadynamisierte Beurteilung der Baumarteneignung ohne Bonitätsveränderungen.

Im Zuge der Eignungsbeurteilung wurden Bonitätsveränderungen von > + 10 % sowie < -10 % mit einer Verbesserung bzw. Verschlechterung des Kriteriums „Leistung“ (Masse) bewertet.

3 Berechnung der gesamten Baumarteneignung

Die Berechnung der Baumarteneignung (2.1/2.0) wurde durch Synthese der einzelnen dynamischen Eignungsaspekte mit den bisher bereits verwendeten statischen Eignungsaspekten der Baumarteneignung (Aldinger und Michiels, 1997) vorgenommen. Betroffen von den klimadynamischen Modifikationen ist überwiegend das Eignungskriterium Stabilität (Abbildung 1).

Zusätzlich wirken sich auch Veränderungen des Zuwachses an Derbholzmasse für vier der sieben Baumarten auf das Kriterium Leistung aus.

Klimadynamisierte Baumarteneignung (V2.1)

[7 Stufen: geeignet bis ungeeignet]

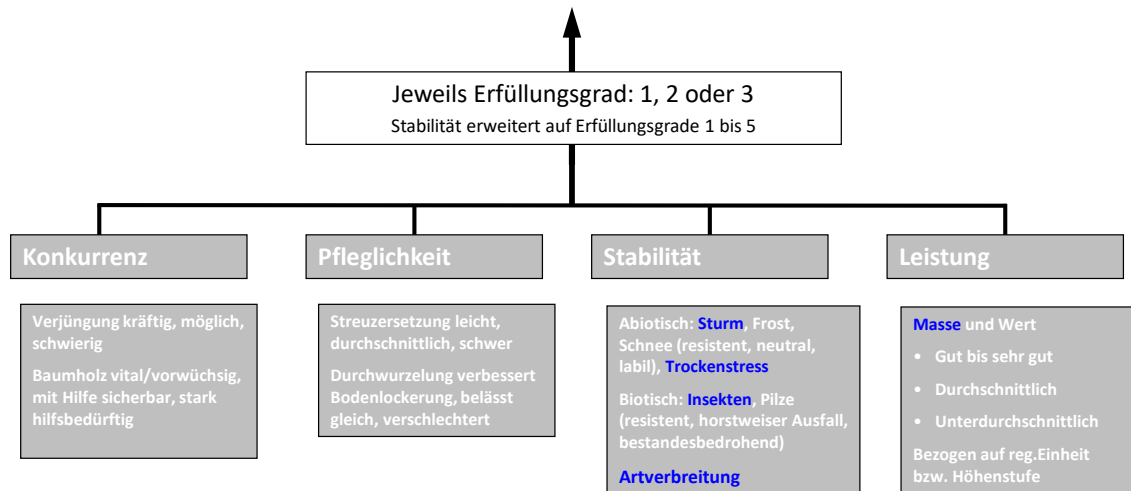


Abbildung 1: Schematische Darstellung zur Dynamisierung der Baumarteneignung im Klimawandel (Version 2.1). Das statische Verfahren nach Aldinger und Michiels (1997) wurde modifiziert, indem die blau hervorgehobenen Teilkriterien klimadynamisch abgebildet wurden. Das Teilkriterium Insekten ist nur bei Fichte für Buchdrucker dynamisiert, die Massenleistung ist nur für Fichte, Tanne, Traubeneiche und Buche klimadynamisiert.

Die Berechnung der Gesamteignung setzt sich zusammen aus den Punktwerten der Teilkriterien. Die Werte der blau hervorgehobenen klimadynamischen Teilkriterien unterscheiden sich je nach Klimaszenario. Der Berechnungsweg für die Gesamteignung wurde als expertenbasierter Entscheidungsbaum implementiert und ist als Anhang 1 in Abschnitt 5 als Tabellen hinterlegt.

Die Eignung von Weißtanne und Traubeneiche wurde bislang in der Standortskartierung in Baden-Württemberg nicht flächendeckend ermittelt. Unter konstanten Klimabedingungen der Vergangenheit war beispielsweise die Eignung der Traubeneiche in hochmontanen Lagen irrelevant. Unter sich ändernden Klimabedingungen könnten aber auch hohe Lagen in Betracht kommen. Um solche zukünftig potentiellen Flächen hinsichtlich ihrer zukünftigen Gesamteignung zu beurteilen, musste der heutige Eignungszustand auf diesen Fehlflächen ergänzt werden. Dies wurde mit einfachen und pauschalen Ergänzungsalgorithmen für zonale Standortseinheiten (ohne Auestandorte) durchgeführt. Da die bei beiden Baumarten betroffenen Naturräume außerhalb der aktuellen natürlichen Verbreitung dieser beiden Baumarten liegen, wurde beim Kriterium Konkurrenz pauschal der Wert 3 eingesetzt, bei Pfléglichkeit für Tanne konstant der Wert 2, für Traubeneiche konstant der Wert 1, und die Leistungsziffer wurde bei der Tanne analog zur Fichte und bei der Traubeneiche analog zur Buche gesetzt. Für die Stabilitätsziffer wurden die Klassenausprägungen der Artverbreitungsmodelle für das heutige Klima übernommen: Klasse 1 + 2 = Stabilität 1, Klasse 3 = Stabilität 2, Klasse 4 = Stabilität 3. Diese Ergänzungen führten zu einer deutlich besseren Flächenabdeckung dieser beiden Baumarten und ermöglichen auch für Flächen, die heute noch nicht für diese Baumarten relevant sind, eine Einschätzung der zukünftigen Baumarteneignung.

Für die Baumarten Bergahorn, Waldkiefer und Douglasie lag die Ausgangsbewertung, also die statische Einstufung durch die forstliche Standortkartierung, ebenfalls nicht flächendeckend bzw. nicht in Form der vierziffrigen Bewertung der Kriterien Konkurrenz, Pfléglichkeit, Stabilität und Leistung vor. Für die Erweiterung der Baumarteneignungskarten 2.1 um diese drei Baumarten wurden keine Ergänzungsalgorithmen verwendet. Die Ausgangsbewertung für Bergahorn, Waldkiefer und Douglasie wurde durch den Arbeitsbereich Standortkartierung der FVA im Vorfeld der Dynamisierung für nahezu alle Standortseinheiten gutachtlich ergänzt, für die bislang noch keine Bewertungen vorlagen. Die vierziffrigen Bewertungen wurde nicht nur für die Erstellung der Baumarteneignungskarten 2.1 verwendet, sondern auch in die reguläre Datenbank der Standortkartierung und damit auch in die Baumarteneignungstabellen der Standortkartierung (<https://www.fva-bw.de/daten-tools/geodaten/standortkartierung> → Metadaten, Legenden, Baumarteneignung) übernommen und kann dort eingesehen werden.

Die Kombination aus herkömmlicher Standortkartierung und modellbasierter Einschätzung der klimadynamischen Komponenten liefert im Endergebnis die Einschätzung der Baumarteneignung unter Klimawandel, unter Berücksichtigung waldbaulicher und standortkundlicher Erfahrungen. Dabei können die Klassenausprägungen der vier Hauptstufen für praktische Zwecke in der Forsteinrichtung und Waldbauplanung folgendermaßen interpretiert werden:

Tabelle 1: Die vier Hauptstufen der Baumarteneignung und deren waldbauliche Interpretation. Die insgesamt sieben Stufen ergeben sich durch Ergänzung mit drei intermediären Zwischenstufen (z. B. geeignet bis möglich).

Eignungsstufe	Waldbauliche Interpretation
geeignet	keine standortsbedingten Einschränkungen für Anbau und Bewirtschaftung der Baumart
möglich	Bewirtschaftung als führende Baumart ist unter Beachtung von Einschränkungen möglich
wenig geeignet	Baumart nur als Beimischung mit einem Anteil von nicht mehr als 20-30%
ungeeignet	Baumart sollte allenfalls einzeln beigemischt werden oder als Zeitmischung vorhanden sein

Die Bedeutungen der Hauptstufen sind mit der Modellversion 1.0 der Baumarteneignung aus dem Jahr 2010 identisch. Hierzu sind mehr Informationen unter Michiels (2011) und Hanewinkel et al. (2014) einsehbar.

4 Berechnung des Vulnerabilitätsindex

Die Vulnerabilität wurde mithilfe eines Bayesian Belief Networks errechnet, das es erlaubt, anhand von Expertenwissen unterschiedliche Eingangsinformationen über Einzelrisiken zu einem Gesamtwert eines Vulnerabilitätsindex zusammenzuführen.

Ein Bayesian Belief Network wird auch als hierarchisches Bayesmodell oder Bayesianisches Netz bezeichnet und gehört zu den graphischen statistischen Modellen, die eine Reihe von Zufallsvariablen und ihre bedingten Abhängigkeiten mit Hilfe eines gerichteten azyklischen, also nicht rückkoppelnden, Graphen beschreiben. Dieses Verfahren wird beispielsweise in der medizinischen Diagnostik genutzt, um die Zusammenhänge zwischen Symptomen und Krankheiten zu beschreiben

und so die Wahrscheinlichkeit verschiedener möglicher Krankheitsursachen abzuschätzen. Formal handelt es sich um Graphen, also graphische Konstrukte aus sogenannten Knoten und „Kanten“ (Verbindungen zwischen den Knoten), wobei die Knoten Zufallsvariablen im Bayes'schen Sinne repräsentieren, also beobachtbare Größen, latente Variablen, unbekannte Parameter oder Hypothesen. Die bedingten Abhängigkeiten werden durch die Kanten zwischen den Knoten repräsentiert. Nicht verbundene Knoten sind voneinander unabhängig. Knoten, die von anderen Knoten abhängen (Elternknoten), sind mit einer Wahrscheinlichkeitsfunktion (oft realisiert als bedingte Wahrscheinlichkeitstabelle) verknüpft, welche als Eingangssignal die Werte der „Eltern-Knoten“ annimmt und die Wahrscheinlichkeit der Werte dieses Knotens (bzw. der repräsentierten Variablen) bestimmt. Mithilfe von Algorithmen können Inferenzen (statistische Schlüsse) gezogen oder Lernprozesse vollzogen werden. Auf diese Weise können Bayesianische Netze als Entscheidungssysteme genutzt werden (Marcot *et al.*, 2006; Marcot, 2006). Abbildung 2 zeigt das Einflussdiagramm des Bayesian Belief Networks beispielhaft für die Vulnerabilitätsbeurteilung der Baumart Fichte.

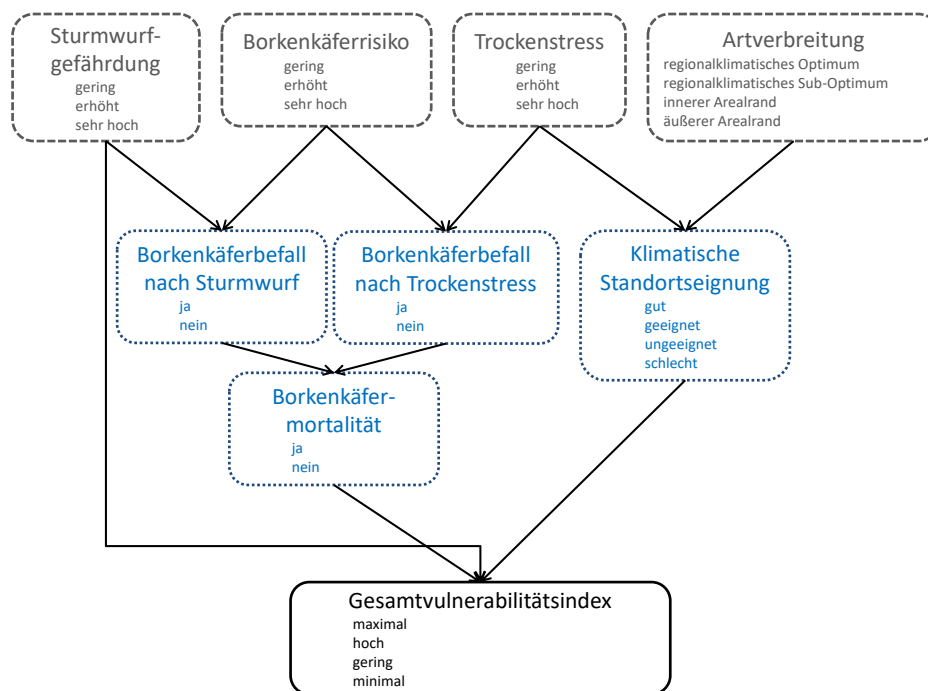


Abbildung 2: Einflussdiagramm der Vulnerabilitätsbeurteilung mithilfe des Bayesian Belief Network, beispielhaft für die Baumart Fichte. Der aggregierte Vulnerabilitätsindex (schwarz, durchgezogene Linie) setzt sich aus Einzelrisiken (dunkelgrau, lang-gestrichelte Linie) und deren Interaktionen (blau, kurzgestrichelte Linie) zusammen.

In der konkreten Anwendung des Bayesianischen Netzes für die Baumart Fichte wirken nach Abbildung 2 die drei Faktoren Standortseignung, Borkenkäfermortalität und Sturmwurfgefährdung direkt auf den Vulnerabilitätsindex. Dabei wird die Standortseignung ihrerseits durch die zwei untergeordneten Einflussfaktoren Trockenstress (Wasserhaushaltsmodell LWF-Brook90, siehe Abschnitt 2.1) und Artverbreitung (Artverbreitungsmodell, siehe Abschnitt 2.3) bestimmt. Die Borkenkäfermortalität wird zum einen als Befall nach Sturmwurf, zum anderen als Befall nach Trockenstress geschätzt, um die besondere Prädisposition dieser interagierenden Faktoren zu quantifizieren (Modell Phenips für Borkenkäfermortalität Abschnitt 2.2, Wasserhaushaltsmodell LWF-Brook90 Abschnitt 2.1 und Sturmmodell Abschnitt 2.4).

Für die anderen Baumarten entfallen die Knotenpunkte, die mit Borkenkäfermortalität assoziiert sind und damit werden die Einflussdiagramme und die dazugehörigen bedingten Wahrscheinlichkeitstabellen etwas einfacher. Das Grundprinzip zur Herleitung des Vulnerabilitätsindex ist jedoch gleich.

Die für die Anwendung des BBN erforderlichen Wahrscheinlichkeitstabellen sind in den Tabellen in Abschnitt 6 zusammengestellt und konkretisieren die Berechnungsabläufe. Beispielsweise werden im intermediären Knotenpunkt „klimatische Standortseignung“ (Tabelle 2 und Anhang 2 in Abschnitt 6.7) die Wahrscheinlichkeiten für die Eignungsstufen gut, geeignet, ungeeignet und schlecht den verschiedenen Kombinationen von Trockenstress (brook90) sowie Artverbreitung (sdm) zugeordnet. Herrscht an einem Ort weder Trockenstress (brook90 = 0) noch Klimabilität (sdm = 0), Zeile 1, so wird dieser Ort mit einer Wahrscheinlichkeit von 1 der klimatischen Standortseignungs-Klasse gut zugeordnet. Herrscht an einem Ort starker Trockenstress (brook90 = 2) und lautet die Einschätzung der Artverbreitungsmodelle „innerer Arealrand“ (sdm = 1), Zeile 6, so verteilt sich die Klassenbelegung mit 5 % auf gut, je 45 % auf geeignet und ungeeignet, und 5 % auf schlecht. Die Ermittlung der Wahrscheinlichkeiten für die anderen Knotenpunkte erfolgt analog zu dieser Vorgehensweise.

Tabelle 2: Beispielhafte bedingte Wahrscheinlichkeitstabelle des Bayesian Belief Network für die Berechnung der Vulnerabilität. Dargestellt ist der Knotenpunkt klimatische Standortseignung.

```
# vpar: sdm brook90, brook90, sdm
# levels: GÜT, GEEIGNET, UNGEEIGNET, SCHLECHT
# conditional probability values:
# GÜT GEEIGNET UNGEEIGNET SCHLECHT | brook90 sdm
1 0 0 0 | 0 0
0.45 0.45 0.1 0 | 1 0
0.25 0.5 0.25 0 | 2 0
0.45 0.45 0.1 0 | 0 1
0.05 0.9 0.05 0 | 1 1
0.05 0.45 0.45 0.05 | 2 1
0.25 0.4 0.25 0.1 | 0 2
0.05 0.45 0.45 0.05 | 1 2
0 0.05 0.9 0.05 | 2 2
0.1 0.4 0.4 0.1 | 0 3
0 0.25 0.5 0.25 | 1 3
0 0.1 0.45 0.45 | 2 3
```

Jedes 20 m Pixel in Baden-Württemberg wurde einer der vier Hauptbaumarten zugeordnet. Allerdings sind die Vulnerabilitätslayer für Buche und Eiche lageidentisch, d.h. es gibt je 20 m Pixel einen Vulnerabilitätswert Eiche und einen Vulnerabilitätswert Buche. Bei der satellitenbasierten Baumartenerkennung konnten diese beiden Baumarten nicht mit ausreichend hoher Genauigkeit voneinander getrennt werden. Insofern führte die Anwesenheit einer der beiden Arten im Satellitenpixel zur Klassifikation in die Baumartengruppe Buche-Eiche. Für die Benutzung der Vulnerabilitätskarte ist deshalb die jeweils im Gelände vorhandene Hauptbaumart zugrunde zu legen.

In den Vulnerabilitätskarten sind die Muster von zwei verschiedenen Horizontalaufösungen vorhanden: Die feinen Muster der 20 m Auflösung gehen auf die hochaufgelöste satellitenbasierte Baumartenklassifizierung zurück. Überlagert wird dieses Muster durch eine gröbere Auflösung von 250 m. Diese gröberen, als Kacheln erscheinenden Muster stammen aus den Teilaspekten

Wasserhaushalt, Borkenkäferisiko und Artverbreitungsmodelle, für die aus berechnungstechnischen Gründen nur diese etwas gröbere räumliche Auflösung realisierbar war.

Als Konsequenz dieses Vorgehens liegt für diejenigen Waldpixel kein Vulnerabilitätswert vor, die den Baumarten Kiefer, Lärche und sonstige Laub- und Nadelbäume zugeordnet sind. Aufgrund fehlender Eingangsdatengrundlagen konnte kein Vulnerabilitätsindex berechnet werden.

Wälder, die in die höchste Vulnerabilitätsklasse 4 eingestuft wurden, sollten im Zuge der Anpassung an den Klimawandel zuerst umgebaut werden. In ihnen sind entweder gleichzeitig mehrere oder ein bestimmter Risikofaktor so groß, dass die dort prägende Hauptbaumart instabil und extrem störungsanfällig ist (Tabelle 3). Wälder, die in die zweithöchste Vulnerabilitätsklasse 3 eingestuft wurden, sollten ebenso umgebaut werden, sind allerdings nicht umgehend sondern erst an zweiter Stelle, also mittelfristig bzw. nach Klasse 4 umbaudringlich. In den beiden Klassen 2 und 1 ist ein genereller Baumartenwechsel nicht erforderlich, da die meisten Risikofaktoren auf so geringem Niveau sind, dass mit frühzeitiger Mortalität nicht zu rechnen ist. In Wäldern der Klasse 2 ist jedoch empfehlenswert die Anteile von Baumarten zu erhöhen, deren Eignung besser als die der heute vorhandenen Hauptbaumart ist.

Tabelle 3: Vulnerabilitätsklassen und deren waldbauliche Interpretation

Klasse	Name	Interpretation
4	sehr hoch	Umgehend umbaudringlich
3	hoch	Mittelfristig umbaudringlich
2	gering	Wenig vulnerabel, Baumartenanteile sukzessive zugunsten besser geeigneter Baumarten reduzieren
1	sehr gering	Nicht vulnerabel

5 Anhang 1: Baumarteneignung. Regelbäume und Matrix für die Ermittlung der klimadynamischen Baumarteneignung

5.1 Regelbaum Buche¹ (Version 2.0)

Kriterium	Regelstufe	Teilkriterium	Erfüllung	Fortgang	Ergebniswert des Kriteriums
Stabilität	A	1 TK Stufe II	ja	B	
			nein	E	
	B	2 TK Stufe II	ja	nein	5
			nein	C	
	C	1 TK Stufe I	ja	D	
			nein	O1	
	D	2 TK Stufe I	ja	nein	5
			nein	nein	4
	E	1 TK Stufe I	ja	F	
			nein	M1	
	F	2 TK Stufe I	ja	O1	
			nein	N1	
	M1	Ausgangswert = 1	ja	nein	1
	M2	Ausgangswert = 2	ja	nein	2
			nein	M3	
	M3	Ausgangswert = 3	ja	nein	2
	N1	Ausgangswert = 1	ja	nein	2
			nein	N2	
	N2	Ausgangswert = 2	ja	nein	3
			nein	N3	
	N3	Ausgangswert = 3	ja	nein	4
	O1	Ausgangswert = 1	ja	nein	3
			nein	O2	
	O2	Ausgangswert = 2	ja	nein	4
nein			O3		
O3	Ausgangswert = 3	ja	nein	5	
Leistung	M	Ausgangswert = 1			
	M1	RÄO $\geq 0,1$	ja	nein	1
			nein	M2	
	M2	RÄO $\leq -0,1$	ja	nein	2
			nein	M3	
	M3	$0,1 > \text{RÄO} > -0,1$	ja	nein	1
	N	Ausgangswert = 2			
	N1	RÄO $\geq 0,1$	ja	nein	1
			nein	N2	
	N2	RÄO $\leq -0,1$	ja	nein	3
			nein	N3	
	N3	$0,1 > \text{RÄO} > -0,1$	ja	nein	2
	O	Ausgangswert = 3			
	O1	RÄO $\geq 0,1$	ja	nein	2
			nein	O2	
	O2	RÄO $\leq -0,1$	ja	nein	3
			nein	O3	
	O3	$0,1 > \text{RÄO} > -0,1$	ja	nein	3

¹ Abkürzungen:

TK = Teilkriterium

RÄO: relative Änderung der Oberhöhenbonität

5.2 Regelbaum Fichte² (Version 2.0)

Kriterium	Regelstufe	Teilkriterium	Erfüllung	Fortgang	Ergebniswert des Kriteriums
Stabilität	A	1 TK Stufe II	ja	B	
			nein	E	
	B	2 TK Stufe II	ja	nein	5
			nein	C	
	C	1 TK Stufe I	ja	D	
			nein	O1	
	D	2 TK Stufe I	ja	nein	5
			nein	nein	4
	E	1 TK Stufe I	ja	F	
			nein	M1	
	F	2 TK Stufe I	ja	G	
			nein	N1	
	G	3 TK Stufe I	ja	nein	5
			nein	O1	
	M1	Ausgangswert = 1	ja	nein	1
			nein	M2	
	M2	Ausgangswert = 2	ja	nein	2
			nein	M3	
	M3	Ausgangswert = 3	ja	nein	2
			nein	M2	
	N1	Ausgangswert = 1	ja	nein	2
			nein	M2	
	N2	Ausgangswert = 2	ja	nein	3
			nein	M3	
	N3	Ausgangswert = 3	ja	nein	4
			nein	M2	
	O1	Ausgangswert = 1	ja	nein	3
			nein	M2	
	O2	Ausgangswert = 2	ja	nein	4
			nein	M3	
O3	Ausgangswert = 3	ja	nein	5	
		nein	M2		
Leistung	M	Ausgangswert = 1	ja	nein	1
			nein	M2	
	M1	RÄO $\geq 0,1$	ja	nein	1
			nein	M2	
	M2	RÄO $\leq -0,1$	ja	nein	2
			nein	M3	
	M3	0,1 > RÄO > -0,1	ja	nein	1
			nein	M2	
	N	Ausgangswert = 2	ja	nein	1
			nein	N2	
	N1	RÄO $\geq 0,1$	ja	nein	1
			nein	N2	
	N2	RÄO $\leq -0,1$	ja	nein	3
			nein	N3	
	N3	0,1 > RÄO > -0,1	ja	nein	2
			nein	M2	
	O	Ausgangswert = 3	ja	nein	2
			nein	O2	
	O1	RÄO $\geq 0,1$	ja	nein	2
			nein	O2	
	O2	RÄO $\leq -0,1$	ja	nein	3
			nein	O3	
	O3	0,1 > RÄO > -0,1	ja	nein	3
			nein	O3	

² Abkürzungen:
TK = Teilkriterium

5.3 Regelbaum Tanne³ (Version 2.0)

Kriterium	Regelstufe	Teilkriterium	Erfüllung	Fortgang	Ergebniswert des Kriteriums											
Stabilität	A	1 TK Stufe II	ja	B	5											
			nein	E												
	B	2 TK Stufe II	ja	nein		5										
			nein	C												
	C	1 TK Stufe I	ja	D			5									
			nein	O1												
	D	2 TK Stufe I	ja	nein				5								
			nein	nein					4							
	E	1 TK Stufe I	ja	F					5							
			nein	M1												
	F	2 TK Stufe I	ja	O1						5						
			nein	N1												
	M1	Ausgangswert = 1	ja	nein							1					
			nein	M2												
	M2	Ausgangswert = 2	ja	nein								2				
			nein	M3												
	M3	Ausgangswert = 3	ja	nein									2			
			nein	N1												
	N1	Ausgangswert = 1	ja	nein										2		
			nein	N2												
	N2	Ausgangswert = 2	ja	nein											3	
			nein	N3												
	N3	Ausgangswert = 3	ja	nein												4
			nein	O1												
O1	Ausgangswert = 1	ja	nein	3												
		nein	O2													
O2	Ausgangswert = 2	ja	nein		4											
		nein	O3													
O3	Ausgangswert = 3	ja	nein			5										
		nein														
Leistung	M	Ausgangswert = 1														
	M1	RÄO $\geq 0,1$	ja				nein	1								
			nein													
	M2	RÄO $\leq -0,1$	ja				nein		2							
			nein													
	M3	0,1 > RÄO > -0,1	ja				nein			1						
			nein													
	N	Ausgangswert = 2	ja								1					
			nein				N2									
	N2	RÄO $\leq -0,1$	ja				nein					3				
			nein				N3									
	N3	0,1 > RÄO > -0,1	ja				nein						2			
			nein													
	O	Ausgangswert = 3	ja											2		
			nein				O2									
	O1	RÄO $\geq 0,1$	ja				nein								2	
			nein				O2									
	O2	RÄO $\leq -0,1$	ja				nein									3
			nein	O3												
	O3	0,1 > RÄO > -0,1	ja	nein			3									
			nein													

RÄO: relative Änderung der Oberhöhenbonität

³ Abkürzungen:

TK = Teilkriterium

RÄO: relative Änderung der Oberhöhenbonität

5.4 Regelbaum Traubeneiche⁴ (Version 2.1, ab 2024)

Klimatische Eignung / Ausgangswert	Sturmwurfrisiko	Wasserhaushalts- beurteilung	Stabilitätsziffer
0	0	0	1
1	0	0	2
2	0	0	2
0	1	0	2
1	1	0	3
2	1	0	4
0	0	1	2
1	0	1	3
2	0	1	4
0	1	1	3
1	1	1	4
2	1	1	5
0	2	0	3
1	2	0	4
2	2	0	5
0	0	2	3
1	0	2	4
2	0	2	5
0	2	1	4
1	2	1	4
2	2	1	4
0	1	2	4
1	1	2	4
2	1	2	4
0	2	2	5
1	2	2	5
2	2	2	5

Matrix zur Bestimmung der Stabilitätsziffer der Traubeneiche (2.1)

⁴ Abkürzungen:

TK = Teilkriterium

RÄO: relative Änderung der Oberhöhenbonität

5.5 Veralteter Regelbaum Traubeneiche⁵ (Version 2.0, 2019)

Kriterium	Regelstufe	Teilkriterium	Erfüllung	Fortgang	Ergebniswert des Kriteriums									
Stabilität	A	1 TK Stufe II	ja	B	5									
			nein	E										
	B	2 TK Stufe II	ja	nein		4								
			nein	C										
	C	1 TK Stufe I	ja	nein			1							
			nein	O1										
	E	1 TK Stufe I	ja	F				2						
			nein	M1										
	F	2 TK Stufe I	ja	O1					2					
			nein	N1										
	M1	Ausgangswert = 1	ja	nein						3				
			nein	M2										
	M2	Ausgangswert = 2	ja	nein							2			
			nein	M3										
	M3	Ausgangswert = 3	ja	nein								3		
			nein	N2										
	N1	Ausgangswert = 1	ja	nein									4	
			nein	N3										
	N2	Ausgangswert = 2	ja	nein										3
			nein	N3										
N3	Ausgangswert = 3	ja	nein	4										
		nein	O2											
O1	Ausgangswert = 1	ja	nein		4									
		nein	O3											
O2	Ausgangswert = 2	ja	nein			4								
		nein	O3											
O3	Ausgangswert = 3	ja	nein				4							
		nein	O3											
Leistung	M	Ausgangswert = 1							1					
	M1	RÄO $\geq 0,1$	ja					nein						
			nein					M2						
	M2	RÄO $\leq -0,1$	ja					nein		1				
			nein					M3						
	M3	0,1 > RÄO > -0,1	ja					nein			1			
			nein					N						
	N	Ausgangswert = 2	ja					nein				3		
			nein					N2						
	N1	RÄO $\geq 0,1$	ja					nein					2	
			nein					N3						
	N2	RÄO $\leq -0,1$	ja					nein						3
			nein	N3										
	N3	0,1 > RÄO > -0,1	ja	nein				2						
			nein	O										
	O	Ausgangswert = 3	ja	nein	2									
			nein	O2										
	O1	RÄO $\geq 0,1$	ja	nein		3								
			nein	O3										
	O2	RÄO $\leq -0,1$	ja	nein			3							
nein			O3											
O3	0,1 > RÄO > -0,1	ja	nein	3										
		nein	O3											

⁵ Abkürzungen:

TK = Teilkriterium

RÄO: relative Änderung der Oberhöhenbonität

5.6 Regelbäume für Bergahorn, Douglasie und Waldkiefer⁶ (Version 2.1)

Kriterium	Regelstufe	Teilkriterium	Erfüllung	Fortgang	Ergebniswert des Kriteriums
Stabilität	A	1 TK Stufe II	ja	B	
			nein	E	
	B	2 TK Stufe II	ja	nein	5
			nein	C	
	C	1 TK Stufe I	ja	nein	4
			nein	O1	
	E	1 TK Stufe I	ja	F	
			nein	M1	
	F	2 TK Stufe I	ja	O1	
			nein	N1	
	M1	Ausgangswert = 1	ja	nein	1
			nein	M2	
	M2	Ausgangswert = 2	ja	nein	2
			nein	M3	
	M3	Ausgangswert = 3	ja	nein	2
	N1	Ausgangswert = 1	ja	nein	2
			nein	N2	
	N2	Ausgangswert = 2	ja	nein	3
			nein	N3	
	N3	Ausgangswert = 3	ja	nein	4
	O1	Ausgangswert = 1	ja	nein	3
			nein	O2	
	O2	Ausgangswert = 2	ja	nein	4
			nein	O3	
	O3	Ausgangswert = 3	ja	nein	4

⁶ Abkürzungen:

TK = Teilkriterium

RÄO: relative Änderung der Oberhöhenbonität

5.7 Matrix zur Ermittlung der Gesamteignung

Konkurrenz	Stabilität = 1					Stabilität = 2					Stabilität = 3					Stabilität = 4					Stabilität = 5				
	Pflichtigkeit	Stabilität	Leistung		Gesamteignung	Konkurrenz	Pflichtigkeit	Stabilität	Leistung	Gesamteignung	Konkurrenz	Pflichtigkeit	Stabilität	Leistung	Gesamteignung	Konkurrenz	Pflichtigkeit	Stabilität	Leistung	Gesamteignung	Konkurrenz	Pflichtigkeit	Stabilität	Leistung	Gesamteignung
1	1	1	1		g	1	1	2	1	g	1	1	3	1	g/m	1	1	4	1	m	1	1	5	1	m/w
2	1	1	1		g	2	1	2	1	g/m	2	1	3	1	m	2	1	4	1	m/w	2	1	5	1	w
3	1	1	1		g	3	1	2	1	g/m	3	1	3	1	m	3	1	4	1	w	3	1	5	1	w/u
1	2	1	1		g	1	2	2	1	g/m	1	2	3	1	m	1	2	4	1	m	1	2	5	1	m/w
2	2	1	1		g	2	2	2	1	g/m	2	2	3	1	m/w	2	2	4	1	m/w	2	2	5	1	w
3	2	1	1		g/m	3	2	2	1	m	3	2	3	1	m/w	3	2	4	1	w	3	2	5	1	w/u
1	3	1	1		g/m	1	3	2	1	g/m	1	3	3	1	m	1	3	4	1	m/w	1	3	5	1	w
2	3	1	1		g/m	2	3	2	1	m	2	3	3	1	m/w	2	3	4	1	w	2	3	5	1	w/u
3	3	1	1		m	3	3	2	1	m/w	3	3	3	1	w	3	3	4	1	w/u	3	3	5	1	u
1	1	1	2		g	1	1	2	2	g/m	1	1	3	2	m	1	1	4	2	m/w	1	1	5	2	w
2	1	1	2		g/m	2	1	2	2	m	2	1	3	2	m/w	2	1	4	2	w	2	1	5	2	w/u
3	1	1	2		m	3	1	2	2	m/w b	3	1	3	2	w	3	1	4	2	w/u	3	1	5	2	u
1	2	1	2		g/m	1	2	2	2	m	1	2	3	2	m/w	1	2	4	2	w	1	2	5	2	w/u
2	2	1	2		m	2	2	2	2	m/w	2	2	3	2	w	2	2	4	2	w/u	2	2	5	2	u
3	2	1	2		m/w	3	2	2	2	w	3	2	3	2	w/u	3	2	4	2	u	3	2	5	2	u
1	3	1	2		m	1	3	2	2	m	1	3	3	2	m/w	1	3	4	2	w/u	1	3	5	2	u
2	3	1	2		m/w	2	3	2	2	w	2	3	3	2	w/u	2	3	4	2	u	2	3	5	2	u
3	3	1	2		w	3	3	2	2	w/u	3	3	3	2	u	3	3	4	2	u	3	3	5	2	u
1	1	1	3		g/m	1	1	2	3	mb	1	1	3	3	m/w	1	1	4	3	w	1	1	5	3	w/u
2	1	1	3		mb	2	1	2	3	mb	2	1	3	3	w	2	1	4	3	w/u	2	1	5	3	u
3	1	1	3		m/w b	3	1	2	3	w b	3	1	3	3	w/u	3	1	4	3	u	3	1	5	3	u
1	2	1	3		m	1	2	2	3	m	1	2	3	3	w	1	2	4	3	w/u	1	2	5	3	u
2	2	1	3		m/w	2	2	2	3	w	2	2	3	3	u	2	2	4	3	u	2	2	5	3	u
3	2	1	3		w	3	2	2	3	w/u	3	2	3	3	u	3	2	4	3	u	3	2	5	3	u
1	3	1	3		m	1	3	2	3	m/w	1	3	3	3	w/u	1	3	4	3	u	1	3	5	3	u
2	3	1	3		w	2	3	2	3	w/u	2	3	3	3	u	2	3	4	3	u	2	3	5	3	u
3	3	1	3		w/u	3	3	2	3	u	3	3	3	3	u	3	3	4	3	u	3	3	5	3	u

6 Anhang 2: Vulnerabilität. Bedingte Wahrscheinlichkeitstabellen des Bayesianischen Belief Network

6.1 Basisknoten der Prädiktorvariablen Wasserhaushaltsmodell LWF-Brook90

```
# vpar: brook90
# levels: 0, 1, 2
# conditional probability values:
# 0 1 2
0.1 0.5 0.4
```

6.2 Basisknoten der Prädiktorvariablen Borkenkäferisiko Phenips

```
# vpar: phenips
# levels: 0, 1, 2
# conditional probability values:
# 0 1 2
0.8 0.1 0.1
```

6.3 Basisknoten der Prädiktorvariablen Artverbreitungsmodelle

```
# vpar: sdm
# levels: 0, 1, 2, 3
# conditional probability values:
# 0 1 2 3
0.25 0.25 0.25 0.25
```

6.4 Basisknoten der Prädiktorvariablen Sturmwurfgefährdung

```
# vpar: storm
# levels: 0, 1, 2
# conditional probability values:
# 0 1 2
0.9 0.09 0.01
```

6.5 Knoten der intermediären Variablen Borkenkäferbefall nach Windwurf

```
# vpar: storm_phenips, phenips, storm
# levels: TRUE, FALSE
# conditional probability values:
# TRUE FALSE | phenips storm
0.01 0.99 | 0 0
0.05 0.95 | 1 0
0.10 0.90 | 2 0
0.05 0.95 | 0 1
0.10 0.9 | 1 1
0.50 0.5 | 2 1
0.05 0.95 | 0 2
0.50 0.50 | 1 2
0.99 0.01 | 2 2
```

6.6 Knoten der intermediären Variablen Borkenkäferbefall nach Trocknis

```
# vpar: brook90_phenips, phenips, brook90
# levels: TRUE, FALSE
# conditional probability values:
# TRUE FALSE | phenips brook90
0.01 0.99 | 0 0
0.05 0.95 | 1 0
0.10 0.90 | 2 0
0.05 0.95 | 0 1
0.10 0.9 | 1 1
0.50 0.5 | 2 1
0.05 0.95 | 0 2
0.50 0.50 | 1 2
0.99 0.01 | 2 2
```

6.7 Knoten der intermediären Variablen klimatische Standortseignung

```
# vpar: sdm_brook90, brook90, sdm
# levels: GUT, GEEIGNET, UNGEEIGNET, SCHLECHT
# conditional probability values:
# GUT GEEIGNET UNGEEIGNET SCHLECHT | brook90 sdm
1 0 0 0 | 0 0
0.45 0.45 0.1 0 | 1 0
0.25 0.5 0.25 0 | 2 0
0.45 0.45 0.1 0 | 0 1
0.05 0.9 0.05 0 | 1 1
0.05 0.45 0.45 0.05 | 2 1
0.25 0.4 0.25 0.1 | 0 2
0.05 0.45 0.45 0.05 | 1 2
0 0.05 0.9 0.05 | 2 2
0.1 0.4 0.4 0.1 | 0 3
0 0.25 0.5 0.25 | 1 3
0 0.1 0.45 0.45 | 2 3
```

6.8 Knoten der intermediären Variablen Borkenkäfermortalität

```
# vpar: kb, brook90_phenips, storm_phenips
# levels: TRUE, FALSE
# conditional probability values:
# TRUE FALSE | brook90_phenips storm_phenips
1 0 | TRUE TRUE
1 0 | FALSE TRUE
1 0 | TRUE FALSE
0 1 | FALSE FALSE
```

6.9 Posteriore Wahrscheinlichkeiten der Antwortvariablen Vulnerabilität

```
# vpar: vulnerability, storm, kb, sdm_brook90
# levels: MAXIMAL, HOCH, GERING, MINIMAL
# conditional probability values:
# MAXIMAL HOCH GERING MINIMAL | storm kb sdm_brook90
0 0 0 1 0 0 0 TRUE GUT
0 1 0 0 0 0 1 TRUE GUT
1 0 0 0 0 0 2 TRUE GUT
0 0 0 0 1 0 0 FALSE GUT
0 0 1 1 0 0 1 FALSE GUT
0 1 0 0 0 0 2 FALSE GUT
0 1 0 0 0 0 0 TRUE GEEIGNET
1 0 0 0 0 0 1 TRUE GEEIGNET
1 0 0 0 0 0 2 TRUE GEEIGNET
0 0 1 0 0 0 0 FALSE GEEIGNET
0 1 0 0 0 0 1 FALSE GEEIGNET
1 0 0 0 0 0 2 FALSE GEEIGNET
1 0 0 0 0 0 0 TRUE UNGEEIGNET
1 0 0 0 0 0 1 TRUE UNGEEIGNET
0 1 0 0 0 0 0 FALSE UNGEEIGNET
1 0 0 0 0 0 1 FALSE UNGEEIGNET
1 0 0 0 0 0 2 FALSE UNGEEIGNET
1 0 0 0 0 0 0 TRUE SCHLECHT
1 0 0 0 0 0 1 TRUE SCHLECHT
1 0 0 0 0 0 2 TRUE SCHLECHT
1 0 0 0 0 0 0 FALSE SCHLECHT
1 0 0 0 0 0 1 FALSE SCHLECHT
1 0 0 0 0 0 2 FALSE SCHLECHT
```

7 Literaturverzeichnis

- Albrecht, A., Almehasneh, A., 2018. Sturmgefährdungskarten für Baden-Württembergs Wälder als Grundlage für mittel- und langfristige Planungen. KLIMOPASS, Klimawandel und modellhafte Anpassung in Baden-Württemberg, Abschlussbericht KLIMOPASS, Projektnr: 4500519368/23.
- Albrecht, A., Schindler, D., Grebhan, K., Kohnle, U., Mayer, H., 2009. Sturmaktivität über der nordatlantisch-europäischen Region vor dem Hintergrund des Klimawandels – eine Literaturübersicht. AFJZ 180, S. 109-118.
- Aldinger, E., Michiels, H.-G., 1997. Baumarteneignung in der forstlichen Standortskartierung Baden-Württemberg. AFZ - Der Wald 5, S.
- Baier, P., Pennerstorfer, J., Schopf, A., 2007. PHENIPS—A comprehensive phenology model of *Ips typographus* (L.) (Col., Scolytinae) as a tool for hazard rating of bark beetle infestation. Forest Ecology and Management 249, S. 171-186.
- Feser, F., Barcikowska, M., Krueger, O., Schenk, F., Weisse, R., Xia, L., 2015. Storminess over the North Atlantic and northwestern Europe—A review. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society 141, S. 350-382.
- Hammel, K., Kennel, M., 2001. Charakterisierung und Analyse der Wasserverfügbarkeit und des Wasserhaushalts von Waldstandorten in Bayern mit dem Simulationsmodell BROOK90. Frank.
- Hanewinkel, M., Cullmann, D.A., Michiels, H.-G., Kändler, G., 2014. Converting probabilistic tree species range shift projections into meaningful classes for management. Journal of Environmental Management 134, S. 153-165.
- Hijmans, R.J., Cameron, S.E., Parra, J.L., Jones, P.G., Jarvis, A., 2005. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. International Journal of Climatology 25, S. 1965-1978.
- IPCC, 2013. Summary for Policymakers. In: Stocker, T., Qin, D., Plattner, G., Tignor, M., Allen, S., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, P. (Eds.), 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.
- Karger, D.N., Conrad, O., Böhner, J., Kawohl, T., Kreft, H., Soria-Auza, R.W., Zimmermann, N.E., Linder, H.P., Kessler, M., 2017. Climatologies at high resolution for the earth's land surface areas. Sci Data 4, S. 170122.
- Marcot, B., A. Hohenlohe, P., Morey, S., Holmes, R., Molina, R., Turley, M., H. Huff, M., Laurence, J., 2006. Characterizing Species at Risk II: Using Bayesian Belief Networks as Decision Support Tools to Determine Species Conservation Categories Under the Northwest Forest Plan.
- Marcot, B.G., 2006. Characterizing species at risk I: modeling rare species under the Northwest Forest Plan. Ecology and Society 11, S.
- Mauri, A., Strona, G., San-Miguel-Ayanz, J., 2017. EU-Forest, a high-resolution tree occurrence dataset for Europe. 160123 Seiten.
- Michiels, H.-G., 2011. Abschlussbericht zur dynamischen Baumarteneignungsbeurteilung.
- Mölter, T., Schindler, D., Albrecht, A.T., Kohnle, U., 2016. Review on the Projections of Future Storminess over the North Atlantic European Region. Atmosphere 7, S. 1-40.
- Puhlmann, H., 2013. Bodenwasserhaushalt und Baumwachstumsreaktionen an BZE-Monitoringpunkten. Freiburger Forstliche Forschung 96, S. 129-140.

- Schmidt, M., Hanewinkel, M., Kändler, G., Kublin, E., Kohnle, U., 2010. An inventory-based approach for modeling single tree storm damage - experiences with the winter storm 1999 in southwestern Germany. *Can. J. For. Res.* 40, S. 1636–1652.
- 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, S. 48-62.