

Abschlussbericht IKSP Projekt L-12

„Klimarisiko- und Zielbestockungskarten Forst – Verbesserte Beratungsgrundlagen für neue Herausforderungen an hessische Waldbesitzer“

Bialozyt, R.; Böckmann, T.

31. Oktober 2023

Beteiligte:

NW-FVA: Ahrends, B.; Buresch, M.; Döbbeler, H.; Evers, J.; Hamkens, H.; Heitkamp, F.; Nagel, R.V., Paar, U.; Meesenburg, H.; Schick, J.; Schmidt, M.; Schmidt-Walter, P.; Sutmöller, J.; Talkner, U.; Zeppenfeld, T.

HessenForst: Eichmann, A.; Nowack, S.; Rosenberger, R.; Schwarz, F.; Ulrich, T.; Weidig, J.

Hessischer Waldbesitzerverband: Raupach, C.



Projektträger:

Hessisches Ministerium für Umwelt, Klimaschutz,
Landwirtschaft und Verbraucherschutz (HMUKLV)
Mainzer Str. 80, 65189 Wiesbaden



Auftragnehmer:

1. Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt
Grätzelstr. 2, 37079 Göttingen
2. Landesbetrieb HessenForst
Panoramaweg 1, 34131 Kassel
3. Hessischer Waldbesitzerverband e.V.
Taunusstraße 151, 61381 Friedrichsdorf



Projektleitung: Hermann Spellmann (bis 2021), Thomas Böckmann (ab 2021)

Projektlaufzeit: 01.04.2018 – 28.02.2023

Inhalt

| | |
|--|-----------|
| Zusammenfassung | 4 |
| 1. Einleitung | 5 |
| 1.1. Projektziele | 7 |
| 2. Organisation des Projektes | 8 |
| 2.1. Koordination | 8 |
| 2.2. Teilprojekt 1: NW-FVA | 8 |
| 2.3. Teilprojekt 2: HessenForst | 9 |
| 2.4. Teilprojekt 3: hess. Waldbesitzerverband | 10 |
| 2.5. Datenmanagement | 10 |
| 3. Ergebnisse | 12 |
| 3.1. Klimatische Grundlagen und Projektionen | 12 |
| 3.1.1. Methodik und Datengrundlage | 12 |
| 3.1.2. Ausgangslage | 13 |
| 3.1.3. Klimaszenarien | 15 |
| 3.1.4. Entwicklung von Temperatur und Niederschlag | 15 |
| 3.1.5. Klimatische Wasserbilanz | 16 |
| 3.1.6. ReKliEs-DE Kernensemble | 17 |
| 3.2. Standörtliche Grundlagen | 18 |
| 3.2.1. Trophie | 19 |
| 3.2.2. Geländewasserhaushalt | 24 |
| 3.2.3. Nutzbare Feldkapazität | 30 |
| 3.2.4. Entwicklung der Standortsgeometrien | 35 |
| 3.2.5. Trophieanpassung für HessenForst | 35 |
| 3.2.6. STOK Version 2020 | 36 |
| 3.2.7. STOK Version 2021 | 36 |
| 3.2.8. STOK Version 2023 | 38 |
| 3.3. Grundlagen für zukünftige Baumartenempfehlungen | 39 |
| 3.3.1. Standort-Leistungs-Modell | 39 |
| 3.3.2. Waldbrandrisiko | 42 |
| 3.3.3. Biotische Risiken | 46 |
| 3.3.4. Sturmschadensrisiko | 51 |
| 3.3.5. Überlebenszeitanalyse | 53 |
| 3.3.6. Ökonomische Bewertung | 59 |
| 3.4. Baumarten- & WEZ-Empfehlungen | 61 |
| 3.4.1. Klassifizierung nach Trockenstress | 62 |
| 3.4.2. Entwicklung neuer WEZ Kataloge | 64 |
| 3.5. Übertragung der Ergebnisse in die Praxis | 64 |
| 3.5.1. Entscheidungsunterstützungssystem „BaEm“ | 65 |
| 3.5.2. Mobile Version des DSS „BaEm“ | 65 |
| 3.5.3. Schulungen | 67 |
| 3.6. Abschlussarbeiten | 68 |
| 4. Schlussfolgerungen & Ausblick | 69 |
| 5. Literatur | 71 |
| A. Appendix | 77 |
| A.1. Baumartenzuordnung für hydromorphe Standorte | 77 |
| A.2. Baumartenzuordnung für terrestrische Standorte | 78 |

| | |
|--|----|
| A.3. WEZ Zuordnung für hydromorphe Standorte | 79 |
| A.4. WEZ Zuordnung für terrestrische Standorte | 80 |
| A.5. Erläuterungen zur Eichenhöhengrenze | 81 |
| A.6. Weißtanne auf wechselfeuchten Standorten | 82 |
| A.7. WEZ Katalog für den hessischen Kommunal- und Privatwald | 83 |

Abbildungsverzeichnis

| | |
|--|----|
| 1. Temperatur und Niederschlag 1990-2021 | 14 |
| 2. Temperatur und Niederschlag 2041 – 2070 | 16 |
| 3. Aktuelle und zukünftige klimatische Wasserbilanz | 17 |
| 4. Veränderungen von Temperatur und Niederschlag im ReKliEs-DE | 18 |
| 5. Ableitung der Trophiestufen mittels Fuzzy-Logic | 20 |
| 6. Trophiestufen differenziert nach Ausgangsmaterial | 22 |
| 7. Vergleich Geländewasserhaushalt zwischen Standort und Modell | 27 |
| 8. Vergleich geschätzter zu berechneter nFK | 33 |
| 9. Sankey Plot der Trophieänderungen 2020 | 37 |
| 10. Trophie Änderungen im Spessart | 38 |
| 11. <i>H_g</i> -Alters Kurven des Standort-Leistungs-Modells | 41 |
| 12. Komponenten des FWI Index | 42 |
| 13. Anzahl der Tage mit einem hohem Waldbrandrisiko | 44 |
| 14. Waldbrandrisiko für die Periode 1981 – 2010 | 45 |
| 15. Waldbrandrisiko für die Periode 2071 – 2100 | 46 |
| 16. Modelleffekte für das Auftreten von Borkenkäferholz | 48 |
| 17. Modelleffekte der Witterung für das Auftreten von Kalamitätsholz | 49 |
| 18. Projektion von Kalamitätsholz durch Borkenkäfer bei Fichte | 51 |
| 19. Sturmschadenswahrscheinlichkeiten am Hohen Meißner | 53 |
| 20. Einfluss der Temperatur vorangegangener Jahre auf die Mortalität der Buche | 55 |
| 21. Einfluss der Klimaparameter und Bezugsjahr auf die Mortalität der Buche | 56 |
| 22. Transekt durch Hessen als Grundlage für die Sensitivitätsanalyse | 57 |
| 23. Projizierte Mortalitätsraten im Zeitraum 1981 – 2050 für Buche | 58 |
| 24. Projizierte Mortalitätsraten im Zeitraum 2031 – 2100 für Buche | 59 |
| 25. Kalamitätsholzanteil in Abhängigkeit der Risikostärke (S100) | 60 |
| 26. Erwartungswerte der Reinerträge bei Kalamitätsholz | 61 |
| 27. Das IT-Konzept des DSS „BaEm“ | 66 |

Tabellenverzeichnis

| | |
|--|----|
| 1. Verteilung der Trophiestufen | 21 |
| 2. Fehlermaße der Modellvalidierung | 26 |
| 3. Konfusionsmatrix der Feldkartierung | 26 |
| 4. Statistische Kenngrößen zur Schätzung der nutzbaren Feldkapazität | 31 |
| 5. Kenngrößen der Modellevaluierung für die nFK | 32 |
| 6. FWI Klassen in der EU | 43 |
| 7. ReKliEs-DE Szenarien | 44 |
| 8. Eingangsdaten für die Betriebsklassensimulationen | 60 |
| 9. Berechnung der Betriebsklassen ohne Überlebensrisiken | 61 |
| 10. Klassifizierung des Trockenstressrisikos der Baumarten | 62 |
| 11. Funktionen des REST Services der NW-FVA | 67 |

Zusammenfassung

Vor dem Hintergrund des prognostizierten Klimawandels muss die Forstwirtschaft neue Wege gehen, um stabile und klimaresiliente Wälder zu etablieren. Dabei kann zunehmend weniger auf forstliches Erfahrungswissen zurückgegriffen werden. Vielmehr sind hierfür neue wissenschaftliche Erkenntnisse zu berücksichtigen, welche eine Vorhersage zukünftiger sich dynamisch ändernder Wachstumsbedingungen und Risikofaktoren ermöglichen. Diesem Problem hat sich das Projekt „*Klimarisiko- und Zielbestockungskarten Forst*“ gewidmet. Das Ziel war es ein Entscheidungsunterstützungssystem („Decision Support System“ – DSS) für die Baumartenwahl an allen Waldstandorten Hessens aufzubauen. Dabei gab es drei Themenblöcke zu bearbeiten.

Erstens lag zu Beginn des Projektes eine forstliche Standortkartierung (STOK) mit Daten zu Bodeneigenschaften wie Trophie und Wasserhaushalt nur für ca. 80% der Waldstandorte Hessens vor. Daher wurden, um die Lücken in der STOK zu schließen, Modelle zur Schätzung von Trophie, Wasserhaushalt und der nutzbaren Feldkapazität entwickelt. Mit Hilfe dieser Modelle können die benötigten Kennwerte unter Berücksichtigung vorhandener Daten aus der BFD50 (Bodenflächendaten 1:50.000), eines digitalen Geländemodells als auch einer großen Anzahl erfasster Bodenprofile berechnen werden. Das Ergebnis ist eine STOK für alle Waldstandorte Hessens.

Zweitens galt es die Komplexität des Klimawandels sowie die daraus resultierenden Standortveränderungen und Risiken adäquat in einem DSS zur Baumartenwahl benutzerfreundlich zu präsentieren. Dieses System soll den Waldbesitzenden Informationen für eine klimaangepasste Baumartenwahl und -mischung spezifisch für ihren Waldstandort zur Verfügung zu stellen. Auf der Grundlage der im Projekt modifizierten und erweiterten STOK wurden im ersten Schritt Baumartenempfehlungen erstellt. Mit diesen konnten anschließend die Empfehlungen für konkrete Waldentwicklungsziele (WEZ) abgeleitet werden. In der gegenwärtigen Version wurde für diese Empfehlungen der prognostizierte Trockenstress, in Form der Standortwasserbilanz (SWB), als auch die Trophie des Standortes als Entscheidungsparameter berücksichtigt. In der Kategorisierung der SWB sind zusätzlich waldbauliche Restriktionen als Faktor eingeflossen. In zukünftigen Versionen sollen Wachstumsprojektionen sowie verschiedene Risikoarten für eine umfassendere Erfassung von Klimafolgen in die Baumarten- und WEZ-Empfehlungen Verwendung finden.

Drittens sollte in dem zu entwickelnden DSS erstmals die sieben Projektionen des Kernensembles des ReKliEs-DE Projektes verwendet werden, um Unsicherheiten in der Vorhersagen adäquat abzubilden. Da diese in einer Auflösung von $12 \times 12 \text{ km}^2$ vorliegen, mussten diese zunächst auf den forstlichen Standort skaliert werden. In dieser Auflösung wurde die klimatische Wasserbilanz für jeden Standort je Klimaszenario berechnet. Mit dieser lässt sich der potentiellen Trockenstress je Baumart und Standort bis in das Jahr 2100 projizieren. Erst diese Projektionen ermöglichen es sinnvolle WEZ-Empfehlungen zu entwickeln. Da diese Methode im Projekt erst entwickelt werden musste, wurde für die aktuelle Version des DSS die Klimaprojektion des STARS II Modells verwendet.

Die Ergebnisse und Erkenntnisse, die während der Projektlaufzeit entstanden sind, wurden zeitnah mit den Experten und Praktikern von HessenForst und dem Hessischen Waldbesitzerverband diskutiert und abgestimmt. Somit sind die Erfahrungen der Praxis stets direkt in die Entwicklung des DSS eingeflossen. Dies hat die Akzeptanz bei den Anwendern des DSS deutlich erhöht. Mittlerweile wurde die von der NW-FVA bereitgestellte Webseite mehr als 225.000 mal aufgerufen (Stand: August 2023). Auch nach Projektende wird dieser Service kontinuierlich gepflegt und weiterentwickelt werden, nicht zuletzt da das System – mit länderspezifischen Modifikationen – auch für die anderen Trägerländer der NW-FVA eingesetzt werden soll.

1. Einleitung

Der Klimawandel verändert unsere Wälder auf vielfältige Weise. Dabei werden negative Auswirkungen auf die Wälder, ihre Ökosystemdienstleistungen und die Forstwirtschaft höchstwahrscheinlich überwiegen. Neben dem Anstieg der Temperatur und Änderung der Niederschlagsverteilung ist es vor allem die Zunahme von Extremereignissen mit ihren Interaktionen, die zu massiven Störungen der Wälder führen werden. Auch in Hessen sind großflächige Waldschäden infolge der trockenen und heißen Jahre 2018 – 2022 entstanden. Die enge zeitliche Abfolge dieser Kalamitäten gibt Hinweise, mit welcher Geschwindigkeit diese Veränderungen auch in Deutschland weiter voranschreiten könnten. Es wird erwartet, dass die überraschend hohe Geschwindigkeit des Klimawandels vielerorts die Anpassungsfähigkeit unserer heimischen Baumarten überfordern wird. Daneben treten eine Vielzahl von weiteren Einflussfaktoren auf, die die Wälder zusätzlich belasten und deren Waldentwicklung nachhaltig verändern. In diesem Zusammenhang sind Waldbrände sowie Schäden durch eine Vielzahl von Pilzen und Insekten zu nennen. Auch diese haben in den letzten Jahren aufgrund der Witterungsextreme sowie der Globalisierung der Warenströme massiv zugenommen.

Sämtliche Klimaprojektionen lassen für Hessen eine deutliche Änderung hinsichtlich Temperatur, Niederschlagsverteilung und Witterungsextremen erwarten. Dabei ist das projizierte Ausmaß des Klimawandels regional sehr unterschiedlich und steigt allgemein mit zunehmender Kontinentalität. Forstbetriebe und Gesellschaft sind in Anbetracht der prognostizierten Klimaentwicklungen daher gut beraten, Risikovorsorge zu betreiben. Eine Anpassung der Wälder an den Klimawandel zur Reduktion der Vulnerabilität und der Risiken scheint alternativlos. Die primären Ziele der Anpassung liegen vornehmlich in der Aufrechterhaltung oder Erhöhung der Resistenz, Resilienz und Anpassungsfähigkeit der Waldökosysteme. Als eine grundsätzlich waldbauliche Handlungsoption für die zukünftige Bewirtschaftung von Wäldern in Deutschland wird mit erster Priorität eine Stabilisierung der vorhandenen Wälder empfohlen (WBW, 2021). Diese beinhaltet die Sicherung einer breiten genetischen Vielfalt der einheimischen Baumarten, die Erhöhung der Einzelbaumstabilität, die Sicherung der Vitalität und eine Verbesserung der Bestandesstrukturen einschließlich der Verringerung der Wasser Konkurrenz auf jetzt schon trockenen Standorten. Langfristig trägt ein standortgemäßer Waldumbau zu einer Anpassung an die Risiken des zu erwartenden Klimawandels bei. Die Erhöhung des Anteils von Mischbaumarten und die Einbringung von anbauwürdigen, eingeführten und sogenannten Alternativbaumarten sind dabei eingeschlossen. Diesen zukünftigen Herausforderungen muss sich die Waldbewirtschaftung stellen.

Neben den Veränderungen der Wuchsbedingungen kommt es auch zu einer Veränderung biotischer und abiotischer Risikopotentiale. Dies zeigt nicht nur in einer Erhöhung der Häufigkeit der Ereignisse sondern auch in der Stärke bzw. des Ausmaßes der Schäden. Diese können dabei so extrem werden, dass die Waldfunktion als solche gefährdet ist (Wagner, 2008). In den aktuellen Waldbaurichtlinien der Länder werden diese Bedingungen bereits global berücksichtigt, indem verstärkt auf den Anbau standortgerechter Baumarten gesetzt wird. Da sich jedoch der Standort durch den Klimawandel ändern wird, muss die Bewertung der Standortsgerechtigkeit für die Baumarten über die bisherigen Erfahrungen hinaus erweitert werden. Hier können modellbasierte Ansätze zur Leistungs- und Risikoabschätzung ein hilfreiches Werkzeug darstellen. Solche Modelle wurden in einem Vorgängerprojekt („DSS-RiskMan“) für spezifische Modellregionen entwickelt und getestet (u.a. Schmidt, 2020). Somit lagen zu Beginn des Projektes gute Voraussetzungen vor, diese Modelle für Praxisempfehlungen einzusetzen.

Eine wichtige Voraussetzung für den praxisrelevanten Einsatz der Leistungs- und Risiko-Modelle sind flächendeckende Standortsinformationen. Diese lagen zu Beginn des Projektes nur für den Staatswald und einen Teil des Kommunal- und Privatwaldes vor. Für viele Wälder in privater oder kommunaler Hand fehlten belastbare Daten für eine standortgerechte Wald-

bauplanung. Für diese wurden während der Projektlaufzeit neue Modelle zur Regionalisierung und Vorhersage spezifischer Standortparameter entwickelt. Außerdem galt es die vorhandene Standortkartierung von HessenForst, welche gerade im mittleren Bereich („mesotroph“) vergleichsweise undifferenziert war, zu verfeinern.

Eine weitere Voraussetzung für die Bewertung und Auswahl klimastabiler Waldentwicklungsziele (WEZ) sind Projektionen des Klimawandels. Auf europäischer Ebene gibt es hierzu eine Vielzahl an Projektionen, die sich in der Verwendung des Global- und Regionalmodelles unterscheiden und daher auch unterschiedliche Prognosen für das gleiche RCP Szenario („Representative Concentration Pathways“) abgeben. Diese wurden in dem ReKliEs-DE Projekt systematische zusammengefasst, bewertet und ein Kernensemble von sieben Klimäläufen ausgesucht, welches die Bandbreite an Global- und Regionalmodellen bzgl. der Klimaparameter abbildet (Hübener *et al.*, 2017). Das verwendete Kernensemble bezieht sich dabei auf das globale Emissionsszenario RCP8.5, welche von einer globalen Erwärmung von 4 K ausgeht und gegenwärtig als das „weiter-wie-bisher“ Szenario beschrieben wird. Die Verwendung dieses Szenarios führt dazu, dass eine standortgerechte Baumartenwahl unter diesen Bedingungen auch unter weniger extremen Bedingungen zu stabilen Waldbeständen führen würde. Allerdings kann nicht ausgeschlossen werden, dass in einem solchen Szenario Zuwachsverluste durch die Empfehlung von robusten aber weniger zuwachskräftigen Baumarten auftreten.

Die räumliche Auflösung der ReKliEs-DE Szenarien beträgt 12×12 km². Standortliche Einheiten sind jedoch wesentlich kleiner. Da sich die prognostizierten klimatischen Kenngrößen nicht nur in bergigen Regionen wesentlich kleinräumiger ändern können, ist es notwendig die Ergebnisse der ReKliEs-DE Szenarien entsprechend zu skalieren. Durch die Verwendung der sieben Klimaprojektionen des ReKliEs-DE Kernensembles erhält man folglich auch sieben unterschiedliche Baumartenempfehlungen je Standort. Diese resultieren wiederum in unterschiedliche abiotische und biotische Risiken. Die zu erwartende hohe Spannbreite lässt sich daher nicht mehr in einer Tabelle adäquat darstellen. Daher müssen neue Techniken zur Aufbereitung und Präsentation multipler Ergebnisse entwickelt werden.

Für die Skalierung der ReKliEs-DE Szenarien muss jedoch zunächst eine neue Methode entwickelt werden. Da dies entsprechend zeitintensiv sein kann, soll für die ersten Phase des Projektes auf die bereits vorliegenden Projektion STARS II (Orlowsky *et al.*, 2008) zurückgegriffen werden. Diese Projektion wurde mit dem Globalmodell ECHAM 6 und dem Regionalmodell STARS II auf der Grundlage des Emissionsszenario RCP8.5 entwickelt. Mit einem kombinierten Verfahren aus „Inverse Distance Weighting“ und Höhenregression im Modellsystem WaSiM-ETH (Schulla & Jasper, 2007) lässt sich diese entsprechend auf den forstlichen Standort skalieren. Damit erhält man für die einzelnen Standorte realistischere Schätzungen der notwendigen Klimaparameter. Da die Kennwerte des STARS II Modells in Mittel für den Zeitraum 2041 – 2070 in etwa denen der ReKliEs-DE Szenarien für den Zeitraum 2071 – 2100 entsprechen, ist diese Projektion geeignet, erste Empfehlungen für die Baumarteneignung und WEZ Auswahl abzuleiten und das Gesamtsystem zu testen.

Die aus den verschiedenen Projektionen sowie den damit entwickelten Wachstums- und Risikoprognosen abzuleitenden Handlungsempfehlungen für die Waldbesitzenden bilden eine komplexe wissenschaftliche Arbeitsweise ab, die in ihrer Auswirkung auf die Baumarten- und WEZ-Empfehlungen so nicht immer einfach nachvollziehbar ist. Für die Darstellung und Vermittlung solcher Sachverhalte und um diese für die Praxis greifbar zu machen, haben sich Entscheidungsunterstützungssysteme (DSS, „Decision Support Systems“) in vielen Projekten als hilfreich erwiesen. Da es sich in diesem Projekt hauptsächlich um flächenbezogenen Daten und Empfehlungen handelt, sollte diese System die Empfehlungen in Form von Risikokarten für die einzelnen Aspekte darstellen. Da jedoch die Verschneidung diese Karten durch den Anwender ein erhebliches fachliches Niveau voraussetzt, erscheint eine Karte zum standortsgenauen Abrufen der einzelnen Aspekte sowie der daraus abgeleiteten Empfehlungen eher geeignet zu sein die Handlungsempfehlungen dem Praktiker nahe zu bringen.

Ein solches System lebt jedoch von der Aktualität der Eingangsdaten. Daher ist es notwendig, kontinuierlich an diesen Daten zu arbeiten. Bei Änderungen müssen die davon betroffenen Modelle angepasst und die neuen Ergebnisse in das zu entwickelnde DSS eingepflegt werden. Diesem Aspekt der kontinuierlichen Anpassung muss von Anfang an in der Planung und Realisierung des DSS Rechnung getragen werden.

1.1. Projektziele

Das Hauptziel des Projektes war es ein Entscheidungsunterstützungssystem (DSS, „Decision Support Systems“) zur Planung und Etablierung stabiler, klimaresilienter Wälder unter den zukünftigen Bedingungen des prognostizierten Klimawandels für die Waldbesitzenden in ganz Hessen zu schaffen. Dafür waren folgende Teilziele zu erfüllen:

1. Skalierung der 12×12 km² Kacheln der Klimaprojektionen des ReKliEs-DE Kernensembles auf die forstlichen Standorte Hessens.
2. Verfeinerung der Trophieeinschätzung der hessischen Standortskartierung.
3. Flächendeckende Modellierung der Trophie, des Wasserhaushaltes und der nutzbaren Feldkapazität (nFK) für alle Waldstandorte Hessens.
4. Modellierung des Wachstums und der Risikoarten auf der Grundlage der ReKliEs-DE Szenarien und der verbesserten Standortsinformationen.
5. Ableitung standortssensitiver, klimaangepasster Waldentwicklungsziele (WEZ).

Die o.g. Eingangsdaten müssen auf regelmäßiger Basis aktualisiert und in das DSS integriert werden, um neueste wissenschaftliche Erkenntnisse so schnell wie möglich für die Praxis zur Verfügung stellen zu können.

2. Organisation des Projektes

Das Projekt wurde in enger Zusammenarbeit von den drei Projektpartnern Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (NW-FVA), HessenForst und dem Hessischen Waldbesitzerverband erarbeitet. Jedem Projektpartner waren entsprechende Mittel und Stellen im Rahmen der Forschungsförderung durch das HMULKV zugeteilt. Das Projekt gliederte sich in drei große Teilprojekte die bei den entsprechenden Projektpartner angelegt waren. Diese Teilprojekte untergliederten sich in weitere Arbeitspakete, sodass damit insgesamt 15 Arbeitspaketen über alle Projektpartner hinweg bearbeitet wurden. Die meisten dieser Arbeitspakete wurden an der NW-FVA bearbeitet und dienten der Bereitstellung der Grundlagen für geeignete Baumartenempfehlungen. Eine wichtige Voraussetzung dafür waren die umfangreichen Daten von und Diskussionen mit den anderen Projektpartnern. Der zweite große Anteil der insgesamt 15 Arbeitspakete beschäftigte sich mit dem Wissenstransfer in die Praxis. Hier waren neben der NW-FVA vor allem die anderen beiden Projektpartner federführend involviert.

2.1. Koordination

Ein Projekt dieser Größe und Komplexität erforderte eine Koordination des Datenaustausches und der Zusammenarbeit zwischen den Arbeitspaketen. Insbesondere, da die jeweiligen Teilaufgaben entweder in unterschiedlichen Abteilungen der NW-FVA als auch bei HessenForst bzw. beim Hessischen Waldbesitzerverband bearbeitet wurden. Hierfür wurde eine eigene Projektstelle eingerichtet. Die lange Laufzeit dieser Stelle ermöglichte es, dass auch nach Abschluss einzelner Arbeitspakete die Daten und Informationen für alle nachfolgenden Projekte direkt zur Verfügung gestellt werden konnten.

Für eine reibungslose Zusammenarbeit wurden auf regelmäßiger Basis insgesamt acht Projekttreffen mit allen im Projekt involvierten Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern aller Projektpartnern organisiert. An diesen Treffen nahm außerdem das HMUKLV in verschiedener Besetzung teil. Hier wurden erreichte Ergebnisse und Meilensteine präsentiert, die nächsten Arbeitsschritte festgelegt und auf der Basis neuer Erkenntnisse die Ausrichtung des Projektes präzisiert und gegebenenfalls angepasst.

Darüber hinaus gab es zahlreiche themenbezogene Treffen (insgesamt 35), an welchen die jeweils beteiligten Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter sowie die Koordination teilgenommen haben. Alle Treffen wurden entsprechend protokolliert. Diese Protokolle und die Ergebnisse der Arbeitspakete befinden sich in einem Projektordner an der NW-FVA. Dieser wird regelmäßig gesichert und wird auch in die permanente Datensicherung nach Abschluss des Projektes einbezogen, sodass eine 10-jährige Sicherung der Ergebnisse entsprechend den Anforderungen an die Standards der guten wissenschaftlichen Praxis gewährleistet ist.

Für die Zusammenarbeit und den Austausch zwischen den Arbeitspaketen wurde auf dem o.g. gemeinsamen Projektordner an der NW-FVA eine Struktur für jedes Arbeitspaket geschaffen, in welchen auch Zwischenergebnisse und der Arbeitsstand abgespeichert wurden. Dieser Teil diene ausschließlich der Zusammenarbeit im laufenden Projekt und wird nicht Teil der abschließenden Datensicherung werden.

2.2. Teilprojekt 1: NW-FVA

An der NW-FVA wurden insgesamt sieben Arbeitspakete bearbeitet. Diese beschäftigten sich mit der Koordination, der Aufarbeitung der Klimadaten, der Verfeinerung und Erweiterung der bestehenden Standortskartierung (STOK) sowie zahlreicher Wirkmodelle die auf die Baumartenwahl einen Einfluss haben könnten. Letztere Modelle sollen sukzessive in den zu

entwickelnden Baumartenempfehlungen berücksichtigt werden. Dies wird in dem noch zu testenden multikriteriellen Ansatz erfolgen.

Inhaltlich waren an der NW-FVA mehrere Abteilungen und Sachgebiete in dieses Projekt involviert. Neben den speziell für die Arbeitspakete eingestellten Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter haben auch zahlreiche Wissenschaftler aus dem Stammpersonal an der Entwicklung der Methoden und Modelle mitgewirkt. Für den Erfolg des Projektes war es notwendig, dass nicht nur in den Sachgebieten und Abteilungen sondern vor allem auch abteilungsübergreifend intensiv zusammen gearbeitet wurde. Dies ermöglichte, dass ein solch substantielles Ergebnis innerhalb der Projektlaufzeit möglich war.

Ein letztes und noch laufendes Arbeitspaket der NW-FVA beschäftigt sich mit dem Wissenstransfer und wird in enger Zusammenarbeit mit HessenForst und dem Hessischen Waldbesitzerverband realisiert. Außerdem wurden in diesem Arbeitspaket mehrere Lehr- und Erklärvideos erstellt, die auf der Webseite der NW-FVA für alle Nutzerinnen und Nutzer sowie anderweitig Interessierte abrufbar sind.

2.3. Teilprojekt 2: HessenForst

Im Teilprojekt 2, welches bei HessenForst angelegt war, gab es insgesamt fünf Arbeitspakete. Diese bearbeiteten folgende Themenschwerpunkte: Bereitstellung der Daten zur hessischen Standortkartierung (STOK) sowie der Forsteinrichtung (FE), ökonomischen Bewertung der WEZ und dem Wissenstransfer. Diese Arbeitspakete waren entweder notwendige Voraussetzungen für die Entwicklung des DSS oder bauen auf den Ergebnissen des DSS auf, insbesondere der Wissenstransfer. Dies bedingte und bedingt immer noch eine enge Zusammenarbeit mit der NW-FVA und dem Hessischen Waldbesitzerverband.

Als Grundlage für die Entwicklung des DSS lag bei HessenForst bereits eine STOK für die eigenen und betreuten Flächen vor. Diese zeigte eine sehr heterogene Qualität in Bezug auf die mittlere Trophiestufe („mesotroph“), die sehr stark überrepräsentiert war. Außerdem hatten die Standortspolygone sehr unterschiedliche Größen, welche für differenzierte Baumarten- und WEZ-Empfehlungen tw. zu grob waren. Es galt daher in Absprache mit der NW-FVA diese Karte systematisch zu überarbeiten. Hierfür wurden durch die Koordination an der NW-FVA gemeinsame Treffen an der NW-FVA und im Gelände organisiert, um Anpassungen auf eine breite Expertengrundlage zu stellen.

Ein weiteres wichtiges gemeinsames Projekt war die Erstellung eines neuen Kataloges der Waldentwicklungsziele (WEZ). Ein WEZ Katalog existierte bereits, musste jedoch an die neuen Bedingungen im Rahmen des Klimawandels angepasst werden. Es galt daher auch neue WEZ zu definieren, welche den Umbau in klimaresiliente Waldbestände ermöglichen sollen. Da der Wald von HessenForst FSC zertifiziert ist, bestand weiterhin die Aufgabe, die Anforderungen der FSC-Zertifizierung zu berücksichtigen.

Der Austausch der Sach- und Flächendaten war und ist immer noch notwendig, um neue Entwicklungen und Ideen der jeweils anderen Seite unkompliziert zur Prüfung zukommen zu lassen. Dadurch konnten und können wissenschaftliche Erkenntnisse schneller in die Praxis überführt werden. Auch wurden wissenschaftliche Neuerungen auf diesem Wege parallel und zeitnah auf ihre Praxistauglichkeit getestet. Gerade dieser Schritt ist eine Grundvoraussetzung für die hohe Akzeptanz in der forstlichen Praxis.

Da die Datengrundlage und die Interpretation der Ergebnisse bereits in enger Zusammenarbeit mit der NW-FVA und dem Hessischen Waldbesitzerverband erstellt wurden, lag es nahe Schulungen der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter gemeinsam durchzuführen. Hierfür wurden jeweils eine Stelle bei HessenForst und eine an der NW-FVA eingerichtet. Gemeinsam wurden optimale Schulungsorte und Inhalte ausgewählt. Letztere wurde zu Teilen aus dem

Teilprojekt 3 des Hessischen Waldbesitzerverbandes finanziert. In den Schulungen konnten daher sowohl der technisch theoretische Hintergrund als auch die praktische Umsetzung vor Ort vermittelt werden. Das Format hat sich insoweit bewährt, da je nach Interessenlage vor Ort alle anfallenden Fragen mit entsprechender Fachkenntnis beantwortet werden konnten. Diese Maßnahme dauert immer noch an und soll auch in Zukunft, soweit geeignetes Personal zur Verfügung steht, fortgeführt werden.

Gegenwärtig läuft noch das Arbeitspaket zur ökonomischen Bewertung der WEZ an der Georg-August Universität Göttingen. Dieses Arbeitspaket setzt auf die im Projekt entwickelten WEZ auf und zeigt mögliche Strategien zur Anpassung an den Klimawandel aus ökonomischer Hinsicht auf.

2.4. Teilprojekt 3: Hessischer Waldbesitzerverband

Der Hessische Waldbesitzerverband war mit drei Arbeitspaketen im Projekt beteiligt. Diese beinhalteten die Bereitstellung der Basisdaten, die Mitwirkung bei der Bewertung von Handlungsoptionen als auch beim Wissenstransfer. Vertreter des Hessischen Waldbesitzerverbandes haben an allen Projekttreffen und auch an vielen themenspezifischen Sitzungen teilgenommen und aktive an der Entwicklung der Projektergebnisse mitgearbeitet. Für den Wissenstransfer wurde das Projekt auch auf mehreren Sitzungen des Hessischen Waldbesitzerverbandes vorgestellt und diskutiert.

Von Seiten der hessischen Waldbesitzer wurden soweit vorhanden Daten zur Standortkartierung und zur Forsteinrichtung an die NW-FVA zur Verfügung gestellt. Wenn diese in elektronischer Form vorlagen, wurden die Daten bei der Entwicklung der Karten und Modelle verwendet. Diese Daten liegen nur an der NW-FVA vor und dürfen nicht an Dritte weitergegeben werden. Deshalb werden diese bei der Übertragung an HessenForst aus den Datenbanken bzw. Karten entfernt.

Da die Anforderungen der Waldbauplanung im Kommunal- und Privatwald andere sind als die im FSC-zertifiziertem Staatswald, musste hierfür ein eigener WEZ-Katalog entwickelt werden. Auf mehreren Sitzungen mit Teilnehmern der NW-FVA und des Hessischen Waldbesitzerverbandes wurden von der NW-FVA erarbeitete Vorschläge für einen WEZ-Katalog diskutiert, gegebenenfalls angepasst und abschließend festgelegt.

Für die Interpretation der Ergebnisse des Projektes und insbesondere des Web-Dienstes der NW-FVA wurden den Waldbesitzenden Schulungen bei den jeweiligen Kreisgruppen angeboten und durchgeführt. Auf Grund der Corona Pandemie wurde diese jedoch recht unterschiedlich angenommen. Somit wurde sich im Bereich Wissenstransfer auf die Erstellung von Lehr- und Erklärvideos konzentriert. Diese sind auf der Webseite der NW-FVA für alle Waldbesitzende und Interessierte abrufbar. Das Angebot Schulungen durchzuführen besteht aber weiterhin, sodass wir in nächster Zeit mit weiteren Schulungen rechnen.

2.5. Datenmanagement

Für die Datenhaltung und den Datenaustausch wurde eine projekteigene Datenbank erstellt. Diese basiert auf „PostgreSQL“ mit einer „PostGIS“ Erweiterung. Die PostGIS Erweiterung ermöglicht es, neben den Sach- auch Geodaten zu speichern und zu verarbeiten. Bei letzteren wurden nur die Vektordaten in der Datenbank gespeichert (z.B. Standortkartierung, Forsteinrichtung). Rasterdaten werden hingegen noch nicht im gleichen Umfang von PostGIS unterstützt, daher wurden diese als GeoTIFF-Datei in einer eigenen Ordnerstruktur abgelegt. Dies betrifft vor allem die Klimadaten, die Daten des Standort-Leistungsmodells als auch die Daten zum Sturm- und Borkenkäferisiko.

Externe Datensätze (z.B. die STOK von HessenForst bzw. der hessischen Waldbesitzenden) wurden, soweit sie elektronisch vorlagen, ebenfalls in der Datenbank gespeichert. Alle anderen Datensätze wurden im Projektordner abgelegt, sodass der Zugriff während der Projektlaufzeit für alle Zugriffsberechtigten einheitlich erfolgen konnte. Der Zugriff darauf wurde jedoch nicht automatisch für alle Projektteilnehmer freigeschaltet, sondern nur je nach Bedarf freigegeben.

Alle projektbezogenen Daten und Ergebnisse werden zum Abschluss des Projektes nach den Regeln der guten wissenschaftlichen Praxis gesondert gesichert, sodass eine langfristige Verfügbarkeit über 10 Jahre gewährleistet ist.

3. Ergebnisse

Das vom HMUKLV projektfinanzierte Vorhaben ermöglichte die Erstellung neuer Entscheidungsgrundlagen, welche in dieser Form und in diesem Zeitrahmen sonst nicht hätten realisiert werden können. Durch die Zusammenarbeit zwischen der NW-FVA, HessenForst und dem Hessischen Waldbesitzerverband konnten flächendeckende Informationen zu den forstlichen Standorten erarbeitet werden. Außerdem wurde durch den intensiven Diskussionsprozess die Qualität und die Akzeptanz der entwickelten Empfehlungen bei den Waldbesitzenden aller Besitzarten gestärkt.

Im Folgenden werden kurz die Ergebnisse der einzelnen Arbeitspakete und anschließend des Gesamtprojektes beschrieben. Detailliertere Angaben können den zitierten Publikationen, soweit diese bereits veröffentlicht sind, entnommen werden. Damit zeigt sich sogleich, dass in diesem Projekt neben den anwendungsbezogenen Hauptzielen auch auf wissenschaftlicher Ebene erhebliche Fortschritte erarbeitet wurden. Die Qualität der Praxisempfehlungen hängt dabei stets unmittelbar von der wissenschaftlichen Basis ab.

3.1. Klimatische Grundlagen und Projektionen

Seit Mitte des letzten Jahrhunderts wird auf der Erde ein signifikanter Anstieg der Lufttemperatur bodennaher Schichten beobachtet. Im Vergleich zur vorindustriellen Zeit hat sich die globale Erdoberflächentemperatur bereits um rund 1,2 K erhöht. Dies zeigen die Ergebnisse des aktuellen sechsten Sachstandsberichtes des IPCC („Intergovernmental Panel on Climate Change“; Masson-Delmotte *et al.*, 2021). Die Erwärmung der Landflächen ist im Vergleich zu den Meeren deutlich stärker ausgeprägt. So hat sich z.B. die Jahresmitteltemperatur in Deutschland seit Beginn der Industrialisierung um fast 2 K erhöht. Bis zum Ende des 21. Jahrhunderts kann je nach Klimaszenario die globale Oberflächentemperatur um bis zu weiteren 4 K ansteigen.

3.1.1. Methodik und Datengrundlage

Zur Abschätzung zukünftiger klimatischer Veränderungen werden Klimaszenarien verwendet. Diese beruhen auf unterschiedlichen sozioökonomischen Annahmen, die das Ergebnis der Arbeiten des IPCC sind. Der aktuelle Forschungsstand zu den wissenschaftlichen Grundlagen des Klimawandels wird in regelmäßigen Abständen in sogenannten Sachstandsberichten des IPCC veröffentlicht. Die Unsicherheit bezüglich der zukünftigen Entwicklung wird durch verschiedene Emissionsszenarien abgebildet. Diese stellen mögliche Entwicklungspfade des anthropogenen Ausstoßes von Treibhausgasen wie Kohlendioxid, Lachgas oder Methan dar. Die Emissionsszenarien dienen als Antrieb für globale Klimamodelle.

Globale Klimamodelle („General Circulation Models“; GCM) berechnen die künftige Entwicklung des Klimas anhand komplexer physikalisch basierter Funktionen. Dabei wird das Klimasystem der Erde vereinfacht auf einem dreidimensionalen Gitter abgebildet. Die räumliche Auflösung der GCM's beträgt in der Regel mehr als 100 km, d.h. ein Gitterpunkt repräsentiert eine Fläche des hinterlegten Rasters. Infolge des hohen Rechenaufwands für die Modellierung ist die räumliche Auflösung der Klimamodelle limitiert. Damit die Ergebnisse der globalen Modelle auch für kleinere Gebiete genutzt werden können, werden die Modellergebnisse der GCM's mittels regionaler Klimamodelle auf eine höhere räumliche Auflösung heruntergerechnet. Hierbei werden zwei verschiedenen Verfahren des Downscalings unterschieden.

Dynamische Regionalmodelle sind in globale Klimamodelle eingebettet und berechnen das Klimasystem nur für einen Ausschnitt der Erde jedoch mit einer deutlich höheren räumlichen

Auflösung (~ 10 km). Die physikalisch basierte Berechnung der klimatischen Entwicklung ist methodisch mit denen der Globalmodelle vergleichbar.

Statistische Regionalmodelle beschreiben das Klimasystem anhand von Beobachtungen, indem z.B. der Zusammenhang zwischen großräumigen Zirkulationsmustern der Atmosphäre und der regionalen Ausprägung des Wettergeschehens in Beziehung gesetzt werden. Die Veränderungen in der Häufigkeit großräumiger Zirkulationsmuster, die die globalen Klimamodelle berechnen, können durch statistische Verfahren auf die regionale Skala übertragen werden.

Für die forstliche Planung ist jedoch die räumliche Auflösung der Regionalmodelle immer noch zu grob. Deshalb werden die Ergebnisse der Klimamodelle mit einem etablierten statistischen Verfahren (*Quantil Mapping*) für ausgewählte Klimastationen des Deutschen Wetterdienstes berechnet (Feigenwinter *et al.*, 2018; Suttmöller *et al.*, 2021). Vergleichbar mit den Messwerten an den Klimastationen wird für die relevanten Klimavariablen (Temperatur, Niederschlag, etc.) eines Klimalaufes eine Zeitreihe erzeugt, die als Tageswerte den gesamten Projektionszeitraum abdeckt. Klimamodelle können systematische Abweichungen oder Fehler aufweisen. So berechnen einige Modelle den Niederschlagsschwerpunkt im Vorland von Mittelgebirgen und nicht entsprechend den Beobachtungen in den höchsten Lagen. Mit Hilfe der verwendeten *Downscaling*-Verfahren werden systematische Fehler in den Klimadaten korrigiert (Bias-Korrektur).

Um Aussagen für bestimmte Standorte bzw. für die Planungseinheiten der Forstwirtschaft treffen zu können, ist es notwendig, die Stationsdaten in die Fläche zu interpolieren. Für die Klimavariablen Temperatur und Niederschlag zeigte das kombinierte Verfahren aus *Inverse Distance Weighting* (IDW) und Höhenregression (Schulla & Jasper, 2007) eine hohe Anpassungsgüte, die anhand von unabhängigen Messdaten von Intensivmessflächen in Nordwestdeutschland ermittelt wurde. Ein Vergleich mit regionalisierten Klimadaten des DWD mit einer räumlichen Auflösung von einem Kilometer zeigte ebenfalls plausible Ergebnisse. Mit den erprobten Regionalisierungsverfahren ist es möglich, die räumliche Verteilung ausgewählter Klimavariablen und abgeleiteter Indikatoren in hoher räumlicher Auflösung zu schätzen.

3.1.2. Ausgangslage

Die Jahresmitteltemperatur der Klimareferenzperiode 1991 – 2020 beträgt in Hessen $9,3^{\circ}\text{C}$. Im Vergleich zur vorindustriellen Zeit liegt die Temperaturerhöhung bereits bei über 1,5 K. Dabei gibt es in der Temperaturzunahme zwischen der Nicht-Vegetationszeit von Oktober bis April und der Vegetationszeit von Mai bis September nur geringe Unterschiede. Für das Flächenmittel von Hessen werden 760 mm Jahresniederschlagssumme berechnet.

Das Klima in Hessen zeichnet sich durch eine natürliche Variabilität aus. Insbesondere die Jahresniederschläge weisen eine hohe Bandbreite auf. Die bisher höchsten Niederschläge seit 1961 wurden im Jahr 1981 mit knapp 1070 mm Jahressumme im Flächenmittel gemessen. Das trockenste Jahr war 1976 mit einer Jahresniederschlagssumme von 515 mm. Besonders in den letzten Jahren konnte in Hessen eine Zunahme der Frühjahrstrockenheit beobachtet werden. Bei der Jahresmitteltemperatur ist der langfristige Erwärmungstrend eindeutig. Seit Mitte der 1980er Jahre wurden in Hessen mit Ausnahme der Jahre 1996 und 2010 im Vergleich zur Klimareferenzperiode 1961 bis 1990 nur noch zu warme Jahre beobachtet. In den vergangenen 10 Jahren hat sich das gleitende Mittel der letzten 30 Jahre um knapp 0,4 K erhöht. Dies würde bedeuten, dass bei gleich bleibendem Trend die Jahresmitteltemperatur alle 25 Jahre um 1 K ansteigt. Das bisher wärmste Jahr seit Messbeginn im Jahr 1881 war 2022 mit einer Jahresmitteltemperatur von $10,6^{\circ}\text{C}$. Auch die Jahre 2018 und 2020 waren nur unwesentlich kühler.

In der Rhein-Main-Ebene treten bereits heute Jahresmitteltemperaturen von regional mehr als 11°C auf (Abb. 1) auf. Damit gehören die Gebiete zu den wärmsten Regionen in Deutschland.

Auch die übrigen Tieflandbereiche, wie die Wetterau und die Flussniederungen in Mittel- und Nordhessen sind im langjährigen Mittel nur wenig kühler ($> 9.5^{\circ}\text{C}$). Die Temperatur nimmt in den Mittelgebirgsregionen mit zunehmender Höhenlage kontinuierlich ab. In den Hochlagen von Rhön, Vogelsberg und Taunus liegt die Jahresmitteltemperatur unter 7°C . Neben den hohen Temperaturen sind die Tieflagen in Hessen durch geringe Jahresniederschlagssummen gekennzeichnet. In der Rhein-Main-Ebene werden im langjährigen Mittel nur 600 bis 650 mm Niederschlag beobachtet. In den Mittelgebirgen nehmen die Niederschläge mit der Höhe zu und erreichen teilweise mehr als 1000 mm.

Die Tieflagen im südlichen Hessen zählen zu den trockensten Regionen in Deutschland. Infolge der bereits beobachteten Klimaerwärmung haben sich die klimatischen Gegebenheiten in diesen Gebieten weiter verschlechtert, indem die Wasserversorgung nicht nur für die Wälder stark beeinträchtigt ist. Die steigenden Temperaturen bedingen einen zunehmenden Verdunstungsanspruch der Vegetation, der infolge der geringen Niederschläge und unzureichend aufgefüllter Bodenwasserspeicher nicht erfüllt werden kann.

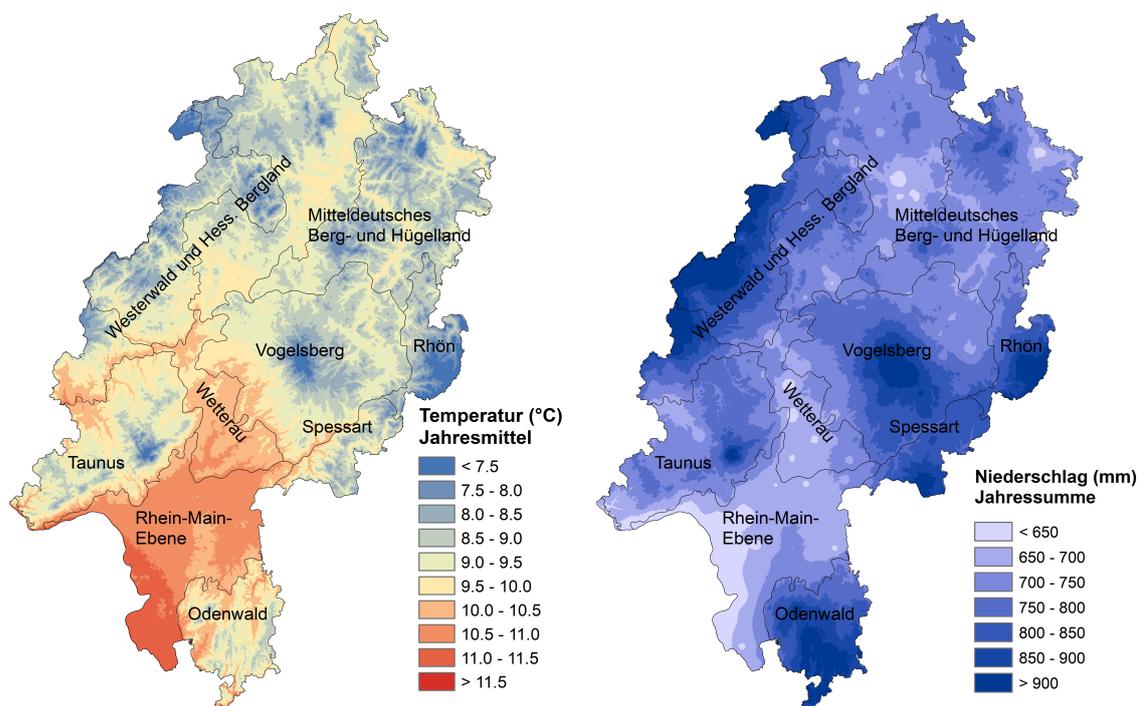


Abb. 1: Jahresmitteltemperatur und mittlere Jahresniederschlagssumme in der Klimareferenzperiode (1991 – 2020); Datenquelle: DWD.

Seit 2018 herrscht in Hessen eine ausgeprägte Trockenheit. Diese nun mehrjährige extreme Trockenperiode begann mit der Vegetationszeit 2018, in der nicht einmal 50% der üblichen Niederschlagssumme fiel. In Kombination mit den sehr hohen Temperaturen trockneten die Böden tiefgründig aus. Auch in den Jahren 2019 und 2020 führte die Kombination von überdurchschnittlich hohen Temperaturen mit Abweichungen von rund 2 K im Vergleich zur Klimareferenzperiode und unterdurchschnittlichen Niederschlägen dazu, dass die Trockenheit sich fortsetzte. Obwohl im Jahr 2021 das Niederschlagsmittel fast erreicht wurde und die Temperaturabweichung mit <1 K nicht so hoch ausfiel wie in den Vorjahren, konnte die Trockenheit kaum abgemildert werden, da die Niederschläge häufig als Starkniederschlag fielen und damit den Bodenwasserspeicher nicht nachhaltig auffüllten. Im Jahr 2022 verschärfte sich die Trockenheit infolge der hohen Temperaturen und geringen Niederschläge wieder.

Die extreme Trockenheit der letzten Jahre stellt in ihrer Intensität und Dauer ein außergewöhnliches Ereignis für Hessen dar, das seit Messbeginn im Jahr 1881 noch nicht beobachtet wurde. Aktuelle Klimaprojektionen für Deutschland berechnen bis zum Ende des Jahrhunderts

eine deutliche Zunahme von Trockenperioden. Somit könnte die aktuelle Dürre in Hessen nur ein Vorgeschmack auf zukünftig noch extremere Trockenereignisse sein.

3.1.3. Klimaszenarien

Klimaprojektionen zeigen mögliche zukünftige Veränderungen des Klimasystems. Der fünfte Sachstandsbericht des IPCC (IPCC, 2014) benennt vier Hauptszenarien, sogenannte repräsentative Konzentrationspfade der Treibhausgasemissionen („Representative Concentration Pathways“, RCP), welche die Bandbreite der Klimaveränderungen abbilden. Den vier Emissionsszenarien liegen sehr unterschiedliche sozio-ökonomische Annahmen bis zum Jahr 2100 zugrunde. Die Klimaszenarien wurde im Rahmen des CMIP5-Modellprojektvergleiches („Coupled Model Intercomparison Project - Phase 5“; Taylor *et al.*, 2012) gerechnet. Die CMIP5 Ergebnisse wurden im Rahmen des CORDEX-Programms für Europa regionalisiert („Coordinated Downscaling Experiment“; Jacob *et al.*, 2014). Jedes RCP wird durch eine Vielzahl von Klimäläufen repräsentiert, sodass eine mehr oder weniger große Bandbreite der Temperaturerhöhung projiziert wird. So beträgt der Temperaturanstieg beim RCP8.5 Szenario im Mittel mehr als 4 K im Vergleich zur vorindustriellen Zeit, die Unsicherheit (Bandbreite) reicht von 3,5 K bis knapp 5 K. Beim Klimaschutzszenario oder 2°C-Ziel (RCP2.6) wird die Erhöhung der globalen Mitteltemperatur auf 2 K im Vergleich zur vorindustriellen Zeit begrenzt.

Während die Temperaturerhöhung von den Klimamodellen sehr ähnlich (trotz hoher Bandbreite) berechnet wird, ist die Niederschlagsentwicklung mit einer deutlich höheren Unsicherheit behaftet. Für Deutschland lassen die Modelle keine signifikante Veränderung in der Niederschlagshöhe erwarten. Jedoch zeigen die Ergebnisse vieler Modellsimulationen, dass sich die Niederschlagsverteilung zugunsten der Winterniederschläge verschieben wird. Entsprechend ist im Sommer mit einer mehr oder weniger starken Abnahme der Niederschlagsmenge zu rechnen. Dies hätte zur Folge, dass auch die Dauer und Intensität von Trockenperioden und Dürren zunehmen würden.

3.1.4. Entwicklung von Temperatur und Niederschlag

Die im fünften Sachstandsbericht beschriebenen Emissions-(Klima-)Szenarien sind grundsätzlich gleich wahrscheinlich. Allerdings zeigen die aktuell beobachteten Treibhausgasemissionen keinen rückläufigen Trend, sodass die Werte sogar etwas über dem pessimistischen RCP8.5 Szenario liegen (Peters *et al.*, 2013). Das bedeutet, dass unter der Annahme, dass der Trend der beobachteten Treibhausgasemissionen weiter erhalten bleibt, das RCP8.5 Szenario in erster Näherung als realistisch einzustufen ist.

Die Baumartenempfehlungen in Hessen werden auf Grundlage der Ergebnisse des globalen Klimamodells ECHAM6-OM (Jungclaus *et al.*, 2010; Stevens *et al.*, 2013) für das Szenario RCP8.5 abgeleitet. Die Daten des Globalmodells wurden mit dem Regionalmodell STARS II, einer Weiterentwicklung des am Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung entwickelten statistischen Regionalmodell STARS II, für ganz Deutschland herunter skaliert (Orlowsky *et al.*, 2008).

Nach dem Regionalmodell STARS II wird die Jahresmitteltemperatur in Hessen in der Periode 2041 – 2070 auf bis zu 11,5°C im Flächenmittel ansteigen (Abb. 2, links). Im Vergleich zur Klimareferenzperiode 1991 – 2020 entspricht dies einer Temperaturerhöhung um knapp 2 K. Besonders die Hochlagen der Mittelgebirge würden sich überdurchschnittlich stark erwärmen. In der Rhein-Main-Ebene wird nach den Modellrechnungen die Jahresmitteltemperatur regional mehr als 13°C betragen.

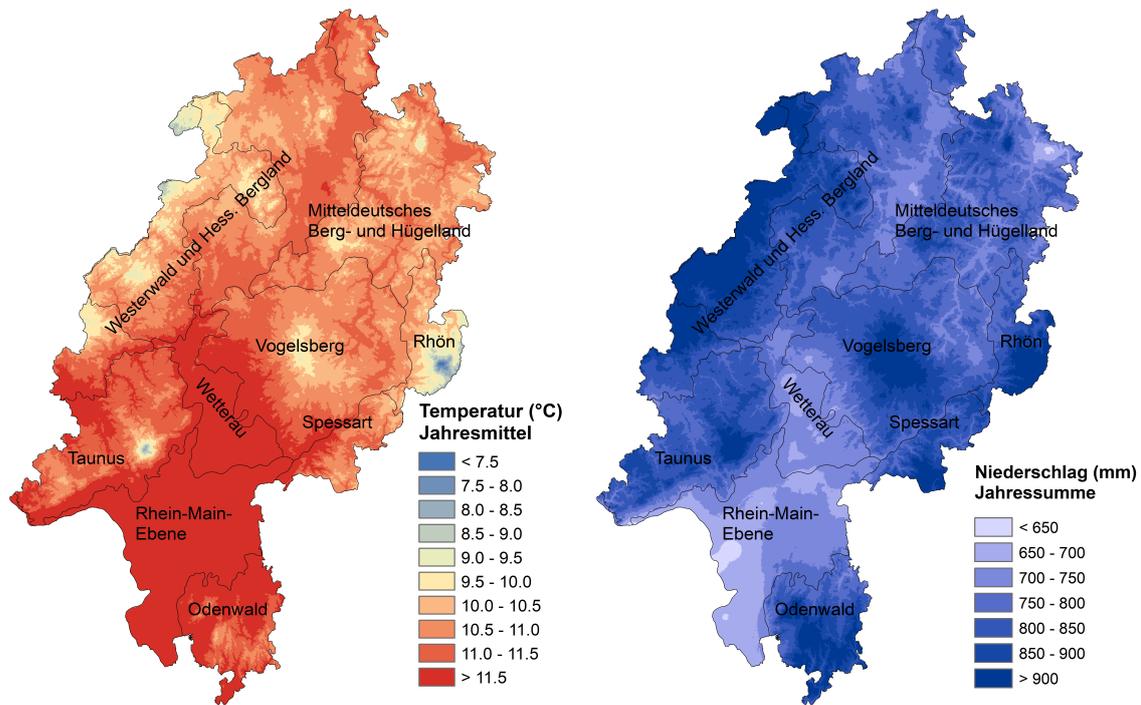


Abb. 2: Jahresmitteltemperatur und mittlere Jahresniederschlagssumme in der Periode 2041 – 2070 für das Klimaszenario RCP8.5 und dem Modell STARS II (Medianlauf).

Die langjährige Jahresniederschlagssumme nimmt nach den Ergebnissen des STARS II Modells (Medianlauf) im Flächenmittel von Hessen leicht auf rund 800 mm zu. Die Verteilung der Niederschläge im Jahr wird sich nach den Modellsimulationen allerdings deutlich verschieben. Während im Sommer die Niederschläge signifikant abnehmen werden, ist in den Wintermonaten mit einer deutlichen Zunahme der Niederschlagshöhe zu rechnen.

3.1.5. Klimatische Wasserbilanz

Die Klimatische Wasserbilanz (KWB) kennzeichnet den Überschuss oder das Defizit des gemessenen Niederschlags gegenüber dem potentiellen Verdunstungsverlust der Vegetation. Nach FAO-Norm („Food and Agriculture Organisation of the United Nations“) wird die potentielle Verdunstung für eine einheitliche Grasbedeckung berechnet (Allen *et al.*, 1998). Die KWB wird als 30jähriger Mittelwert für die Vegetationsperiode ermittelt. Der Vegetationsbeginn wird nach dem Verfahren von Menzel (1997) und das Ende der Vegetationszeit wird in Anlehnung an von Wilpert (1990) nach Albert *et al.* (2017) berechnet, sodass die in Zukunft erwartete Verlängerung der Vegetationszeit bei der KWB berücksichtigt werden konnte.

Bereits in der Klimareferenzperiode wird im Flächenmittel von Hessen ein Defizit von rund 115 mm in der KWB für die Vegetationszeit ausgewiesen. Dabei werden in der Rhein-Main-Ebene und der Wetterau Werte von unter -200 mm bis knapp -300 mm erreicht (Abb. 3, links). In den Mittelgebirgslagen werden unter den heutigen Klimabedingungen aufgrund der hohen Niederschläge und des geringeren Verdunstungsanspruches positive Klimatische Wasserbilanzen berechnet. Im Jahr 2018 wurde in weiten Teilen Deutschlands die bisher stärkste Dürre seit Beginn der regelmäßigen Messungen im Jahr 1881 beobachtet. In der Vegetationsperiode 2018 betrug die KWB landesweit in Hessen rund -450 mm. Für die trockensten Regionen wurden sogar Werte von unter -500 mm geschätzt.

In Zukunft werden sich die Wasserbilanzdefizite in Hessen weiter erhöhen und in der Periode 2041 – 2070 im Landesmittel bei rund -250 mm liegen. Die Ursachen für die starke Abnahme

in der KWB sind trockenere Sommer bei gleichzeitig zunehmenden Verdunstungsanspruch der Pflanzen infolge höherer Temperaturen. In der Rhein-Main-Ebene, der Wetterau und den Flusstälern in Nord- und Mittelhessen werden zukünftig Wasserbilanzdefizite nach dem verwendeten Klimamodell von unter -300 mm regional sogar unter -400 mm erwartet. Auch die Mittelgebirge weisen im langjährigen Mittel negative Klimatische Wasserbilanzen auf. In einzelnen extremen Trockenjahren sind durchaus noch weit größere Wasserbilanzdefizite wahrscheinlich.

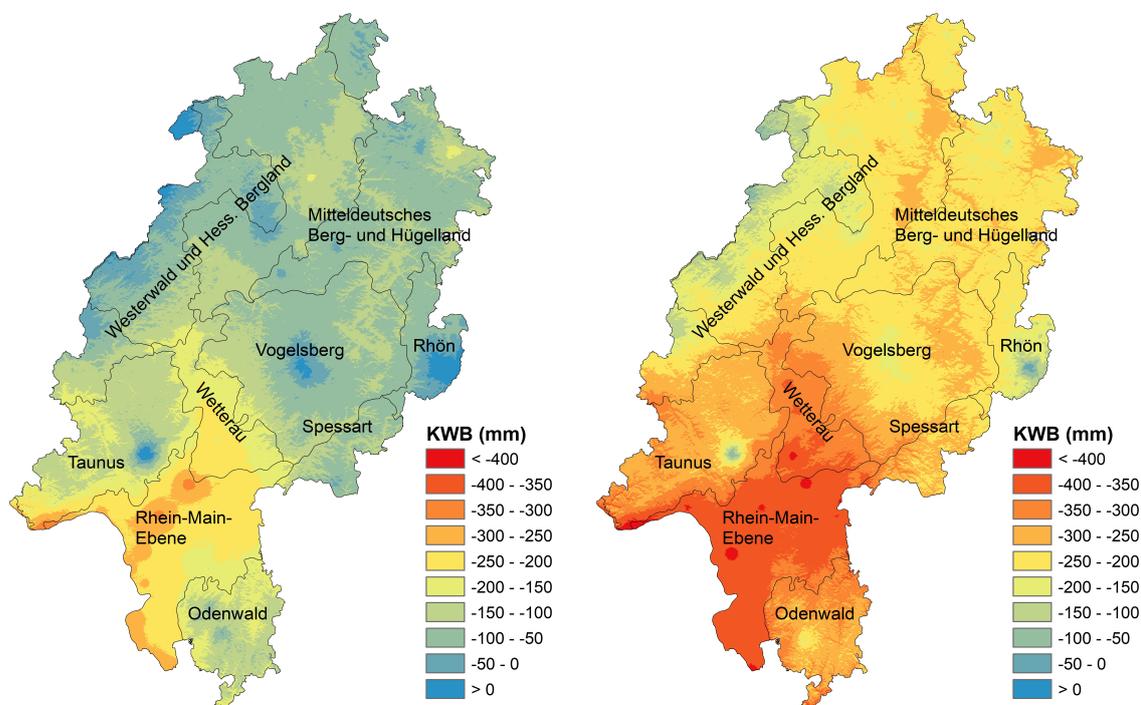


Abb. 3: Klimatische Wasserbilanz in der Klimareferenzperiode (1991 – 2020, links) und in der Periode 2041 – 2070 für das Klimaszenario RCP8.5, berechnet mit dem Modell STARS II (rechts).

3.1.6. ReKliEs-DE Kernensembel

Im Rahmen des ReKliEs-DE Projektvorhabens (Regionale Klimaprojektionen Ensemble für Deutschland) wurden erstmalig für Deutschland und die großen nach Deutschland entwässernden Flüsse belastbare Klimaprojektionen mit einer hohen regionalen räumlichen Auflösung bereitgestellt. Die Datenbasis ergänzt die Ergebnisse des europäischen Klimaforschungsprojektes EURO-CORDEX. Damit stehen umfassende Ensembles regionaler Klimaprojektionen der aktuellen RCP-Klimaszenarien des IPCC zur Verfügung (Hübener *et al.*, 2017), die als Entscheidungsgrundlage für die Klimafolgenforschung und mögliche Anpassungsmaßnahmen genutzt werden können.

Die Daten der Klimäläufe wurden im ReKliEs-DE Projekt für verschiedene Klimavariablen nach einem einheitlichen Format ausgewertet und aufbereitet. Aus dem Gesamtensemble mit 26 verschiedenen Modellkombinationen für das RCP8.5 Szenario („weiter-wie-bisher“) wurde für Anwender von Wirkmodellen im Rahmen des Bund-Länder-Fachgespräches ein sogenanntes Kernensembel ausgewählt, das nach vorgegebenen Qualitätskriterien die Bandbreite des Gesamtensembles repräsentiert (Dalelane *et al.*, 2018). Das Kernensembel umfasst sieben Klimäläufe des RCP8.5 Szenarios und besteht aus fünf Simulationen mit dynamischen Regionalmodellen und zwei Simulationen mit dem statistischen Regionalmodell „WETTREG2013“.

Für die Jahresmitteltemperatur zeigen alle Modellergebnisse einen einheitlichen Trend zu einer deutlichen Temperaturerhöhung zum Ende des Jahrhunderts im Flächenmittel

von Deutschland (Abb. 4). Im Vergleich zum Mittelwert der Periode 1971 – 2000 wird die Jahresmitteltemperatur in der Periode 2071 – 2100 um 2.8 K bis 4.7 K ansteigen. Die stärkste Erwärmung wird in den zwei Simulationen mit dem statistischen Modell „WETTREG2013“ berechnet. Weiterhin wird erwartet, dass beim RCP8.5 Szenario die Intensität und Dauer von Witterungsextremen wie Starkregen, Hitze- und Trockenperioden sowie Dürren deutlich zunehmen wird.

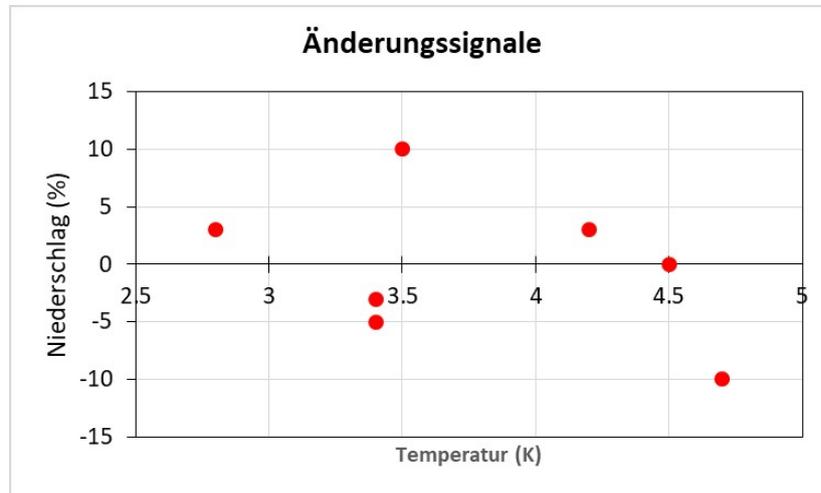


Abb. 4: Änderungssignale Temperatur und Niederschlag für das ReKliEs-DE Kernensemble für Deutschland; 2071 – 2100 versus 1971 – 2000 (Jahreswerte).

Bei den Niederschlägen zeigen die Modellergebnisse bei den Jahressummen keinen einheitlichen Trend (Abb. 4). Während einige Modelle im dreißigjährigen Mittel bis zum Ende des Jahrhunderts eine leichte Zunahme von bis zu 10% erwarten lassen, berechnet ein Teil der Modelle langfristig im Flächenmittel von Deutschland eine leichte Abnahme von bis zu 10% der Jahresniederschlagssumme im Vergleich zur Periode 1971 – 2000. Zwischen den Jahreszeiten kommt es nach den Modellergebnissen jedoch zu deutlichen Verschiebungen. Nach den meisten Simulationen muss in den Wintermonaten mit einer signifikanten Erhöhung der Niederschläge gerechnet werden. Im Sommer wird es dagegen trockener und infolge der höheren Temperaturen steigt auch der Verdunstungsanspruch der Atmosphäre erheblich an. Erste Auswertungen zur Klimatischen Wasserbilanz in der Vegetationszeit zeigen für Hessen eine Abnahme bis zum Ende des Jahrhunderts um bis zu 250 mm. Die KWB wird im dreißigjährigen Flächenmittel von Hessen von derzeit rund -100 mm auf rund -350 mm im pessimistischsten Klimalauf abnehmen. Allerdings ist die Bandbreite zwischen den sieben Klimalaufen des Kernensembles für das RCP8.5 mit mehr als 150 mm sehr groß.

3.2. Standörtliche Grundlagen

Die wichtigste Voraussetzung für die Herleitung klimasensitiver Baumartenempfehlungen ist eine flächendeckende Standortskarte (STOK). Diese sollte die Parameter Trophie, Wasserhaushalt (GWHS) und nutzbare Feldkapazität (nFK) enthalten. Legt man bei der Berechnung die KWB (siehe Kapitel 3.1.3) der aktuellen Klimaszenarien zu Grunde, dann lassen sich spezifische Empfehlungen für die ausgewählten Klimaszenarien ableiten.

Von HessenForst lag eine STOK mit Stand 2020 vor. Diese beinhaltete die eigenen Flächen von HessenForst sowie die von HessenForst betreuten Privat- und Kommunalwälder. Diese STOK deckte in etwa 80% der Waldfläche Hessens ab. Nur vereinzelt haben Waldbesitzende auch eine eigene STOK vorliegen. Somit galt es für die restlichen 20% der Waldstandorte eine STOK zu entwickeln.

Ein Vergleich der Trophieansprachen zwischen der STOK von HessenForst mit Stand 2020 und den bodenchemischen Daten der räumlich repräsentativen zweiten Bodenzustandserhebung im Wald (BZE II) zeigte tlw. erhebliche Abweichungen auf (Paar *et al.*, 2016). Daraus ergab sich im Projekt die Aufgabe diese Abweichungen zu analysieren und zu bereinigen.

Es ergaben sich somit zwei Gründe, warum im Projekt eine neue STOK entwickelt wurde. Dies war zum ersten die fehlende Abdeckung aller Waldstandorte der vorhandenen STOK und zum zweiten die geringe Differenzierung der vorhandenen STOK im mittleren Bereich. In den folgenden Abschnitten wird beschrieben, wie die drei wichtigsten Standortparameter (Trophie, Wasserhaushalt und nFK) flächendeckend für die Waldstandorte Hessens modelliert wurden.

3.2.1. Trophie

Einleitung

In der hessischen Standortkartierung können zur Kennzeichnung der Trophie sieben Stufen vergeben werden: kalk-eutroph, eutroph, schwach eutroph, gut mesotroph, mesotroph, schwach mesotroph und oligotroph. In der praktischen Anwendung erfolgte jedoch in der Vergangenheit überwiegend nur eine Unterscheidung der drei Haupttrophiestufen (eutroph, mesotroph, oligotroph), da eine stärkere Differenzierung der Trophie mit Hilfe der vorwiegend vegetationskundlichen Ansprache schwer umsetzbar ist. Die hierfür notwendigen regelmäßigen und umfassenderen bodenchemischen Analysen kamen jedoch erst in den letzten Jahren vermehrt zur Anwendung und haben sich in den letzten Jahrzehnten durch hohe atmosphärische Säure- und Stickstoffeinträge erheblich verändert. Entsprechend zeigte der Vergleich der Trophieansprachen zwischen den bodenchemischen Daten der räumlich repräsentativen zweiten Bodenzustandserhebung im Wald (BZE II) und der Trophieansprachen der flächenhaften Kartierungen in Hessen deutliche Verzerrungen (Paar *et al.*, 2016). An den Rasterpunkten der BZE II in Hessen wurden durch erfahrene Kartierer unter Berücksichtigung von aktuellen bodenchemischen Kennwerten 35% der Profile als mesotroph, 12% als gut mesotroph und 19% als schwach mesotroph angesprochen. Demgegenüber weist die Standortkarte für die Inventurpunkte 65% als mesotroph, 3% als gut mesotroph und 5% als schwach mesotroph aus (Paar *et al.*, 2016). An diesen Zahlen zeigt sich die starke Überrepräsentation der mesotrophen (mittleren) Verhältnisse bei der bisherigen praktischen Kartierung. Diese sehr grobe Klassifizierung steht jedoch im Widerspruch zu der beträchtlichen Bandbreite an Ausgangsmaterialien und Geländeformen in Hessen. Zum Beispiel sind topographische Gradienten mit einer von den Oberhängen zu den Unterhängen zunehmender Nährstoffversorgung (Chapin III *et al.*, 2011; Scholten *et al.*, 2017) in der Standortkarte von Hessen kaum repräsentiert (Heitkamp *et al.*, 2020).

Material und Methoden

Die Methodik zur Vorhersage der Trophiestufen unterteilt sich in drei Hauptschritte. Zunächst erfolgte eine Auswahl von Variablen und deren Klassifizierung zur Definition der Nährstoffverfügbarkeit. Die Wahl fiel auf die bodenchemischen Standortparameter Basensättigung, Kationenaustauschkapazität, C/N-Verhältnisse und austauschbare Elementvorräte (Ulrich & Shrivastava, 1978; Jansen *et al.*, 2002; AK Standortkartierung, 2016; Albert *et al.*, 2016). Eine Klassifizierung und Zuordnung zu den einzelnen Trophiestufen erfolgte analog dem Arbeitskreis AK Standortkartierung (2016).

Da die ausgewählten Standortparameter für Abschätzungen flächendeckend vorliegen müssen, wurden diese im zweiten Schritt für die Waldflächen regionalisiert. Eine detaillierte Abhandlung über die Methodik der Regionalisierung findet sich in Heitkamp *et al.* (2020). Die Regionalisierung basiert auf statistisch quantifizierbaren Umweltbeziehungen zwischen

den Daten der BZE II und in Kartierungen verfügbaren Stützvariablen (BFD50, ATKIS). Die Ergebnisse der Regionalisierung wurden anhand einer Kreuzvalidierung als gut bis sehr gut ($R^2 = 0,43 - 0,71$) bewertet. Mit den regionalisierten Größen lag somit eine Grundlage zur Ableitung der Trophiestufen vor. Die Daten wurden auf die Polygone der mit ATKIS Landnutzungsdaten (Laub-, Misch- und Nadelwald, HVBG 2018) verschnittenen BFD50 regionalisiert. In die so entstandenen Polygone wurde die vom Umweltbundesamt regionalisierte N-Deposition eingehängt (Schaap *et al.*, 2015).

Im dritten Schritt erfolgte eine regelbasierte Ableitung einer Trophiestufe anhand der gewählten Variablen (Abb. 5). Eine Herausforderung bei der Zusammenfassung mehrerer klassifizierter Variablen in eine einzige Klasse (Trophiestufe) besteht darin, dass unterschiedliche Variablen häufig a) in verschiedenen Bewertungsklassen eingeordnet werden und sich b) in ihrem Wert unterschiedlich fern der Klassengrenzen befinden. Die Lösung der Herausforderung bestand in der Anwendung von „fuzzy logic“. Bei der fuzzy logic wird zunächst für jede Variable ein „Optimalitätswert“ bestimmt, der einen Wert zwischen 0 und 1 annehmen kann. Anhand der gewichteten Summierung der Optimalitätswerte wurde anschließend eine eindeutige Zugehörigkeit zu einer Trophiestufe errechnet. Die Methodik ist detailliert in Ahrends *et al.* (2023) dargestellt.

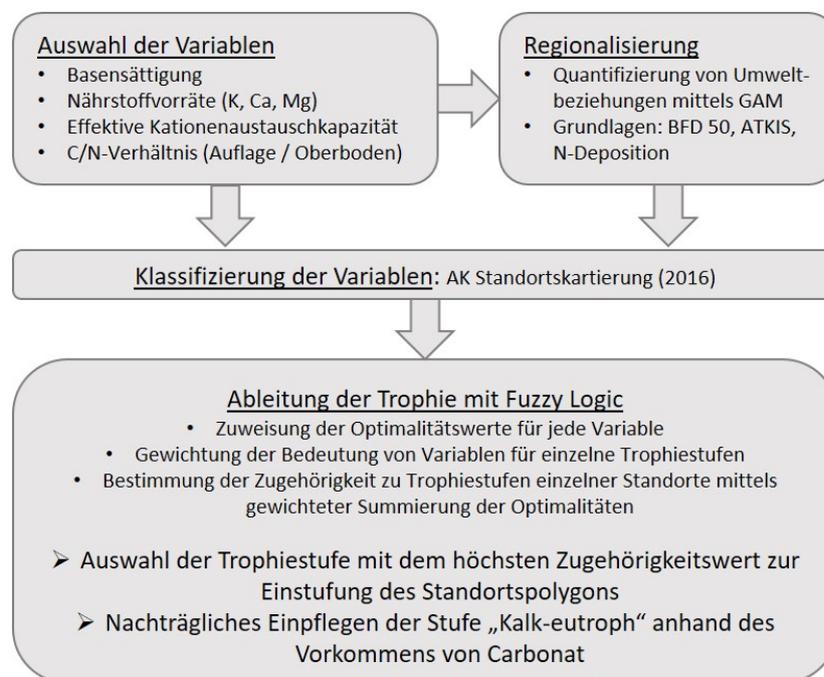


Abb. 5: Methodik zur Ableitung von Trophiestufen anhand bodenchemischer Parameter mittels Fuzzy-Logic.

Ergebnisse

Gegenüber der vorliegenden Standortkartierung wurde für 2.366 km² bisher unkartierte Waldfläche Trophieinformationen erzeugt. Die relativen Flächenanteile der modellierten Trophiestufen haben sich gegenüber der forstlichen Standortskarte deutlich verändert. In der originären Standortskarte wurden 64% von Hessens Waldböden als mesotroph kartiert, während dieser Anteil nach dem Modell 39% beträgt (Tab. 1). Im Gegenzug stiegen die Anteile gut mesotropher Flächen von 5% auf 15% und schwach mesotropher Flächen von 4% auf 18%. Die Anteile oligotropher und eutropher Flächen unterscheiden sich zwischen Kartierung und Modellschätzung nur geringfügig. Der Anteil kalk-eutropher Flächen stieg von 1,1% auf 3,6%. Die nach dem Modell generierte Häufigkeitsverteilung zeigt eine deutlich höhere Übereinstimmung der einzelnen Trophiestufen mit der Verteilung der aus den Nährstoffverhältnissen abgeleiteten Trophie an den räumlich repräsentativen Bodenprofilen der BZE II (Tab. 1).

Tab. 1: Häufigkeitsverteilung der Trophiestufen der Standortkartierung (Karte Original), der Einschätzung der BZE Punkte laut Kartierung (BZE Punkte Karte), der neu erhobenen Trophie an den BZE Punkten (BZE Punkte Profil, Paar *et al.*, 2016) sowie dem Schätzmodell (Karte Modell). Die Flächenanteile wurden auf Grundlage des ATKIS Datensatzes berechnet.

| | Karte Original (Fläche %) | BZE Punkte Karte (%) | BZE Punkte Profil (%) | Karte Modell (Fläche %) |
|-------------------|---|-------------------------|--------------------------|--|
| oligotroph | 1,2 | 4,3 | 5,0 | 2,4 |
| schwach mesotroph | 4,0 | 2,9 | 18,7 | 18,2 |
| mesotroph | 64,4 | 66,9 | 35,3 | 39,3 |
| gut mesotroph | 5,3 | 2,9 | 11,5 | 15,3 |
| eutroph | 24,0 | 23,0 | 25,2 | 21,2 |
| kalk-eutroph | 1,1 | - | 4,3 | 3,6 |
| Ausdehnung | 73% Waldfläche 6.324 km ² | 139 Punkte | 139 Punkte | 100% Waldfläche 8.690 km ² |

Eine stratifizierte Auswertung der kartierten und vorhergesagten Trophiestufen nach Landformen zeigte im Modell bei einigen Ausgangsmaterialien eine deutliche Differenzierung, die in der Feldkartierung nicht enthalten ist (Abb. 6). Besonders auffällig ist die Reliefabhängigkeit bei Solifluktsdecken mit Löss und sauren Gesteinsanteilen (z.B. Buntsandstein). Auf Kuppen wurden hier ca. 20% der Standorte als oligotroph und noch einmal 40% als schwach mesotroph eingestuft. Diese Anteile sanken hangabwärts über Oberhänge, Mittelhänge und ebene Bereiche zugunsten besserer Trophiestufen. Bei Solifluktsdecken mit Löss und basenarmen Gesteinsanteilen zeigte sich ein ähnliches Bild, wobei die Einstufung insgesamt in Richtung besserer Trophiestufen versetzt ist.

Eine detaillierte Auseinandersetzung von Gemeinsamkeiten und Unterschieden der Kartierung und Modellierung findet sich anhand von drei Beispielregionen in Ahrends *et al.* (2023).

Diskussion

Die Ableitung der Trophiestufen mittels Fuzzy-Logic anhand regionalisierter bodenchemischer Daten führte wie erwartet zu einer Differenzierung mesotroph kartierter Standorte in die Trophiestufen schwach mesotroph, mesotroph und gut mesotroph. Nach der HAFEA (HMLUF, 2002) sind Ausgangssubstrat, Humusform und vegetationskundliche Zusammensetzung die Hauptkriterien zur Differenzierung der Trophiehauptstufen (eutroph, mesotroph, oligotroph). Das Ausgangssubstrat war in der Modellierung der Bodenchemie ein entscheidender Modellparameter und die Humusform floss über das modellierte C/N-Verhältnis in die neue Bewertung ein. Diese Ähnlichkeit der beiden Ansätze erklärt die relativ gute Übereinstimmung der kartierten und vorhergesagten Hauptstufen. Im Gebiet Birstein, vor allem aber im Gebiet Spessart, wurden größere Flächen als oligotroph vorhergesagt als durch die Standortkartierung erfasst wurden. Laut HAFEA ist für die Zuweisung der Stufe oligotroph ein deutlich ausgebildetes Podsolprofil notwendig. In den beiden genannten Gebieten sind die oligotroph vorhergesagten Standorte laut hessischer Bodenkarte durch Podsole geprägt. Die durch Bodenchemie hergeleitete Einstufung stimmt also mit der HAFEA überein. Ob die räumliche Ausprägung der Podsole in den Gebieten durch die Standortkartierung oder die Bodenkarte besser erfasst ist, kann nur durch eine Überprüfung im Feld erfolgen. Diese Aussage gilt verallgemeinert für alle durch die Bodenkarte vorgegeben Polygonabgrenzungen. Bedeutsam ist in diesem Zusammenhang, dass in Hessen (im Unterschied zu vielen anderen Bundesländern) die Standortkartierung nicht bei der Erstellung der Bodenkarte berücksichtigt wurde.

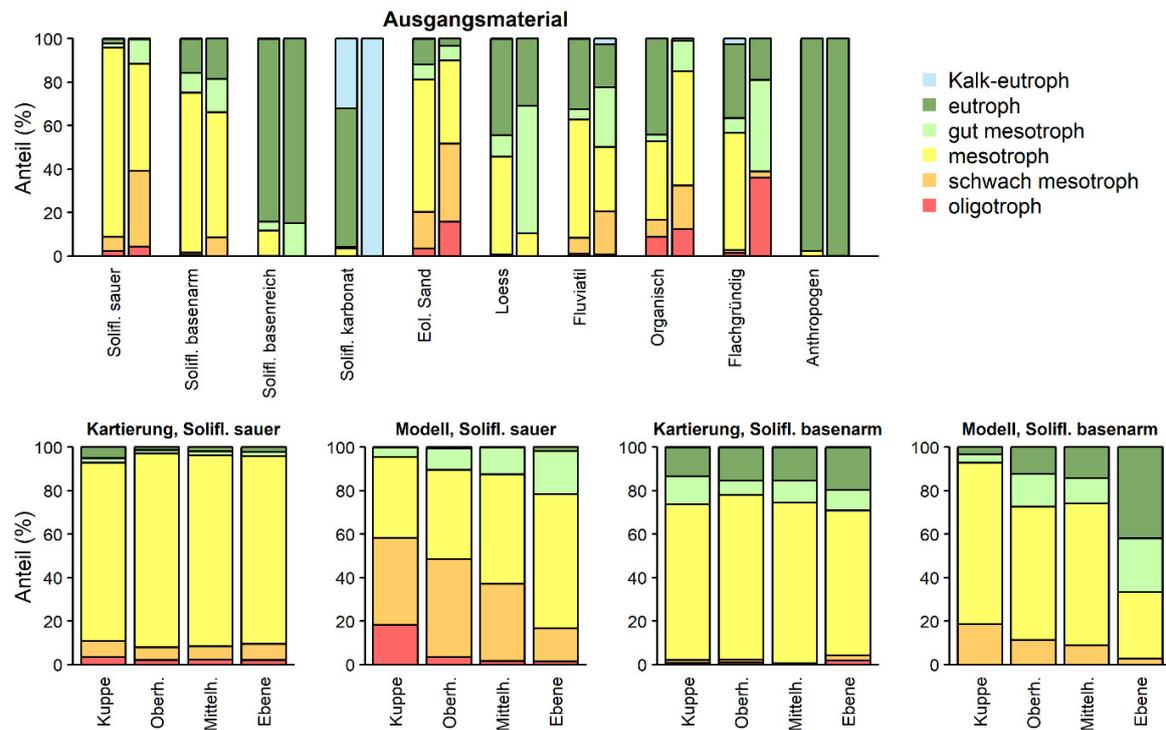


Abb. 6: Vergleich der Verteilung der Trophiestufen nach Ausgangsmaterial (oberer Teil; linker Balken: Kartierung, rechter Balken: Modell), den Landformen innerhalb der solifluidal beeinflussten Böden aus Löss mit saurem Grundgestein (untere zwei Tafeln links) und den solifluidal beeinflussen Böden aus Löss mit basenarmem Grundgestein. Solifl.: Solifluidal beeinflusste Böden aus Löss mit saurem, basenarmem, basenreichem oder karbonatischem Grundgestein; Eol. Sand: Äolischer Sand; Anthro: Anthropogen; Oberh.: Oberhänge; Mittelhänge: Flachgründig; flachgründige Böden (Ai-C Profil).

Die durch die Vorhersage stärker betonte Differenzierung in Übereinstimmung mit der Topographie ist theoretisch gut belegt. Durch Massenbewegungen (Fließerden, historische Erosion) ist der Lössanteil in Akkumulationsbereichen höher, während in Liefergebieten die Lössmächtigkeit abnimmt, die Profiltiefe geringer wird und der Skelettgehalt zunimmt (Mage & Porder, 2013; Scholten *et al.*, 2017). Gerade bei nährstoffarmen anstehenden Gesteinen ist die Lösskomponente in Hessen entscheidend für ein hohes Nährstoffangebot. Ausgeprägte Unterschiede dürften vor allem im Unterboden vorhanden sein, da auch an Oberhängen sehr häufig noch Lössauflagen im Oberboden vorhanden sind. Durch die im Vergleich zur Baumschicht geringe Durchwurzelungstiefe der Krautschicht, ist die Indikatorwirkung der Vegetation vor allem für den Oberboden gegeben (Fischer *et al.*, 2019). Die intensive Nutzung der Vegetation zur Einstufung der Trophie durch die Kartierung kann also die geringere Differenzierung erklären.

Auf einigen Standorten war die Differenzierung in mesotroph oder schwach mesotroph durch den Waldtyp beeinflusst. Einerseits ist es bekannt, dass die langjährige Bestockung mit Koniferen eine versauernde Wirkung auf den Boden hat (Meesenburg *et al.*, 2016) und sogar entscheidend für die Podsolierung ist (Zwanzig *et al.*, 2021). Andererseits enthält die genutzte räumliche Information über den Waldtyp (HVBG, 2018) keine Daten über die Dauer der Bestockung mit der aktuellen Vegetation. Die (indirekte) Nutzung des Waldtypes zur Charakterisierung der Trophiestufen kann also als unscharf angesehen werden. Einerseits wird die Verschlechterung der Nährstoffsituation durch reine Koniferenbestände berücksichtigt. Andererseits würden präzisere Informationen über historische Nutzung, oder auch eine stärkere Differenzierung der Baumarten, den Einfluss der Baumvegetation realistischer darstellen.

Insgesamt ist die Ausdehnung kalk-eutropher Standorte durch das Modell nur geringfügig geringer (3,6%) als bei der bodenchemisch basierten Einstufung durch die BZE II (4,3%). Demgegenüber ergibt sich aus der vorliegenden Standortkartierung nur ein Flächenanteil von 1,1%. Bei Fließerde-Standorten mit karbonathaltigem Gestein ist die Vorhersage klar nachvollziehbar. Im Gebiet des Hessischen Rieds sind Teile der eutroph kartierten Flächen laut Bodenkarte durch Rheinweiß-Vorkommen geprägt. Durch das Kriterium „eine Schicht mit Karbonatgehalt \geq C5“ sind diese Rheinweißstandorte als kalk-eutroph definiert. Das Vorkommen der karbonathaltigen Bänder variiert sehr stark in Tiefe und Mächtigkeit. Diese beiden Parameter sind in der Modellierung nur insofern berücksichtigt, da Horizonte nur bis 90 cm abgefragt wurden (Vergleichbarkeit zu BZE II). Für eine Abgrenzung kalk-eutropher Standorte gibt es allerdings auch für die Feldkartierung keine eindeutige Definition. Insofern besitzt die Ausweisung durch das Schätzmodell zumindest den Vorteil der Anwendung eindeutiger, intersubjektiv nachvollziehbarer Kriterien.

Eine Validierung der Ergebnisse des Schätzmodells im wissenschaftlichen Sinne steht vor mehreren Herausforderungen. Die Ableitung der Trophiestufen aus bodenchemischen Daten ist für diese Arbeit neu erstellt worden. Es existiert somit keine Datengrundlage, um die Vorhersagen gegen einen akzeptierten Standard abzugleichen. Eine Überprüfung der Vorhersagen durch Feldmethoden kann in Teilen hilfreich sein, vor allem, wenn bei der originalen Kartierung nur auf das dreistufige System der Hauptstufen (eutroph, mesotroph, oligotroph) zurückgegriffen wurde. Allerdings ist die ausschließliche Verwendung vegetationskundlicher Kriterien als kritisch anzusehen, da diese vor allem Aussagen für den Oberboden zulassen (Fischer *et al.*, 2019). Oberböden in Hessen sind sehr häufig durch lösshaltige Deckschichten geprägt und eine standörtliche Differenzierung der Trophie über die Vegetation ist somit stark durch Charakteristika des Oberbodens (bis 30 cm Bodentiefe) beeinflusst. Eine flächenhafte Überprüfung des Unterbodens mit Bohrungen, oder besser mit Profilgruben zur umfassenden Abschätzung der Trophie, erfordert allerdings nachträglich einen enormen Aufwand. Die Modellierungsgüte der regionalisierten bodenchemischen Parameter wurde durch eine Kreuzvalidierung durchweg als gut beurteilt (Heitkamp *et al.*, 2020). Hier ist im Vergleich zu den Trophiestufen zumindest eine Validierung mit üblichen Gütemaßen möglich. Dennoch ist zu bedenken, dass die Modelle auf Punktdaten basieren, um Flächendaten zu generieren. Die Generalisierung durch das Modell ist hier eher als Vorteil anzusehen. Bishop *et al.* (2015) diskutieren die Problematik der Überprüfung von flächenhaften Modellen mit Punktdaten („point support“ vs. „block support“) und kamen zu dem Schluss, dass diese Art der Validierung die eigentliche Kartengüte unterschätzt.

Schlussfolgerungen und Ausblick

Die Ziele einer größeren Differenzierung der mesotrophen Standorte in der hessischen Standortkartierung, ein Abgleich mit den Ergebnissen der BZE II und eine Erweiterung auf bisher unkartierte Gebiete mit Methoden des „Digital Soil Mapping“ (DSM) wurden erfolgreich umgesetzt. Die Methodik der Einstufung basiert auf der Regionalisierung von Nährstoffvorräten sowie weiterer Indikatoren der Nährstoffverfügbarkeit und berücksichtigt daher im Bodenprofil normalerweise für Kartiererinnen und Kartierer nicht direkt sichtbare Merkmale der Nährstoffverfügbarkeit (z.B. Versauerung / Entbasung) oder eine potentielle Verkleinerung der Nährstoffvorräte auch bei „reichen“ Substraten durch geringes Bodenvolumen im Wurzelraum (hohe Skelettanteile, Flachgründigkeit). Die Regionalisierung greift dabei auf pedologische Elemente zurück, die auch in der Feldkartierung angewandt werden (z.B. Ausgangsmaterial, Skelettanteil, Podsolierungsgrad, Bodenklasse). Dieses Zusammenspiel erklärt wahrscheinlich die hohe Übereinstimmung der modellierten Trophiestufen mit der Kartierung. Die plausiblere Differenzierung des mesotrophen Bereiches im Modell, die unter anderem durch eine Reliefabhängigkeit zu erklären ist, folgt einer theoretisch gut fundierten Regelmäßigkeit. Kritisch zu sehen ist vor allem die Abgrenzung einzelner Standorte, die auf der Bodenkarte 1:50.000 basiert. Bei stichprobenhaften Geländebegehungen an existierenden

Profilgruben zeigte sich, dass die Modellierung sehr gut funktioniert und Abweichungen häufig durch eine abweichende Lage der Bodeninformationen erklärt werden konnten. Beispielsweise wurden Podsole sowohl durch das Modell, als auch durch die Kartierung häufig als oligotroph eingestuft. Die reale und in der Bodenkarte kartierte Verortung kann aber abweichen. Diese Problematik trifft ebenso auf die Standortskartierung zu, insbesondere in Bereichen, für die keine Bodenprofile verfügbar sind. Eine repräsentative Überprüfung der Modellierung ist nur über einen längeren Zeitraum und mit dem Einsatz entsprechender personeller Ressourcen möglich. Es sollte dabei unbedingt auf einheitliche Kriterien und eine abgestimmte Dokumentation geachtet werden. Die Anlage von Bodenprofilen, idealerweise mit chemischer Analytik, wird dringend empfohlen.

Die nachträglichen, innerbetrieblichen Anpassungen der Trophiestufen durch HessenForst sind in Kapitel 3.2.5 beschrieben. Im Modell sind häufig Kuppenbereiche aufgrund geringer Nährstoffvorräte (viel Skelett, geringe Tiefe) schwächer modelliert als kartiert worden. Gerade Odenwald und Spessart sind ein Beispiel dafür. Standorte im Spessart waren großflächig mesotroph kartiert und durch die in Kapitel 3.2.5 beschriebene Regel wurden diese Flächen in den schwach mesotrophen Bereich verschoben. Dies ist für vorher unkartierte Flächen naturgemäß nicht möglich. In der Konsequenz besteht die Tendenz, dass unkartierte Standorte feiner parzelliert sind und dort mehr oligotrophe Bereiche ausgewiesen sind. Dieser Unterschied sollte bei der Beurteilung der finanziellen Förderungen von empfohlenen WEZ's beachtet werden.

3.2.2. Geländewasserhaushaltsstufe

Einleitung

Bei der Ansprache des Geländewasserhaushaltes an den BZE II Standorten in Hessen und einem Abgleich mit der vorliegenden Standortskartierung für die entsprechenden Plots konnten bei den Geländewasserhaushaltsstufen keine systematischen Abweichungen wie bei der Trophieeinstufung festgestellt werden (Paar *et al.*, 2016). Entsprechend sollten sich Arbeiten hinsichtlich der Ansprache des Geländewasserhaushaltes vorwiegend auf die Füllung von Kartierlücken konzentrieren, um insbesondere Forstbetrieben ohne forstliche Standortskartierung Informationen dafür bereitzustellen und somit eine klimaangepasste Waldbauplanung zu ermöglichen. Hierzu bieten sich neben hochaufgelösten digitalen Geländemodellen auch mittelmaßstäbliche (1:50.000) Bodenfunktions- und Eigenschaftskarten an. Da durch die geringe räumliche Auflösung, gekoppelt mit Unschärfen bei der Übersetzung der vorhandenen Bodenkennwerte in eine Geländewasserhaushalts- und Trophiestufe, große Unsicherheiten auftreten können, empfiehlt es sich, dass entsprechende Ansätze hinsichtlich ihrer Einsatzmöglichkeiten und inhaltlichen Grenzen gut evaluiert werden (Arrouays *et al.*, 2020). Entsprechend werden an dieser Stelle das Verfahren, die Ergebnisse und die Evaluierungen beschrieben. Weitere Informationen und methodische Details sind in Ahrends *et al.* (2023) beschrieben.

Material und Methoden

Der Ablauf der einzelnen Bearbeitungsschritte bei der Schätzung der Geländewasserhaushaltsstufe von nicht durch die Standortskartierung erfassten Waldgebieten in Hessen besteht aus den Schritten Variablenselektion, Kreuzvalidierung der Variablenselektion, Parametrisierung eines „Random Forest“ Modells (RF), Validierung des finalen Modells mit Hilfe von zurückgelegten Rasterpunkten der Standortskartierung und abschließend die Standortsschätzung für nicht kartierte Gebiete (Ahrends *et al.*, 2023). Als statistische Validierungstechnik wurde auf eine Kreuzvalidierung mit dem Paket „rfUtilities“ (Evans *et al.*, 2010) und einem zurückgehaltenen Validierungsdatensatz zurückgegriffen. Die statistische Bewertung erfolgte mit Hilfe von standardmäßig verwendeten Gütemaßen, um die Performance des RF Algorithmus zu beurteilen. Als zusätzliche Variante der Modellevaluierung bietet sich ein direkter visueller

Abgleich mit benachbarten kartierten Flächen in Beispielregionen an. Dieses eher subjektive Verfahren ist eine sehr einfache graphische Überprüfung, ob in den Grenzbereichen zwischen Feldkartierung und der digitalen Kartierung auffällige Sprünge hinsichtlich der Zielgrößen auftreten, oder ob die beiden Kartierverfahren in einem landschaftlichen und maßstäblich harmonischen Kontext nebeneinander existieren können, ohne dass gravierende Widersprüche zwischen den beiden Methoden auftreten.

Die Karte mit den Polygonen der elf GWHS der hessischen Standortkartierung wurde in das $10 \times 10 \text{ m}^2$ Raster des digitalen Geländemodells (DGM10) umgewandelt, um diese mit den aus dem DGM10 abgeleiteten Reliefparametern verknüpfen zu können. Für jede GWHS wurde per Zufallsauswahl aus jeder Klasse ($n=11$) die gleiche Anzahl ($n=20.000$) von Datenpunkten gezogen. Eine gleichmäßige Belegung der Klassen wurde gewählt, da RF dazu neigt, sich an der Mehrheitsklasse zu orientieren und es so zu Unausgewogenheiten (Bias) kommen kann (Winham *et al.*, 2013). Diesen insgesamt 220.000 Datenpunkten wurden die Geoinformationen aller weiteren verfügbaren Variablen (Boden, Relief, Wuchsbezirke, usw.) zugeordnet. Beim Vorliegen von Datenlücken in einem der Geodatensätze wurde der entsprechende Datensatz komplett aus der weiteren Analyse ausgeschlossen. Der verbleibende Datensatz ($n=209.343$) wurde in 90% Trainingsdaten ($n=188.408$) und 10% Validierungsdaten ($n=20.935$) aufgeteilt. Das Verhältnis 90:10 wurde ausgewählt, da sehr viele Parameter (>100) bei der Modellentwicklung Berücksichtigung fanden (Joseph, 2022).

Ergebnisse

Von den 122 verfügbaren Variablen wurden im Variablenselektionsprozess 31 Variablen für die Beschreibung der Geländewasserhaushaltsstufe (GWHS) von dem Selektionsverfahren nach Murphy *et al.* (2010) ausgewählt. Diese lassen sich in drei Gruppen einteilen: (1) Variablen, die die überregionale waldökologische Naturraumgliederung beschreiben. Hierzu gehören die Geländehöhe und die forstlichen Wuchsgebiete und -bezirke. (2) Diese Gruppe umfasst aus dem DGM10 abgeleitete Reliefparameter. Als besonders einflussreich haben sich die negative und positive topographische Offenheit („Topographic Openness“), die standardisierte Höhe (das Produkt aus normierter Höhe multipliziert mit absoluter Höhe nach Dietrich und Böhner (2008)), die Geländerauigkeit („Terrain Ruggedness Index“, mittlere Differenz zwischen einem zentralen Punkt und seiner Umgebung) und die beiden topographischen Indices MrRTF („Multiresolution Ridge Top Flatness“) und MrVBF („Multiresolution Index of Valley Bottom Flatness“), die dazu dienen, hochgelegene flache Bereiche und Bereiche mit akkumuliertem Material in flachen Talsohlen zu identifizieren, erwiesen. (3) Zahlreiche aus der Bodenkarte abgeleitete Parameter weisen einen hohen Einfluss auf das Modellergebnis auf. Neben Informationen zum Substrat, der Bodenklasse und der ökologischen Feuchtestufe erwiesen sich insbesondere Variablen, die bodenphysikalische Eigenschaften beschreiben (KAK_{pot} als integrativer Proxy für die Korngrößenverteilung, Spezifische Oberfläche, Feinbodenvorrat und nFK) als bedeutsam für das Modellergebnis. Insbesondere die vier letztgenannten Variablen sind stark korreliert. Auf eine Darstellung der relativen Variablenbedeutung wurde deshalb verzichtet, da eine kausale Interpretation erschwert ist. So würden diese Variablen jeweils nur noch einen Teil der Wirkung auf die Vorhersagegenauigkeit des Gesamtmodells haben, obwohl sie dieselbe Information transportieren.

Mit Kappa-Koeffizienten von 0,68 und AC-Werten von 0,71 erreicht das RF Modell sowohl für die Trainings- als auch für die Validierungsdaten eine Übereinstimmung zwischen den modellierten GWHS und denen der Standortkartierung, die nach Landis und Koch (1977) als „erheblich“ zu bewerten ist. Die klassenspezifischen statistischen Kennwerte (Tab. 2 und 3) zeigen jedoch, dass sich zwischen den GWHS deutliche Unterschiede hinsichtlich ihrer Schätzgenauigkeit ergeben. Insbesondere die GWHS frisch, betont frisch und mäßig frisch zeigen verhältnismäßig geringe F1-Werte. Alle anderen Stufen lassen sich mit einer sehr hohen Trefferquote und Genauigkeit vorhersagen. Da sowohl der Trainings-, der Validierungsdatensatz und die Kreuzvalidierung sehr ähnliche Ergebnisse liefern, werden hier nur die Ergebnisse

des Validierungsdatensatzes dargestellt. Da RF einen Teil der Eingangsdaten im Zuge der Modellentwicklung zurücklegt (Belgiu & Drăguț, 2016), ist ein solches Ergebnis bei dem sehr hohen Stichprobenumfang nicht überraschend.

Tab. 2: Fehlermaße der Modellvalidierung für die Geländewasserhaushaltstufen (GWHS); n = Anzahl der Validierungszellen pro GWHS, TP = wahr positive, TN = wahr negative und FP = falsch positive Vorhersagen; RC = Trefferquote, PC = Präzision und $F_1 = F_1$ -Wert.

| GWHS | n | TP | TN | FP | RC | PC | F1 |
|----------------------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|
| frisch [1] | 1.492 | 693 | 1.390 | 799 | 0,33 | 0,46 | 0,39 |
| betont frisch [2] | 2.267 | 1.212 | 807 | 1.055 | 0,60 | 0,53 | 0,57 |
| mäßig frisch [3] | 1.740 | 861 | 1.082 | 879 | 0,44 | 0,49 | 0,47 |
| mäßig trocken [4] | 2.031 | 1.201 | 734 | 830 | 0,62 | 0,59 | 0,61 |
| feucht [5] | 1.907 | 1.338 | 570 | 569 | 0,70 | 0,70 | 0,70 |
| wechsel-feucht [6] | 2.067 | 1.455 | 529 | 612 | 0,73 | 0,70 | 0,72 |
| nass [7] | 1.315 | 1.092 | 330 | 223 | 0,77 | 0,83 | 0,80 |
| sickerfeucht [8] | 2.131 | 1.819 | 124 | 312 | 0,94 | 0,85 | 0,89 |
| trocken [9] | 1.994 | 1.528 | 322 | 466 | 0,83 | 0,77 | 0,80 |
| ziemlich frisch [13] | 2.043 | 1.771 | 173 | 272 | 0,91 | 0,87 | 0,89 |
| wechsel-trocken [46] | 1.948 | 1.891 | 13 | 57 | 0,99 | 0,97 | 0,98 |

Tab. 3: Konfusionsmatrix der Feldkartierung und der digitalen Kartierung der Geländewasserhaushaltsstufen für den Validierungsdatensatz. Alle Werte innerhalb einer jeweiligen Spalte, die $\geq 10\%$ der Spaltensumme repräsentieren, sind in drei unterschiedlich starken Grautönen auf einer Skala von Weiß nach Schwarz dargestellt. [1] frisch; [2] betont frisch; [3] mäßig frisch; [4] mäßig trocken; [5] feucht; [6] wechsel-feucht; [7] nass; [8] sicker-feucht; [9] trocken; [13] ziemlich frisch; [46] wechsel-trocken. Die Zahlen beschreiben den Schlüssel der hessischen Standortkartierung.

| | | Feldkartierung der Geländewasserhaushaltsstufen | | | | | | | | | | |
|---------------------|------|---|-----|-----|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|
| | | [2] | [1] | [3] | [4] | [9] | [6] | [5] | [7] | [8] | [13] | [46] |
| Digitale Kartierung | [2] | 1.212 | 414 | 123 | 30 | 12 | 136 | 238 | 43 | 26 | 32 | 1 |
| | [1] | 248 | 693 | 274 | 38 | 2 | 118 | 40 | 27 | 20 | 29 | 3 |
| | [3] | 92 | 401 | 861 | 245 | 29 | 40 | 14 | 12 | 9 | 35 | 2 |
| | [4] | 38 | 88 | 433 | 1.201 | 228 | 7 | 13 | 4 | 11 | 8 | 0 |
| | [9] | 13 | 16 | 39 | 348 | 1.528 | 0 | 19 | 5 | 20 | 6 | 0 |
| | [6] | 142 | 234 | 49 | 7 | 0 | 1.455 | 86 | 73 | 1 | 16 | 4 |
| | [5] | 183 | 77 | 19 | 14 | 9 | 90 | 1.338 | 137 | 30 | 9 | 1 |
| | [7] | 22 | 12 | 1 | 2 | 1 | 71 | 112 | 1.092 | 1 | 1 | 0 |
| | [8] | 56 | 58 | 45 | 32 | 37 | 4 | 37 | 16 | 1819 | 27 | 0 |
| | [13] | 13 | 85 | 92 | 17 | 4 | 37 | 8 | 8 | 6 | 1.771 | 2 |
| | [46] | 0 | 5 | 7 | 1 | 0 | 26 | 3 | 5 | 0 | 10 | 1.891 |

Durch die Modellierung wurde in der Beispielregion Bilstein größeren, bisher nicht kartierten Flächen, eine Geländewasserhaushaltsstufe zugewiesen (Abb. 7a,b; rechts oben und links unten). Die mittels RF geschätzten GWHS zeigen ein der Standortkartierung vergleichbares und auch für die bisher nicht kartierten Flächen plausibles Muster. Entsprechendes gilt auch für die Beispielregion Spessart (Abb. 7c,d; links oben). Der kleinräumige Wechsel zwischen betont frisch, frisch und mäßig frisch wird durch die Kombination von Attributen aus der Bodenkarte und Reliefparametern mittels RF sehr detailliert beschrieben. Auffällig ist in beiden Testregionen, dass sich der räumliche Detaillierungsgrad zwischen klassischer und digitaler Standortkartierung nicht unterscheidet. Die Beispielregion Hessisches Ried ist fast vollständig durch die forstliche Standortkartierung erfasst (Abb. 7e,f). Entsprechend mussten

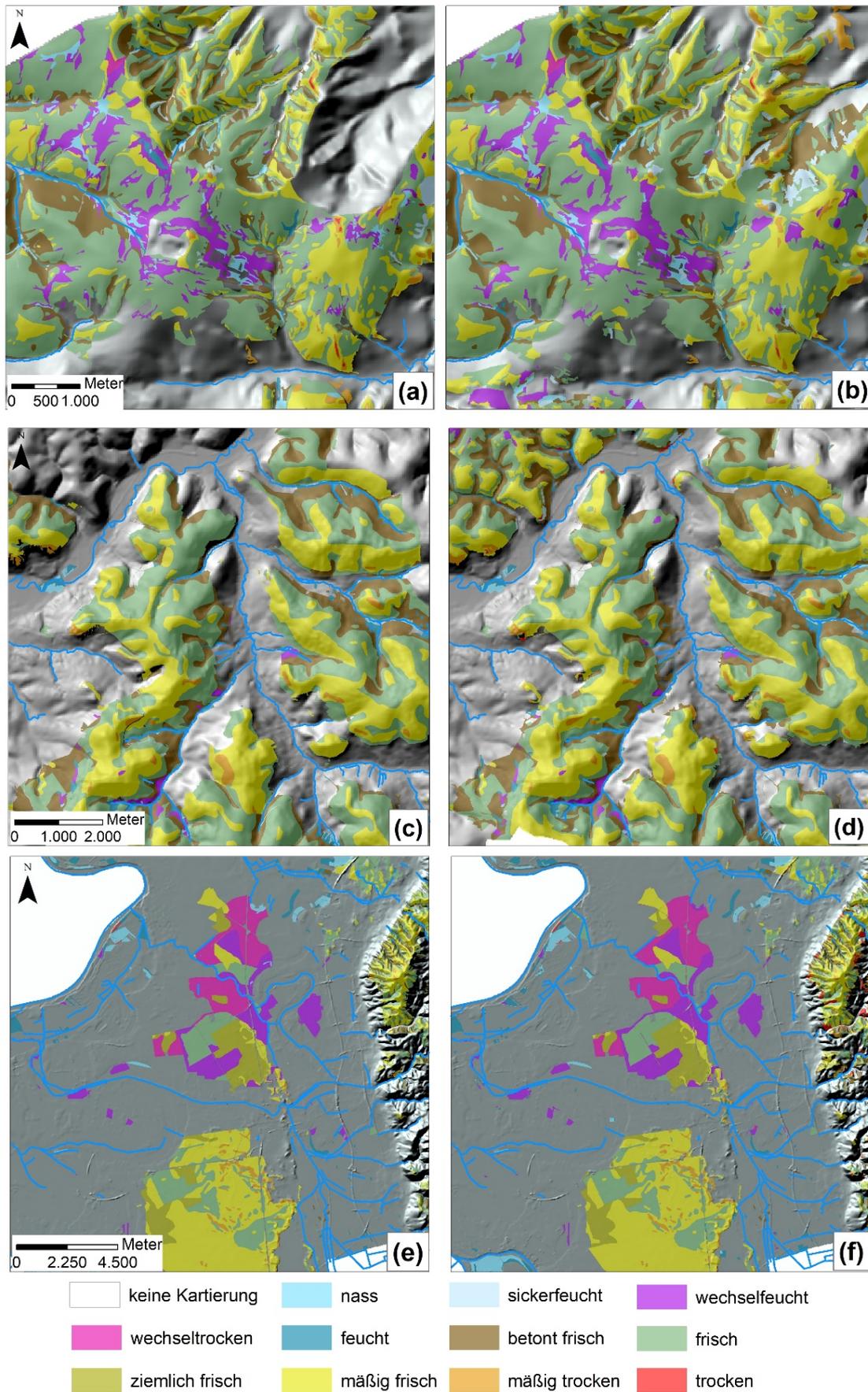


Abb. 7: Geländewasserhaushaltseinstufung nach Standortkartierung (links) und ergänzt nach Schätzmodell (rechts) in den Gebieten Bilstein (a, b), Spessart (c, d) und Hessisches Ried (e, f).

in dieser Region nur sehr geringe Flächenanteile nachkartiert werden. Neben kleinen als nass und feucht kartierten Splitterflächen im Bereich des Rheins fallen hier insbesondere im Bereich des Odenwaldes mehrere als trocken und mäßig trocken eingeschätzte Flächen auf. Hierbei handelt es sich vorwiegend um Kuppenlagen und sehr steile Hangabschnitte. Flächen, die neu durch die digitale Standortskartierung erfasst wurden, zeigen ein vergleichbares Muster der GWHS wie die umgebenden durch die Standortskartierung erfassten Flächen (Abb. 7f; Mitte rechts).

Diskussion

Neben den Reliefinformationen und den hessischen Bodenflächendaten (BFD50) waren die forstlichen Wuchsgebiete und -bezirke gewichtige Eingangsparameter bei der Schätzung für nicht kartierte Flächen. Von Köhler *et al.* (2016) wurden als die wichtigsten Variablengruppen im Modell zur Standortsschätzung in Niedersachsen die Geländehöhe, Wuchsbezirke und aus der Bodenkarte abgeleitete Kenngrößen genannt. Die Wuchsgebiete sind Großlandschaften, die sich aufgrund ihrer geomorphologischen, geologischen und klimatischen Charakterisierung deutlich voneinander unterscheiden. Innerhalb der Wuchsgebiete wird mit Hilfe der Wuchsbezirke anhand des Klimas, der Ausgangssubstrate, der Topographie und anderer Kriterien weiter differenziert. Ein Hauptkriterium für die Abgrenzung ist hierbei das Großklima. Da in der Standortskartierung bei der Bewertung des Wasserhaushaltes u.a. das Baumhöhenwachstum starke Berücksichtigung findet (AK Standortskartierung, 1996: S. 112), schlägt sich dieses auch in der starken Bedeutung der forstlichen Wuchsgebiete und -bezirke nieder. Bei der Interpretation der Reliefparameter ist zu beachten, dass auch schon bei der Erstellung der BFD50 Reliefparameter berücksichtigt wurden (Heitkamp *et al.*, 2020). Viele der im Variablenselektionsprozess ausgewählten Reliefparameter („Höhe über NN“, „Topographic Openness“, „Terrain Ruggedness Index“, „Multiresolution Index of Valley Bottom Flatness“ – vgl. Kapitel Trophie) trugen z.B. auch bei Köhler *et al.* (2016) deutlich zur Erhöhung der Vorhersagegenauigkeit bei. Der „Index of Valley Bottom Flatness“ (MrVBF) ist offensichtlich besonders von Bedeutung, um Bereiche mit akkumuliertem Material in flachen Talsohlen zu identifizieren und so eine genauere Differenzierung zwischen frisch und betont frisch herbeizuführen.

Die Bodenflächendaten (BFD50) waren eine der Hauptgrundlagen für die eingesetzten Schätzmodelle. Somit führen die kleinräumige Variabilität des Ausgangsmaterials der Bodenbildung und die geringe Aufnahmedichte im Rahmen der bodenkundlichen Landesaufnahme (insbesondere im Wald) zu Fehlansprachen.

Bei der Evaluierung ergeben sich insbesondere für die GWHS frisch und die direkt angrenzenden Einstufungen deutlich schlechtere Vorhersagegenauigkeiten als für das Gesamtmodell erreicht werden konnten. Nach HMLUF (2002) sind die terrestrischen GWHS durch die folgenden nFK-Werte je 1 m Profiltiefe definiert. Trocken (≤ 25 mm), mäßig trocken (26 – 60 mm), mäßig frisch (61 – 90 mm), frisch (91 – 150 mm), betont frisch (> 150 mm). Demgegenüber erfolgt in Schmidt *et al.* (2015) folgende Definition der nFK-Werte je 1 m Profiltiefe: trocken (≤ 30 mm), mäßig trocken (31 – 70 mm), mäßig frisch (71 – 110 mm), frisch (111 – 165 mm), betont frisch (> 165 mm). Vor dem Hintergrund, dass die mittlere nFK in Hessen bei 135 mm liegt, und die höchsten Werte (Median der Lösslehmgruppe) bei 188 mm liegen (Paar *et al.*, 2016), erschließt sich, dass ein großer Anteil der Waldböden in Hessen in dem großen Bereich zwischen frisch und betont frisch liegt. Somit ist es naheliegend, dass schon im Gelände Fehleinschätzungen zwischen diesen beiden Klassen vorkommen. Berücksichtigt man zusätzlich die markanten Unterschiede der Pedotransferfunktion (PTF) zur Ableitung der nFK (AK Standortskartierung, 2016) und die Unsicherheiten bei der Ermittlung der Skelettgehalte (Wolff & Riek, 2006; Ahrends *et al.*, 2016), sind Fehleinschätzungen zwischen diesen beiden Stufen wohl kaum vermeidbar. Hinzu kommt, dass ähnlich wie bei der Klassifizierung der Trophie die Kartiererinnen und Kartierer vermutlich häufiger zu der Einschätzung von mittleren Standortverhältnissen (hier frisch und mesotroph) tendieren

(Köhler *et al.*, 2016). Entsprechende Zusammenhänge zeigt auch die Konfusionsmatrix mit der Gegenüberstellung der Werte (Tab. 3). Das RF Modell tendiert häufiger zur Stufe betont frisch als die Standortskartierung. Auch im Rahmen der BZE II wurden in Hessen 14% der BZE Punkte (n=20) als Lösslehm-Standorte identifiziert. Auf diesen Standorten beträgt die reine Lösslehmüberlagerung mehr als 70 cm (Paar *et al.*, 2016). Entsprechend wären solche Standorte vorzugsweise als betont frisch bzw. wechselfeucht und nicht als frisch einzustufen. Die Übergangsstufen ziemlich frisch [13] und wechsel-trocken [46] wurden in den beiden Spalten ganz außen eingetragen (Tab. 3), da sie in der Praxis nur selten und zudem regional sehr unterschiedlich auskartiert wurden. Trotz dieser begründbaren leichten Verzerrung um die Klasse der frischen Standorte zeigen die Modellgütekriterien (z.B. Kappa 0,68) insgesamt ein hohes Maß an Übereinstimmung der digitalen Standortskartierung mit der Feldkartierung. Die erzielten Gütemaße rangieren im oberen Bereich ähnlicher DSM Fragestellungen (Behrens *et al.*, 2010; Häring *et al.*, 2012; Brungard *et al.*, 2015; Köhler *et al.*, 2016). Deutlich schlechtere Vorhersagegüten von Wasserhaushaltsstufen ergaben sich im benachbarten Bundesland Nordrhein-Westfalen (Schulz & Asche, 2000). Hier erbrachte ein Vergleich der kartierten und geschätzten Wasserhaushaltsstufen für alle Stufen sehr geringe prozentuale Übereinstimmungen (trocken: 20,6%; mäßig trocken: 34,5%; mäßig frisch: 50,8%; frisch: 46,7%; sehr frisch: 32,9% und äußerst frisch: 46,2%). Der direkte Vergleich von Gütemaßen zwischen länderspezifischen Verfahren ist jedoch nur eingeschränkt möglich, da der inhaltliche und räumliche Detaillierungsgrad der jeweiligen Kartiersysteme sehr unterschiedlich ist. Auffällig ist jedoch in den Beispielregionen dieser Arbeit, dass sich der räumliche Detaillierungsgrad der Feldkartierung und der digitalen Standortskartierung kaum unterscheiden. Dieses ist insbesondere vor dem Hintergrund unerwartet, da die in die Modellierung eingegangenen Eingangsdaten vorwiegend aus mittelmaßstäblichen Kartenwerken (1:25.000 – 1:50.000) stammen. Wie in Kapitel 3.2.1 bereits erläutert, wurden viele Kennwerte der BFD50 für die Parametrisierung des RF Modells verwendet. Auch wenn der eigentliche Kartiermaßstab der BFD50 wahrscheinlich größer als 1:50.000 ist (Ad-hoc-AG Boden, 2006), ist der Sprung zur forstlichen Standortskartierung, deren Maßstab sich auf 1:5.000 – 1:10.000 belaufen soll (Friedrich *et al.*, 2002), erheblich. Nach AK Standortskartierung (2016) beträgt der Maßstab der hessischen Standortstypenkarte 1:25.000. Das würde die vergleichbare räumliche Auflösung der beiden Erhebungsmethoden erklären.

Insgesamt hätten die vom Variablenselektionsverfahren ausgewählten 31 Variablen noch weiter reduziert werden können, da insbesondere einige aggregierte Variablen aus der Bodenkarte hoch korreliert sind. RF kann jedoch auch bei der Verwendung vieler hoch korrelierter Variablen stabile Vorhersagen liefern (Dormann *et al.*, 2013). Entsprechendes zeigen auch die Ergebnisse der Kreuzvalidierung und des Validierungsdatensatzes. Da hinsichtlich noch sensitiverer Variablenselektionsverfahren der Datenumfang bei einer landesweiten Anwendung zu groß war, und RF Modelle wenig sensitiv gegenüber nicht informativen Prädiktoren sind (Kuhn & Johnson, 2013), wurde in Anlehnung an Hengl *et al.* (2015) auf eine weitere Variablenselektion verzichtet.

Schlussfolgerungen und Ausblick

Das Ziel einer Erweiterung der Geländewasserhaushaltseinstufung auf bisher unkartierte Gebiete wurde erfolgreich umgesetzt. Anders als die Trophie wurde die GWHS unverändert übernommen, da die relativen Häufigkeiten der GWHS des BZE II Kollektivs eine gute Übereinstimmung mit dem flächenhaften Vorkommen der einzelnen GWHS aus der Standortskartierung in Hessen aufweisen. Für das Schätzmodell ergab die Evaluierung eine substanzielle Übereinstimmung mit Validierungsdaten aus der Standortskartierung. Es zeigten sich jedoch deutliche Unterschiede in der Schätzgenauigkeit für unterschiedliche GWHS. Diese Unsicherheiten basieren zum einen auf Unschärfen bei der vorliegenden Kartierung, die direkt an das statistische Modell weitergegeben werden. Zum anderen resultieren aus der Einbeziehung der Bodenflächendaten (BFD50) weitere Unsicherheiten aufgrund des Kartenmaßstabes.

Deutliche Verbesserungen in der räumlichen Abgrenzung der Kartiereinheiten wären somit durch eine Verwendung einer großmaßstäblicheren Bodenkarte zu erwarten. Da die BFD25 (Maßstab 1:25.000) nur einen sehr geringen Anteil von Hessen abdecken, ist eine entsprechende Berücksichtigung in einem landesweiten Ansatz aktuell jedoch nicht möglich.

3.2.3. Nutzbare Feldkapazität

Einleitung

Die nutzbare Feldkapazität (nFK) ist eine bodenhydrologische Kenngröße. Sie beschreibt die Menge an pflanzenverfügbarem Wasser, die ein Boden potentiell speichern kann. Sie ist abhängig von der Feinbodenart und Trockenrohdichte sowie den Humus- und Bodenskeletthalten. Die Berechnung erfolgt über Pedotransferfunktionen (PTF) im volumetrischen Bezug (Vol-% oder $\text{mm}\cdot\text{dm}^{-1}$). Um diese als eine absolute metrische Kenngröße darzustellen, ist die Berechnungstiefe als eine weitere abhängige Variable zu nennen. Bei Hügelland- und Mittelgebirgsstandorten wird oft 100 cm als Berechnungstiefe angenommen. Zum einen liegt hier oftmals bereits das anstehende Festgestein vor und zum anderen verteilt sich hier die Hauptwurzelmasse periglaziär-geprägter Böden. Zudem gibt auch die Hessische Anweisung für die Forstliche Standortaufnahme HAFEA (HMLUF, 2002) auf 1 Meter bezogenen nFK-Richtwerte für die verschiedenen terrestrischen Geländewasserhaushaltsstufen aus.

Aus der Verknüpfung von nFK und KWB (siehe auch Kapitel [Klimatische Grundlagen und Projektionen](#)) ergibt sich die Standortwasserbilanz (SWB), die zur Einschätzung des Trockenstressrisikos terrestrischer Standorte verwendet wird (Spellmann *et al.*, 2007; Sutmöller *et al.*, 2008). Für eine dynamische und klimaangepasste Baumartenwahl (Böckmann *et al.*, 2019; Hamkens *et al.*, 2020) ist die nFK somit eine wichtige Säule zur übergeordneten Beschreibung des Bodens, welcher eines der drei Hauptkomplexe des Standorts darstellt. Jedoch muss hierfür die nFK flächenhaft abgeleitet und zur Verfügung gestellt werden. Die meisten Standortkartierungsverfahren ermöglichen jedoch keine unmittelbare (Overbeck *et al.*, 2011) bzw. nur eine bedingt räumlich-differenzierte (Ahrends *et al.*, 2016) Ableitung der nFK.

Im Rahmen des Projektes war es das Ziel, die nFK flächendeckend für hessische Waldstandorte abzuleiten. Hierfür wurden verschiedene Ansätze betrachtet. Neben einer komplexeren räumlichen Modellierung auf Basis verorteter Bodenprofile wurde auch die Ableitung aus der Bodenkarte (BFD50, HLNUG, 2018) sowie die direkte Zuordnung der nFK-Richtwerte gemäß HAFEA für terrestrische Standorte geprüft. Die Güte der Regionalisierungsansätze wurde anhand der Bodenprofile der zweiten Bodenzustandserhebung im Wald für Hessen (BZE II, Paar *et al.*, 2016) validiert. Eine ausführlichere Beschreibung der methodischen Ansätze zur nFK-Regionalisierung ist in Ahrends *et al.* (2023) enthalten.

Material und Methoden

Die Basis für die räumliche Modellierung der nFK stellen mehr als 4.000 verortete Bodenprofile aus Hessen dar. Diese stammen überwiegend aus der forstlichen Standortkartierung im hessischen Landeswald sowie weiteren Erhebungen des Umweltmonitorings und diversen Forschungsprojekten der NW-FVA. Für jedes Bodenprofil wurde die nFK nach der PTF von Puhlmann und von Wilpert (2011) für 1 Meter Bodentiefe berechnet. Bei stärker sandig geprägten Bodenarten wurden die Kennwerte gemäß DIN4220 verwendet (von Wilpert *et al.*, 2016).

Für die flächenhafte Übertragung der punktbezogenen nFK-Werte wurde ein generalisiertes additives Modell (GAM) aus dem R-Paket „mgcv“ (Wood, 2017) verwendet. In Anlehnung an die Methodik von Overbeck *et al.* (2011) wurden für die Schätzung die flächenhaft verfügbaren Informationen zum Wasserhaushalt (hier Geländewasserhaushaltsstufen, GWHS) und zum Substrat herangezogen. Da in der hessischen Standortkarte keine Substratinformationen

verschlüsselt sind, wurden diese aus der BFD50 abgeleitet. Hierbei wurden über die bodenkundlichen Informationen Substratgruppen (SUB) nach den Kriterien der BZE II generiert (Paar *et al.*, 2016). Zusätzlich ermöglicht der Modellansatz eine Berücksichtigung der räumlichen Autokorrelation über die Koordinaten.

Bei der Modellbildung wurden unterschiedliche Ansätze angewendet, wobei die räumliche Autokorrelation immer berücksichtigt wurde. Für die einfachen Modelle wurden GWHS und SUB separat betrachtet. Als erweiterte Modelle sind jene zu verstehen, bei denen die GWHS und SUB kombiniert aufgenommen wurden. Hierbei wurden beide Kovariablen zunächst additiv in das Modell aufgenommen, im zweiten Schritt als zusammengeführte Information (z.B. frische Buntsandstein-Standorte). Letztere Herangehensweise erforderte eine strengere Zusammenfassung der einzelnen Ausprägungen, um eine vertretbare Besetzung der Modellgruppen zu gewährleisten und damit auch fachlich plausible und stabile Modelleffekte zu erhalten.

Die Beurteilung der Modelle erfolgte anhand verschiedener statistischer Gütemaße. Neben dem Bestimmtheitsmaß (R_{adj}^2), wurden auch das Akaike-Informationskriterium (AIC), der mittlere Quadratsummenfehler (RMSE) und der absolute mittlere Fehler (MAE) sowie die Verzerrung um den Mittelwert (Bias) verwendet. Des Weiteren wurden die parametrisierten Modelle mit einer 10-fachen Kreuzvalidierung mit Hilfe des R-Pakets „cv-Tools“ (Alfons, 2012) auf Stabilität überprüft.

Als weitere Überprüfungsmöglichkeit wurden die nFK-Richtwerte für terrestrische GWHS gemäß HAFEA und die abgeleitete nFK aus der BFD50 herangezogen. Als unabhängige Validierungsgrundlage für die Regionalisierungsansätze wurden die Profile der BZE II verwendet. Sowohl für die Ableitung anhand der BFD50 sowie den BZE II-Profilen wurden die nFK ebenfalls nach Puhmann und von Wilpert (2011) berechnet.

Ergebnisse

Die statistischen Kenngrößen der parametrisierten Modelle sind in Tabelle 4 dargestellt. Die besten Gütemaße weist das Modell unter Verwendung der Kombination aus GWHS (kartierte und geschätzte; s. Kapitel 3.2.2) und SUB auf. Die Modelle, bei denen die GWHS und SUB getrennt betrachtet wurden, sind indes statistisch geringwertiger. Es zeigt sich aber, dass die GWHS einen deutlich höheren Erklärungsgrad aufweisen als die SUB. Auch bei den erweiterten Modellen ist die GWHS die erklärende Faktorvariable, die SUB besitzen nur einen geringen Einfluss.

Tab. 4: Statistische Kenngrößen der parametrisierten GAMs zur Schätzung der nutzbaren Feldkapazität (nFK) für 1 m Profiltiefe aus 4042 Datenpunkten (AIC: Akaike-Informationskriterium; R_{adj}^2 : adjustierte Bestimmtheitsmaß; RMSE: mittlerer Quadratsummenfehler; MAE: mittlere absoluter Fehler; n : Anzahl der berücksichtigten Bodenprofile; HW_i : Hochwert des Profils _{i} ; RW_i : Rechtswert des Profils _{i} ; β : Regressionskoeffizient; f : glättende Funktion; ε_i : ein unabhängiger und normal verteilter Restfehler mit $\varepsilon_i \sim N(0, \sigma^2)$).

| Modellformulierung | AIC | R_{adj}^2 | RMSE [mm] | MAE [mm] |
|--|--------|-------------|--------------|-------------|
| $nFK_i = \beta_0 + GWHS_i\beta_1 + f_1(RW_i, HW_i) + \varepsilon_i$ | 40.675 | 0,25 | 36,7 | 29,3 |
| $nFK_i = \beta_0 + SUB_i\beta_1 + f_1(RW_i, HW_i) + \varepsilon_i$ | 41.103 | 0,17 | 38,7 | 31,0 |
| $nFK_i = \beta_0 + GWHS_i\beta_1 + SUB_i\beta_2 + f_1(RW_i, HW_i) + \varepsilon_i$ | 40.532 | 0,28 | 36,1 | 28,8 |
| $nFK_i = \beta_0 + GWHS_SUB_i\beta_1 + f_1(RW_i, HW_i) + \varepsilon_i$ | 40.471 | 0,29 | 35,6 | 28,3 |

Die Fehler (RMSE, MAE) in der Kreuzvalidierung sind vergleichbar mit jenen, die am Parametrisierungsdatensatz ermittelt wurden (Tab. 5). Auch ist bei keinem eine systematische Verzerrung um den Mittelwert (Bias) von der an den Profilen berechneten nFK zu beobachten. Daher sind alle Modelle als stabil zu bewerten. Die besten Gütemaße weist indes wieder das

Modell unter der Verwendung der Kombination aus GWHS und SUB auf (GWHS_SUB). Dieses wurde zusätzlich noch mit den unabhängigen Profilen der BZE II validiert. Dabei sind sowohl RMSE und MAE deutlich geringer als die Ergebnisse der Kreuzvalidierung. Die systematische Abweichung um den Mittelwert (Bias) zu den repräsentativen Profilen der BZE II beträgt lediglich -5,2 mm.

Tab. 5: Statistische Kenngrößen der Modellevaluierung mit einer 10-fachen Kreuzvalidierung und anhand von unabhängigen Bodenprofilen der zweiten Bodenzustandserhebung im Wald (BZE II) (Bias: Verzerrung um den Mittelwert; RMSE: mittlerer Quadratsummenfehler; MAE: mittlere absolute Fehler; \bar{x} arithmetisches Mittel; GWHS: Geländewasserhaushaltsstufen; SUB: Substratgruppen).

| Modell/Variante | Bias [mm] | | | RMSE [mm] | | | MAE [mm] | | |
|-----------------|-----------|-----------|-----|-----------|-----------|------|----------|-----------|------|
| | min | \bar{x} | max | min | \bar{x} | max | min | \bar{x} | max |
| GWHS | -1,9 | 0,0 | 2,4 | 33,8 | 36,7 | 39,6 | 26,9 | 29,3 | 31,7 |
| SUB | -2,5 | 0,0 | 1,7 | 35,8 | 38,7 | 40,6 | 29,0 | 31,0 | 32,2 |
| GWHS + SUB | -2,0 | 0,0 | 2,0 | 33,4 | 36,1 | 38,5 | 26,8 | 28,8 | 30,6 |
| GWHS_SUB | -2,1 | 0,0 | 1,9 | 33,4 | 35,7 | 38,7 | 27,1 | 28,5 | 30,8 |
| BZE II | | -5,2 | | | 30,8 | | | 24,5 | |

Das Modell aus der Kombination von GWHS und SUB (GWHS_SUB) sowie die abgeleitete nFK aus der BFD50 und die direkte Zuordnung der HAFEA Richtwerte für terrestrische Standorte wurden vergleichend der berechneten nFK an den BZE II Profilen gegenübergestellt (Abb. 8). Eine direkte Zuordnung der HAFEA-Richtwerte ist zur Beschreibung der ermittelten Varianz an den BZE-Profilen nicht geeignet ($R^2 = 0,13$, Abb. 8a). Insbesondere bei geringen und hohen nFK-Werten treten größere Abweichungen auf (Abb. 8b). Die Residualanalyse der beiden anderen Methoden (BFD50, GAM) zeigt hingegen deutlich bessere Ergebnisse (Abb. 8d und f). Allerdings neigt auch das GAM bei höheren nFK-Werten zur Unterschätzung, da diese durch die GWHS nur bedingt dargestellt wurden. Insgesamt erklärt das GAM jedoch einen deutlich höheren Anteil der Varianz ($R^2 = 0,31$, Abb. 8e), als die abgeleitete nFK aus der BFD50 ($R^2 = 0,2$, Abb. 8c). Zudem ist die Annäherung der Regressionsgeraden an die 1:1-Linie beim GAM deutlich besser als bei den beiden anderen Methoden.

Diskussion

Die erreichten Gütemaße bei der räumlichen Modellierung der nFK mittels GAM sind vergleichbar zu Studien aus anderen Bundesländern (Fleck *et al.*, 2015; Ahrends *et al.*, 2016). Zwar konnten Overbeck *et al.* (2011) ein deutlich höheres Bestimmtheitsmaß erzielen ($R^2 = 0,785$), hatten aber auch ein deutlich weiteres Spektrum an nFK-Werten – welches zudem durch die Faktorvariablen besser erklärt werden konnte. Insbesondere bei Standorten des Hügellands und Mittelgebirges ist der Zusammenhang zwischen angesprochenen Wasserhaushalt und nFK nicht immer vorhanden, da bei der Feldkartierung weitaus mehr Kriterien berücksichtigt werden, als nur die nFK. Hinzu kommt, dass die nFK-Richtwerte für terrestrische GWHS der HAFEA mitunter sehr hohe Spannweiten aufweisen (z.B. *frisch*: 90 – 150 mm) und sich zudem die Ausweisung der hessischen Standortseinheiten im Gelände primär an der Bodenvegetation orientiert (AK Standortskartierung, 2016). Dies kann zu größeren Unschärfen zwischen der am konkreten Bodenprofil berechneten nFK und der flächenhaft vorliegenden Datengrundlage führen.

Die fehlende Substratinformation in der hessischen Standortskartierung verstärkt das Problem zusätzlich. Substratinformationen verschlüsseln indirekt (z.B. Substratlagerungszahl in Niedersachsen) oder direkt (z.B. Lokalbodenformen im Ostdeutschen Verfahren) bodenphysikalische Kenngrößen, die auch in die Berechnung der nFK eingehen. Für die räumliche Modellierung der nFK würde dies bedeuten, stärker die abhängigen Variablen der nFK eingehen zu lassen und zugleich die aus mehreren Kriterien ausgewiesenen GWHS hinsichtlich der nFK

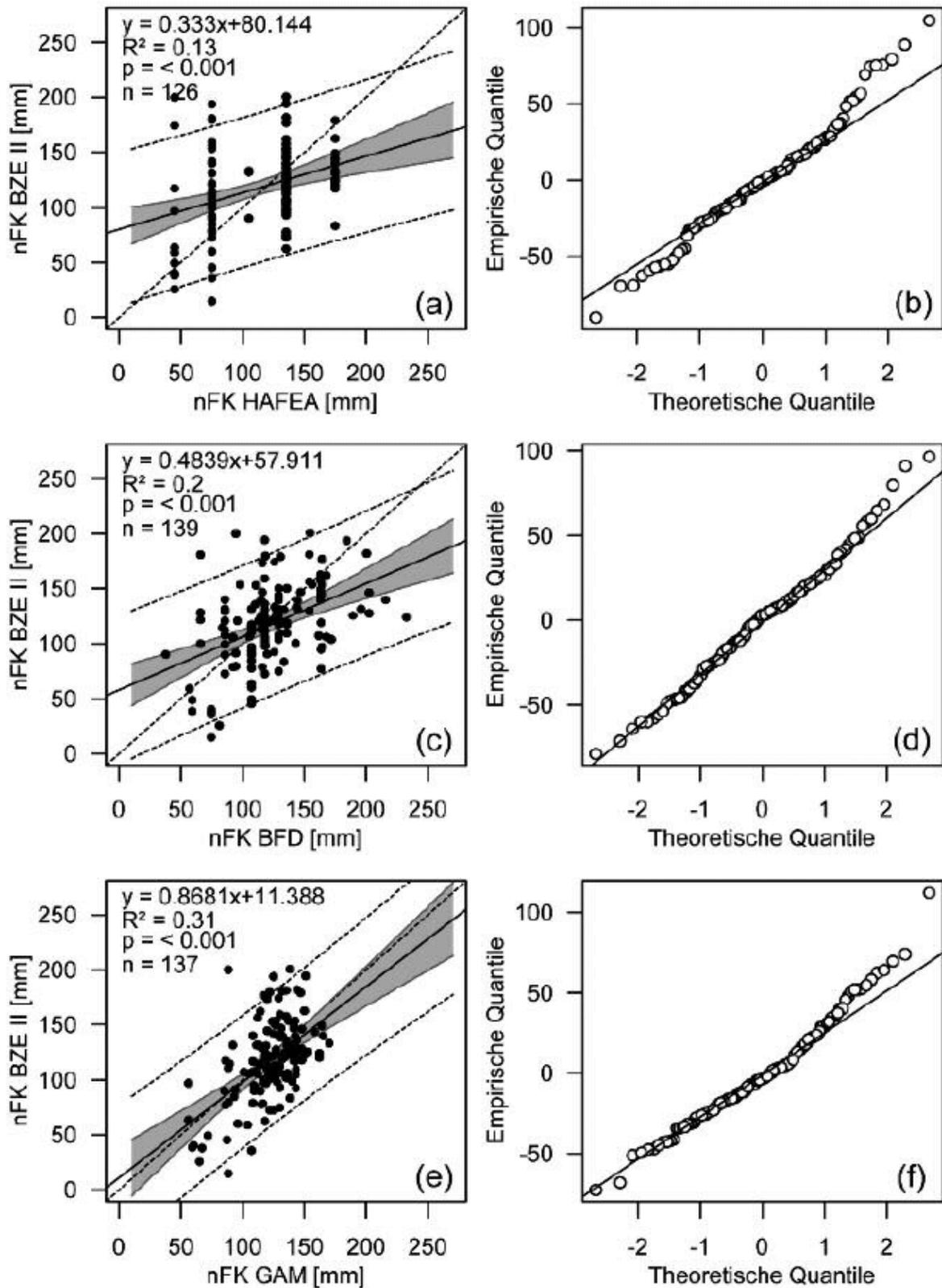


Abb. 8: Beziehung zwischen räumlich abgeschätzter nutzbarer Feldkapazität (nFK) und an Profilen berechneter nFK der zweiten Bodenzustandserhebung im Wald (BZE II) (a: HAFEA, c: BFD50, e: GAM) und Wahrscheinlichkeitsplots (Q-Q-Plot) zur Überprüfung der Residualstruktur (b,d,f). Gepunktete Linie: 1:1, schwarze Linie: Regressionsgerade, der grau schattierte Bereich kennzeichnet das 95% Konfidenzintervall der Regressionsfunktion, gestrichelte Linie: 95% Prognoseintervall.

zu differenzieren. Um dieses Problem etwas zu umgehen, wurde eine Substratinformation aus der BFD50 abgeleitet. An Einzelpunkten entstehen aufgrund unterschiedlicher Maßstäbe und Geometrien jedoch erhebliche Unschärfen und Inkonsistenzen (z.B. trockene Lösslehm-Standorte). Da solche Probleme allerdings direkt in die Modellparametrisierung eingegangen sind, kann es insbesondere in den Randbereichen der nFK-Verteilung dazu kommen, Extremstandorte mit dem Modell nicht hinreichend genau zu beschreiben. In der hessischen Waldbaufibel (Landesbetrieb HessenForst, 1999) ist eine weitere Einstufungshilfe auf Basis von Bodeninformationen hinterlegt, die die GWHS indirekt über Lössanteil, Verlehmungsgrad, Skelettgehalt und Gründigkeit beschreiben. Womöglich sind daher die vergleichsweise besten Gütemaße beim kombinierten Modell (GWHS_SUB, Tab. 5) zu konstatieren. Durch die Kombination beider Faktorvariablen wurde indirekt eine Art *Substratlagerung* nachgebildet, da sich für gleiche Ausgangssubstrate der Bodenaufbau je GWHS unterscheidet. Trotzdem konnte auch über die kombinierten Modellgruppen eine verhältnismäßig hohe Streuung der nFK-Werte festgestellt werden, was zur Schlussfolgerung führt, dass Bodeneigenschaften und die daraus resultierende nFK nachrangig bei der Ausweisung der GWHS betrachtet wurden.

Darüber hinaus führte aber auch die Dominanz der *frischen* GWHS (fast die Hälfte der eingegangenen Bodenprofile) dazu, dass der mittlere nFK-Bereich (ca. 100 – 130 mm) überrepräsentiert wurde und für die Extremen die Besetzung für stabile Modelleffekte fehlten. Die nach HAFEA zulässigen Zwischenstufen der GWHS (z.B. *ziemlich frisch*) wurden zudem weitgehend nicht kartiert, was die Unschärfe zwischen nFK und GWHS weiter verstärkt. Auch wuchsgebietspezifische Unterschiede zwischen nFK und GWHS konnten bei der Auswertung festgestellt werden. Während sich die berechnete nFK für *mäßig frische* Standorte im Reinhardswald nahe an dem Richtwert befand, wurden in der Rhein-Main-Ebene bis zu zwei GWHS – hin zu trockeneren Standorten – übersprungen. Die stärker verlehmteten, tiefgründigen und skelettarmen Sand-Standorte wären nach der nFK als *frisch* einzustufen, wurden aber *mäßig frisch* kartiert. Das heiße und trockene Klima dieser Region wurde gegebenenfalls bei der Kartierung mit einbezogen. Dies verdeutlicht auch der relativ hohe Erklärungsgrad der Wuchsgebiete und -bezirke bei der Schätzung der GWHS für nicht-kartierte Waldstandorte (Kapitel 3.2.2). Sicherlich bilden die GWHS in der hessischen Standortkartierung mehr ab, als nur die nFK. Dieses Beispiel verdeutlicht allerdings einmal mehr, dass bei der Ausweisung der GWHS die Bodeneigenschaften nur untergeordnet eingegangen sind und damit ein engerer Zusammenhang zwischen nFK und GWHS nicht gegeben ist.

Schlussfolgerung und Ausblick

Das kombinierte Modell weist bezüglich der vorgestellten Modelle zur räumlichen Modellierung der nFK für hessische Waldstandorte nicht nur die besten Gütemaße auf, sondern stellt eine deutliche Verbesserung gegenüber der Zuordnung der HAFEA Richtwerte und der Ableitung aus der BFD50 dar. Die starke Generalisierung im *frischen* Spektrum sowie die damit einhergehende Überschätzung geringer nFK-Werte und Unterschätzung hoher nFK-Werte sind sicherlich die Schwächen des Modells. Diese könnten durch die gezielte Anlage weiterer Bodenprofile, die auch einen Zusammenhang zwischen nFK und GWHS aufweisen, in den niedrigen und hohen nFK-Bereichen kurzfristig gemindert werden. Die GWHS stellen zwar keine nFK-Kartierung dar, haben aber mit Abstand den höchsten Erklärungsgrad im Modell. Ferner sollte auch die dauerhafte Etablierung einer Substratinformation in die Forstliche Standortkartierung fokussiert werden. Diese im Feld zu kartieren ist im zeitlichen und finanziellen Kontext sicherlich nicht zielführend. Von daher sollten hier die Möglichkeiten von Regionalisierungsmethoden weiterer Bodeneigenschaften in Kombination mit der Erhebung weiterer Bodenprofile erörtert und eine engeren Zusammenarbeit mit dem Hessischen Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) angestrebt werden. Solche Informationen hätten dann nicht nur für die räumliche Modellierung der nFK einen Mehrwert, sondern würden auch die Dynamisierung der Trophie und des Wasserhaushalts von Waldstandorten verbessern.

3.2.4. Entwicklung der Standortsgemetrien

Für die flächendeckende STOK wurden die drei modellierten Parameter (Trophie, Wasserhaushalt und nFK) in einer gemeinsamen Karte vereinigt. Die Grundlage der Standortsgemetrien (Polygone) dieser Karte ergab sich aus der Verschneidung der Geometrien der BFD50 (Bodenflächendaten), der STOK von HessenForst sowie der aus dem Digitalen Geländemodell (DGM) abgeleiteten Geometrien bei der Wasserhaushaltsmodellierung. Weiterhin sind auch Flächen des ATKIS Datensatzes „Wald“ eingeflossen.

Durch diese Verschneidung sind etliche Kleinstpolygone, sogenannte Splitterpolygone, entstanden. Wenn diese Polygone kleiner als 625 m² waren, wurden diese beseitigt. Dabei gab es zwei Möglichkeiten. Falls die Flächen isoliert vorkamen, dann wurden diese gelöscht. In dem Fall, dass das Splitterpolygon ein oder mehrere Nachbarpolygone angrenzt, wurde dieses mit dem Nachbarpolygon vereinigt, mit welchem es die längste gemeinsame Kante besaß.

Die so generierte Karte bildete die Grundlage für die Entwicklung der Baumarten- und WEZ-Empfehlungen. Durch die regelmäßige kritische Evaluierung der Karte durch HessenForst, den Waldbesitzerverband sowie durch die NW-FVA wurde die Karte im Verlauf des Projektes weiterentwickelt und verbessert. Teilweise mussten dabei auch Polygongrenzen angepasst werden, wenn diese dem Praxistest nicht standhalten konnten. Somit entstand im Verlauf des Projektes eine immer detailliertere und kleinräumigere Karte, die die örtlichen Standortseigenschaften immer besser abbilden kann.

3.2.5. Trophieanpassung im Bereich der STOK von HessenForst

Bei der flächendeckenden Modellierung der Trophie der Waldstandorte Hessens wurden teilweise erhebliche Unterschiede zwischen der modellierten Variante und der Trophieeinschätzung der STOK von HessenForst identifiziert. Für einen beachtlichen Teil der Polygone wurde eine Trophie modelliert, die von der originalen Trophie um mehr als eine der sechs modellierten Stufen (siehe Tab. 1) abweicht. Um den Wert der originalen Standortkartierung im Produkt zu berücksichtigen, musste also ein Algorithmus entwickelt werden, wie mit diesen Unterschieden umzugehen ist.

In enger Absprache mit den Kollegen von HessenForst haben wir uns auf folgendes Vorgehen geeinigt. Für die Polygone, bei welchen die modellierte Trophie nur um eine Klasse von der empirischen Trophie abwich, wird für die neue STOK der Wert der Modellierung übernommen.

Für Polygone, welche eine Abweichung von mehr als einer Klasse zeigten, wurde die empirische Trophie um eine Klasse in Richtung der modellierten Trophie verschoben, da davon auszugehen ist, dass die kleinräumlichere STOK die Realität besser abbildet als die etwas gröbere BFD50 Karte.

Weiterhin wurde festgelegt, dass die Polygone der STOK von HessenForst, welche als „kalk-eutroph“, „eutroph“ und „oligotroph“) klassifiziert wurden, also jene, die der Kartierer recht sicher im Gelände einschätzen kann, auch als solche in der neuen STOK übernommen werden. Dies erfolgte unabhängig davon, welche Trophie an diesem Standort modelliert wurde.

Als letzte Regel wurde festgelegt, dass die modellierten „kalk-eutrophe“ Flächen unverändert in die neue STOK übernommen werden sollen, da hier der Kalkanteil eindeutig aus der BFD50 abgelesen werden kann. Diese Regel wurde jedoch nicht für die STOK 2021 im Hessischen Ried angewendet, da dort sonst zu viele „kalk-eutrophe“ Flächen ausgezeichnet würden. Nach einer Verbesserung der Modellierung der Trophie für die STOK 2023 wurden in diesem Bereich nur noch wenige Flächen „kalk-eutroph“ modelliert, wodurch diese ursprüngliche Regel wieder für den gesamten Bereich der STOK verwendet wurde.

Diese so entwickelten Kartenversionen differenzieren die Polygone der STOK von HessenForst stärker und führen zu einer größeren Anzahl an Polygonen. Außerdem decken die Kartenversionen nun alle Waldstandorte Hessens ab (siehe auch Abb. 10).

3.2.6. STOK Version 2020

Die wichtigste Neuerung der STOK 2020 ist die flächendeckende Modellierung der Standortparameter Trophie, GWHS für alle Waldstandorte Hessens. Jeder Parameter lag in einer eigenen Karte mit unterschiedlichen Polygongrenzen vor, welche grundsätzlich verschieden waren. Beide Karten wurden an der NW-FVA verschnitten und die resultierenden Polygone entsprechend bereinigt (z.B. Löcher und überlappende Polygone entfernen). Für die Zentroide der so entstandenen Polygone wurde jeweils die nFK berechnet. Die so entstandene Karte hat 425.676 Polygone mit einer Gesamtfläche von 890.661 ha. In dieser werden nun alle Waldstandorte Hessens durch Polygone repräsentiert.

Die STOK von HessenForst (Version 2020) hat 144.622 Polygone mit einer Gesamtfläche von 650.186 ha. Von der neuen STOK repräsentieren 291.438 Polygone die Fläche der originalen STOK von HessenForst. Die höhere Anzahl an Polygonen der neuen STOK gegenüber der STOK von HessenForst zeigt bereits, dass eine bessere Differenzierung der Trophie möglich ist.

Für die Berechnung der nFK war es notwendig an allen Flächen die Kategorie der BFD50 („bn_id“) anzuhängen. Danach wurden in der BFD50 Flächen die kleiner als 2500 m² waren sowie Flächen mit einer „bn_id“ = 1020 (Binnensee) entfernt. Die Berechnung der nFK erfolgte für die Zentroide der neuen STOK Polygone. Diese wurden mit dem SAGA-Werkzeug „Polygon centroids“ erstellt. An den Zentroiden wo kein Polygon der BFD50 vorlag wurden die nFK Werte der STOK von HessenForst übernommen („HAFEA“).

Die modellierte Trophie wurde entsprechend Kapitel 3.2.5 angepasst. Dadurch wurden bei 106.573 Polygonen die Trophie geändert. Für Polygone, bei welchen mit Hilfe der Modellierung keine Werte berechnen konnten, wurden die Werte der STOK von HessenForst übernommen. Es blieben jedoch 753 Polygone übrig, für welche auch danach noch keine Trophie angegeben werden konnte. Die Veränderungen gegenüber der STOK von HessenForst sind in Abb. 9 dargestellt.

Bei der Modellierung der GWHS kam es im Bereich der STOK von HessenForst nur zu minimalen Abweichungen. Die modellierte GWHS ist in den meisten Bereichen, wo benachbart Polygone der STOK von HessenForst vorlagen mit deren GWHS konsistent.

3.2.7. STOK Version 2021

Durch die Erfahrungen und Rückmeldungen zur modellierten STOK 2020 wurden im Jahr 2021 einige Verbesserungen in die neue STOK eingepflegt. So wurde die STOK 2020 zusätzlich mit der STOK von HessenForst verschnitten, damit alle Polygongrenzen der empirischen STOK auch in der neuen Karte erhalten bleiben. Dies war notwendig, da vereinzelt zwei ehemalige STOK Polygone mit unterschiedlicher Trophie von einem neuen Polygon abgedeckt worden waren. In solchen Fällen war die Anpassung der Trophie nach Kapitel 3.2.5 nicht eindeutig. Daher konnte an solchen Polygonen eine Abweichung der Trophie um mehr als eine Kategorie von originalen STOK von HessenForst aufweisen.

Die resultierende STOK 2021 wies nun 441.776 Polygone mit einer Gesamtfläche von 897.626 ha auf. Von diesen sind 307.442 Polygone der Fläche der originalen STOK zugeordnet. Durch die Verschneidung mit der originalen STOK besitzt die STOK 2021 16.100 Polygone mehr gegenüber der ehemaligen Verschneidung von 2020. Außerdem sind noch einmal ca.

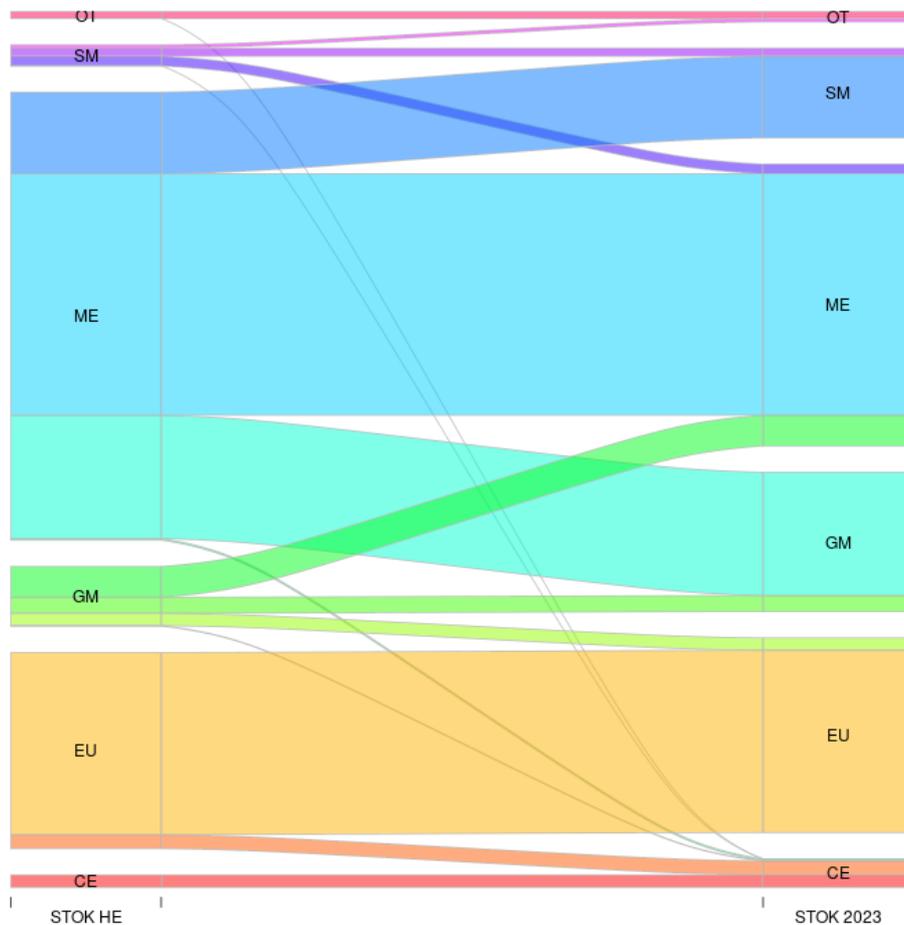


Abb. 9: Sankey Plot für die Veränderung der Trophie Kategorie an den Zentroiden der STOK der NW-FVA von der originalen STOK (links) zu der neuen STOK 2023 (rechts). Die Kategorien entsprechen: CE - kalk-eutroph, EU - eutroph, GM - gut mesotroph, ME - mesotroph, SM - schwach mesotroph und OT - oligotroph.

7.000 ha an Fläche hinzugekommen, da Flächen von HessenForst, die nicht vom ATKIS Layer „Wald“ abgedeckt werden, durch die Verschneidung mit der STOK von HessenForst hinzugekommen sind.

Bei der Anpassung der Trophie sind zwei zusätzliche Regeln zu den im Kapitel 3.2.5 beschriebenen Regeln umgesetzt worden. Erstens werden die zwei extremen Typen von Abweichungen, oligotroph modellierte aber eutroph kartierte sowie eutroph modellierte aber oligotroph kartierte Flächen, auf die empirischen Werte zurück gesetzt. Hier ist davon auszugehen, dass sich diese Kategorien im Gelände gut bestimmen lassen. Außerdem werden zweitens kalk-eutroph kartierte Flächen in der Karte übernommen.

In der STOK 2021 wurden für die Berechnung der nFK die Zentroide mit dem Werkzeug „Point on surface“ in QGIS erstellt. Dieses Werkzeug bestimmt die Zentroide etwas anders als das Werkzeug von SAGA. Eine exakte Abschätzung welches der beiden Werkzeuge besser ist, gibt es nicht. Diese Einschätzung wäre von Polygon zu Polygon unterschiedlich. Für Polygone bei welchen keine nFK berechnet werden konnte, da die BFD50 dort nicht vorlag, wurde die nFK Werte der STOK von HessenForst übernommen.

Zusätzlich wurden in die STOK 2021 Angaben zur klimatischen Wasserbilanz („kwb“), der Standortwasserbilanz („swb“) sowie der Standortwasserbilanzklasse („swbcl“) für die Zeiträume 1981 – 2010 sowie 2041 – 2070 hinzugefügt sowie weitere Spalten („trophie_source“, „nfk_source“) zur Kennzeichnung der Datenquelle der Trophie bzw. der nFK angehängt.

3.2.8. STOK Version 2023

Bei den Anpassungen zur Trophie nach Kapitel 3.2.5

- wurde für 45.004 Polygone eine Trophie modelliert, die von der originalen Trophie um mehr als eine Klasse abwich. Dies entsprach einer Fläche von 87.079 ha.
- Die modellierte Trophie wich in 93.795 Polygonen um nur eine Klasse von der empirischen Trophie ab. Für diese wurde die Trophie der Modellierung übernommen.
- Es gab insgesamt 42.473 Polygone, die mehr als eine Kategorie von der originalen STOK abwichen. Hier wurde die empirische Trophie um eine Stufe in Richtung der modellierten Trophie verschoben. Deren Gesamtfläche beläuft sich auf 80.327 ha.
- Die Regel, dass Polygone, welche in der STOK von HessenForst als „kalk-eutroph“, „eutroph“ bzw. „oligotroph“ klassifiziert wurden, wieder ihre ursprüngliche Trophiestufe erhalten, traf auf 36.310 Polygone zu.
- Für 6.872 Polygone wurde die Trophie auf „kalk-eutroph“ gesetzt, da hier der Kalkanteil eindeutig aus der BFD50 abgelesen werden kann.
- Für 160.158 Polygone stimmte die modellierte Trophie mit der empirischen Trophie überein und konnte so direkt übernommen werden.

Im Ergebnis entstand eine Karte, welche aus 440.826 Polygonen besteht und alle Waldstandorte Hessens mit einer Gesamtfläche von ca. 892.982,5 ha abdeckt. Diese neue Karte zeigt im mittleren Bereich („mesotroph“) der STOK von HessenForst eine deutlichere Differenzierung der Standorte. Exemplarisch sieht man das in der Abbildung 10 für den Spessart.

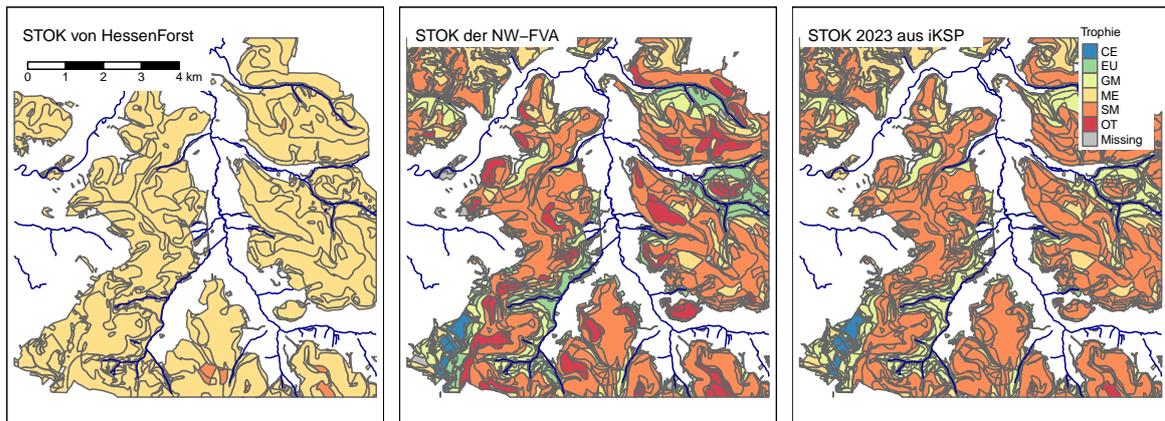


Abb. 10: Veränderung der Trophiezuordnung durch die Modellierung im Spessart südwestlich von Bad Orb. Die Trophie der originalen STOK von HessenForst mit Stand 2020 (links), die modellierte STOK der NW-FVA (Mitte) und die Veränderung in der abschließenden Karte (rechts). Erläuterungen zu den Änderungen siehe Text. Die blauen Linien stellen Wasserläufe dar.

In dieser Version wurden zum ersten Mal auch die Baumarten- und WEZ-Empfehlungen der NW-FVA als Attribute der Karte aufgenommen. Somit wirken sich Änderungen in diesen auch auf die entstehende Karte aus. So konnte durch die Erweiterung des WET-Kataloges um vier neue Typen neue Kombinationen an Baumarten (WEZ 39 „Edellaubbäume-Tanne“ & WEZ 19 „Eiche – wärmeliebend“) als auch kalamitätsbedingte Anpassungen (WEZ 50 R & WEZ 20 R) in die Empfehlungen übernommen werden. Darüber hinaus wurden zahlreiche Änderungen am WEZ- und Baumartenkatalog vorgenommen:

- Eichen-WEZ (10, 14) werden auch auf schwach mesotrophen Standorten empfohlen,

- Berücksichtigung einer Höhengrenze für Eiche ab welcher die Wuchsbedingungen nicht vom Optimum zu stark abweichen,
- Eichenarten werden auf Standorten oberhalb der Eichengrenze maximal als Mischbaumart empfohlen.
- Im WEZ 82 (Lärche-Buche), kann alternativ zur Buche können auch Winterlinde, Hainbuche oder Roteiche als Mischbaumart geplant werden. Dies ermöglicht eine Planung des WEZ auf trockeneren Standorten.

Diese und auch alle weiteren Änderungen können in der „Change-Log“ Datei der Karte auf der Webseite der NW-FVA nachgelesen werden. Die Änderungen sind in enger Zusammenarbeit mit HessenForst entstanden und abgestimmt.

Abschließend wurden nochmals Änderungen an der Trophieeinschätzung der STOK vorgenommen. Durch eine neue Schätzung des Kalkanteils der Standorte bis zu einer maximalen Tiefe von höchstens 90 cm (statt über mehr als 90 cm Tiefe) wurden Löss sowie „kalkeutrophe“ Standorte neu bewertet. Dies führte dazu das betroffene Flächen seltener als eutroph eingeschätzt werden.

3.3. Grundlagen für zukünftige Baumartenempfehlungen

Im Projekt wurden neben der neuen Standortskarte verschiedene Modelle verbessert bzw. neu entwickelt, die zukünftig eine sehr viel umfassendere Beurteilung der Baumarteneignung und darauf basierend eine verbesserte WEZ-Empfehlungen ermöglichen werden. Diese Modelle dienen zur Abschätzung wichtiger biotischer und abiotischer Risiken sowie der Wuchsleistung. Diese sind bisher noch nicht in das DSS integriert, da hierfür erst ein Algorithmus für eine multikriterielle Bewertung entwickelt werden muss. Das Gesamtsystem soll anschließend in Zusammenarbeit mit HessenForst umfassend geprüft werden. Im Folgenden werden die verschiedenen Modellansätze beschrieben.

3.3.1. Standort-Leistungs-Modell

Zur Projektion der Bestandeshöhenentwicklung wurden die an der NW-FVA entwickelten Standort-Leistungsmodelle verwendet. Diese schätzen die Höhe des Grundflächenmittlammes (H_g) unter sich ändernden Umweltbedingungen und liegen für die Baumarten Eiche (*Quercus robur/petraea*), Rotbuche (*Fagus sylvatica*), Gemeine Fichte (*Picea abies*), Weißtanne (*Abies alba*), Douglasie (*Pseudotsuga menziesii*), Waldkiefer (*Pinus sylvestris*) und Europäische Lärche (*Larix decidua*) vor (Schmidt, 2020). Die Modelle lassen sich vereinfacht als standorts- und damit klimasensitive Bonitätsfächer beschreiben.

Zur Parametrisierung wurde ein umfassender, dendrometrischer Datensatz verwendet. Dieser besteht aus den Bundeswaldinventuren 1 – 3 inklusive aller Verdichtungsgebiete, ergänzt um die Landeswaldinventur Brandenburg sowie Landeswald-Betriebsinventuren aus Hessen und Niedersachsen. Die räumliche Abdeckung des Datensatzes ermöglicht eine breite Repräsentation auch seltener Wuchsbedingungen. Für die Modellbildung wurden nur Bäume des Hauptbestandes verwendet. Weiterhin wurden nur Bestände berücksichtigt, deren Alter als homogen angesehen werden können. Grundsätzlich lassen sich mit den Modellen deutschlandweite Schätzungen durchführen, die im Bereich der Trägerländer der NW-FVA aber die größte Genauigkeit aufweisen.

Als Eingangsvariablen, die die Höhenwuchsleistung bestimmen, werden sowohl atmosphärische Größen (Temperatur, Niederschlag und Stickstoffdeposition) als auch die Geländewasserhaushalts-Kategorien und die Trophieeinschätzung länderspezifischer Standortkartierungen (STOK) sowie Lage-Koordinaten verwendet.

Als empirische Basis für die Abschätzung von Temperatur und Niederschlag wurden die Werte der Messstationen des DWD verwendet, diese lagen als Tageswerte vor und wurden zunächst jährlich für die dynamisch bestimmte Vegetationsperiode aufsummiert. Anfang und Ende der Vegetationsperiode wurden nach Menzel (1997) und Nuske (2022) bestimmt. Diese Summen wurden dann mittels generalisierter additiver Modelle (GAM) auf ein deutschlandweites, $50 \times 50 \text{ m}^2$ Raster regionalisiert. Die Stickstoffdeposition wurde basierend auf Daten des Umweltbundesamtes (Schaap *et al.*, 2018) modelliert und lag direkt als jährliche Summe auf einem deutschlandweiten $1 \times 1 \text{ km}^2$ Raster vor, wurde jedoch auch auf $50 \times 50 \text{ m}^2$ interpoliert. Somit liegen die atmosphärischen Daten bundesweit in jährlicher Auflösung auf einem $50 \times 50 \text{ m}^2$ Raster vor. Verfügbar sind rezente Werte für Temperatur und Niederschlag von 1900 – 2022. Für Projektionen stehen ab 2023 – 2100 Werte aus sieben Klimäläufen des ReKliEs-DE Kernensembles für RCP8.5 in gleicher zeitlicher und räumlicher Auflösung zur Verfügung. Die modellierte Stickstoffdeposition liegt von 1800 – 2100 vor. Die atmosphärischen Parameter gehen in Form von Mittelwerten über dem Bestandesleben in die Modelle ein. Dazu wurden die jährlichen Summen über dem jeweiligen spezifischen Bestandesleben gemittelt. Diese dynamische Berechnung in Kombination mit der feinen Auflösung erlaubt eine räumlich und zeitlich differenzierte Beschreibung der Wuchsbedingungen in Abhängigkeit von Standort und Bestandesalter.

Als Basisfunktion des Modells wurde die von von Lappi (1997) modifizierte und linearisierte Wachstumsfunktion von Korf (1939) verwendet, welche durch Schmidt (2020) weiter modifiziert wurde, um Hg -Alters-Beziehungen abzubilden. Durch die Verwendung einer Wachstumsfunktion werden stets plausible Verläufe der Hg -Alters-Beziehungen gewährleistet. Ein weiterer Vorteil dieser Funktion im Speziellen ist ihre Linearität, wodurch ihre Parameter eindeutig bestimmbar sind. Überdies haben ihre Parameter, A und B , eine klare biologische Interpretation: A entspricht der logarithmierten Hg im Alter 100 und B der Differenz der logarithmierten Höhe zwischen den Altern 50 und 100. Hierdurch bekommen auch die zu schätzenden Effekte eine klare Bedeutung und somit eine klare Interpretierbarkeit.

Die Modelle selbst sind als GAM formuliert und liegen für jede Baumart getrennt vor. Hierbei wurden Spline-Effekte für die atmosphärischen Variablen sowie Effekte für die kategorischen Größen der STOK geschätzt. Alle Effekte wurden auf Plausibilität geprüft, ggf. wurde die Flexibilität der Splines reduziert, bis klare und biologisch sinnvolle Verläufe erreicht waren. Die Kategorien der STOK wurden, wo nötig, nach sachlogischen und statistischen Gesichtspunkten gruppiert, bis die resultierenden Muster auch hier eine biologisch sinnvolle Abfolge zeigten. Weiterhin wurde ein stark glättender, zweidimensionaler Effekt für die Koordinaten geschätzt. Letzterer soll vor allem großräumige Einflüsse abbilden, wie die Windschur an der Nordsee.

Sämtliche Modelle lieferten im Mittel erwartungstreue Schätzungen der Hg , jüngere Bestände werden jedoch leicht unterschätzt. Der Standardfehler lag zwischen 2,68 m bei der Kiefer und 3,55 m bei der Tanne. Die Eiche liegt mit 3,17 m im Mittelfeld, während die Buche mit 3,44 m einen höheren Wert aufweist. Fichte und Kiefer liegen mit 2,93 m bzw. 2,85 m im unteren Bereich, die Douglasie bei 3,27 m.

Die große Stärke der Modelle ist die klima- und standortsensitive Schätzung der Hg ohne dass vorherige Höhenmessungen im Bestand notwendig sind. Liegen gemessene Baumhöhen bspw. aus Betriebsinventuren vor ist es möglich, die Schätzungen lokal zu kalibrieren und die Genauigkeit der Schätzungen zu erhöhen. Die Berücksichtigung der Effekte der dynamischen atmosphärischen Variablen ermöglicht damit Schätzungen der Höhenwuchsleistung im Klimawandel. Somit können die künftigen Leistungspotenziale wichtiger Baumarten auch ohne die Annahme der Standortskonstanz projiziert werden.

Zur beispielhaften Visualisierung wurden zwei Hg -Alters-Kurven für die Alter 0 – 150 für den Stadtwald Frankfurt sowie in Gipfelnähe der Wasserkuppe erzeugt (Abb. 11). Um das modellierte Bestandeswachstum unter verschiedenen Umwelteinflüssen darzustellen, wurden

die atmosphärischen Bedingungen in Form von Mittelwerten verschiedener 40-Jahres Perioden aus dem Zeitraum 1900 – 2100 als Wuchsbedingungen vorgegeben. Die STOK wurde auf die jeweils kartierten Werte gesetzt (*wechselfeucht / kalkeutroph* bzw. *mäßig frisch / eutroph*).

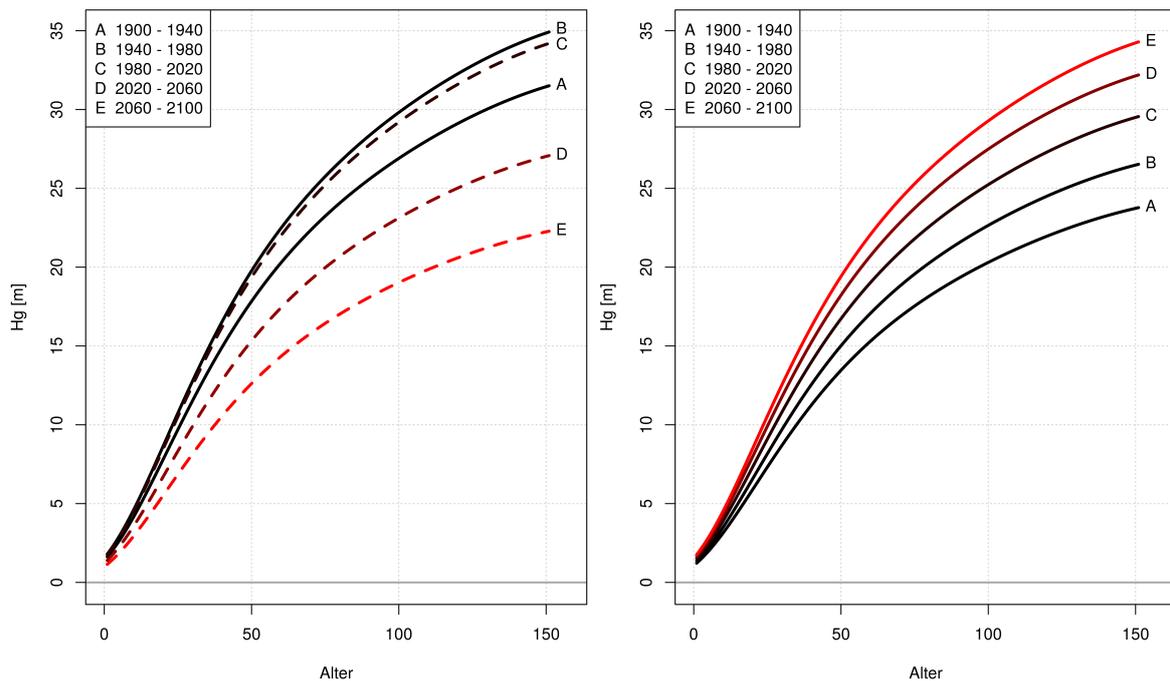


Abb. 11: Exemplarische Hg -Alters-Kurven des Standort-Leistungs-Modells für den Stadtwald Frankfurt (links) sowie die Wasserkuppe (rechts) unter unterschiedlichen klimatischen Bedingungen innerhalb des Zeitraumes 1900 – 2100. Gestrichelte Linien kennzeichnen Verläufe die im Niveau unterhalb des Verlaufes der jeweiligen Vorperiode liegen.

In den Ergebnissen sind und die Auswirkungen auf die Modellschätzungen klar zu erkennen: Die allgemein hohen Temperaturen im Raum Frankfurt führen dazu, dass der Temperaturanstieg lediglich in der zweiten Periode (1940 – 1980) zu einer Erhöhung des Wuchspotentiales führt. In der Periode 1980 – 2020 ist eine Stagnation zu erkennen, danach folgt ein massiver Einbruch durch die stark steigenden Temperaturen und fallenden Niederschläge. Hierbei ist zu beachten, dass die Steigerung zur zweiten Periode maßgeblich auf erhöhte Stickstoffeinträge zurückzuführen ist. Ohne diesen Faktor wäre auch hier kein positiver Effekt erkennbar.

Das rezente und das noch aktuelle Klima der Wasserkuppe weisen Temperatursummen auf, die die Wuchsleistung der Buche stark limitieren. Daher verschieben sich die Hg -Alters-Kurven über den betrachteten Zeitraum kontinuierlich auf höhere Niveaus. Dabei wirkt sich auch die Stickstoffdeposition gegenüber der Periode 1900 – 1940 über den gesamten Zeitraum positiv aus. Die aktuell hohen Niederschläge sinken zwar, erreichen aber noch kein kritisches Niveau, sodass auch für die letzte Periode keine Trendumkehr projiziert wird. Grundsätzlich ist zu beachten, dass in Wachstumsprojektionen von einem Überleben der Bestände ausgegangen wird und für realistische Szenariosimulationen mit Modellen zur Projektion von Ausfallwahrscheinlichkeiten für wichtige Risiken wie Sturm, Trockenheit und Borkenkäfer kombiniert werden müssen.

Aufbauend auf Hg -Alters-Kurven wurden weitere Modelle entwickelt, welche die Entwicklung des Grundflächenmittelstammes (Dg) in Abhängigkeit von geschätzter Hg , Alter und der Höhe über dem Meeresspiegel schätzen. Somit ist auch eine klimasensitive Fortschreibung des Dg ohne initiale Messungen möglich.

Die Standort-Leistungs-Modelle ermöglichen es, bei der klimaangepassten Baumartenwahl die Wuchsleistung als Kriterium mit einzubeziehen. Dafür wurde auf der Waldfläche Hessens ($50 \times 50 \text{ m}^2$ Raster) für jeden Standort die Mittelhöhenbonität im Alter 100 (Hg_{100}) für die eingangs genannten sieben Baumarten projiziert. Dies erfolgte zum einen für das Jahr 2000

(Keimjahr 1900), um die vergangenen Wachstumsbedingungen abzubilden. Zum anderen wurde die zukünftige Wuchsleistung unter fortschreitenden klimatischen Änderungen im Jahr 2100 (Keimjahr 2000) unter Einbeziehung der sieben Klimäläufe des ReKliEs-DE Ensembles des Szenarios RCP8.5 ermittelt. Die Varianz der sieben Projektionen für 2100 wird zukünftig zur Berücksichtigung der Unsicherheit in einem erweiterten DSS zur multikriteriellen Baumartenempfehlung bzw. für die WEZ-Empfehlungen berücksichtigt werden.

3.3.2. Waldbrandrisiko

Methodik und Datengrundlage

Mit zunehmender Klimaerwärmung und steigender Wahrscheinlichkeit von Witterungsexremen ist möglicherweise auch ein steigendes Waldbrandrisiko zu erwarten. Zur Ermittlung der künftigen Gefährdungssituation wurde für die Waldflächen in Hessen der kanadische „forest fire weather index“ (FWI, von Wagner 1987) berechnet. Das Modell gibt auf Tagesbasis verschiedene Indizes aus, wobei der FWI als wichtigste Größe die tägliche Waldbrandgefahr quantifiziert (Abb. 12). Der FWI ist ein international gebräuchlicher Index, der auf physikalisch messbaren Parametern beruht. Er kombiniert Indizes für die Feuchtigkeit von Streu (FFMC), Humusaufgabe (DMC) und tieferen humusreichen Bodenschichten (DC) mit Indikatoren, die die Ausbreitungsbedingungen des Feuers beschreiben (Natural Resources Canada, 2023).

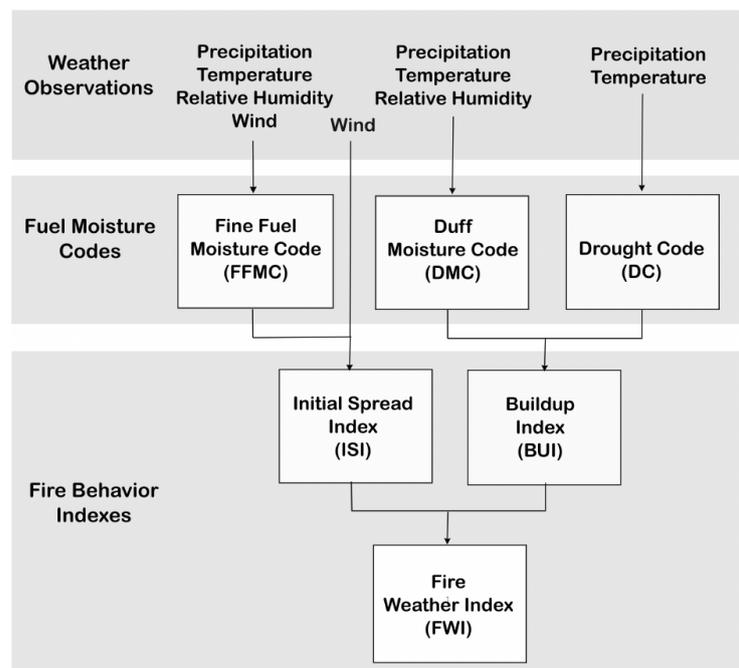


Abb. 12: Komponenten des kanadischen FWI („Forest fire Weather Index“; nach Taylor, 2020).

Der FWI ist ein kumulativer Index, der die Entwicklung der einzelnen Parameter kontinuierlich fort schreibt, und benötigt als Eingangsdaten die tägliche Niederschlagssumme und die Werte von relativer Luftfeuchte, Temperatur und Windgeschwindigkeit jeweils um 13:00 Uhr des betreffenden Tages. Da keine mittäglichen Klimawerte vorlagen, wurden diese aus den verfügbaren Daten Maximumtemperatur (T_{max}), Dampfdruck und Windgeschwindigkeit mit Korrekturfunktionen geschätzt.

Die Temperatur um 13:00 Uhr (T_{13Uhr}) wurde aus einer einfachen linearen Beziehung mit der T_{max} abgeleitet.

$$T_{13Uhr} = 0,982 \cdot T_{max} - 0,569$$

Zur Schätzung der relativen Luftfeuchte um 13 Uhr wurden zunächst jeweils die Sättigungsdampfdrücke bei T_{13Uhr} und der Tagesmitteltemperatur (T_{mean}) abgeleitet (Allen *et al.*, 1998).

$$e_s = 0,6108 \cdot e^{\left(17,27 \frac{t}{237,3+T}\right)}$$

Der mittlere tatsächliche Dampfdruck eines Tages $e_a(T_{mean})$ ergibt sich dann aus dem Sättigungsdampfdruck bei Tagesmitteltemperatur $e_s(T_{mean})$ multipliziert mit der mittleren Luftfeuchte $RH_{T_{mean}}$ des betreffenden Tages.

$$e_a(T_{mean}) = e_s(T_{mean}) \frac{RH_{T_{mean}}}{100}$$

Eine geschätzte relative Feuchte um 13 Uhr $RH_{T_{13Uhr_g}}$ ergibt sich nun durch.

$$RH_{T_{13Uhr_g}} = \frac{e_a(T_{mean})}{e_s(T_{13Uhr})} 100$$

Am Kalibrierungsdatensatz wurde ein exponentielles Modell zwischen $RH_{T_{13Uhr_g}}$ und der tatsächlichen relativen Luftfeuchte um 13 Uhr geschätzt.

$$RH_{T_{13Uhr}} = 1653,36 e^{0,00064 \cdot RH_{T_{13Uhr_g}} - 1658,58}$$

Eine weitere lineare Beziehung wurde zwischen der mittleren Windgeschwindigkeit (Wind) und der Windgeschwindigkeit um 13 Uhr abgeleitet.

$$Wind_{13Uhr} = 0,982 \cdot Wind - 0,569$$

In der Europäischen Union wird der kanadische Waldbrandindex seit 2007 verwendet, um eine europaweit einheitliche Abschätzung der Waldbrandgefahren zu erhalten (San-Miguel-Ayanz *et al.*, 2012; EFFIS, 2023). der FWI in Gefahrenklassen (FDC) umgewandelt (Tab. 6).

Tab. 6: In der EU verwendete einheitliche Gefahrenklassen (FDC) und entsprechender FWI (EFFIS, 2023)

| FDC | Bedeutung | FWI |
|-----|--------------|-------------|
| 1 | sehr niedrig | < 5,2 |
| 2 | niedrig | 5,2 – 11,2 |
| 3 | moderat | 11,2 – 21,3 |
| 4 | hoch | 21,3 – 38,0 |
| 5 | sehr hoch | 38,0 – 50,0 |
| 6 | extrem | ≥ 50,0 |

Die Berechnung des FWI erfolgte sowohl mit den retrospektiven Daten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) als auch mit den Ergebnissen des Klimaszenarios RCP8.5 des IPCC. Auf Grundlage des ReKliEs-DE Projektvorhabens (Regionale Klimaprojektionen Ensemble für Deutschland) stehen für Deutschland umfassende Ensembles regionaler Klimaprojektionen der aktuellen RCP-Szenarien in einer hohen räumlichen Auflösung zur Verfügung (Hübener *et al.*, 2017). Die Daten wurden für verschiedene Klimavariablen nach einem einheitlichen Format ausgewertet und aufbereitet. Aus dem Gesamtensemble mit 26 verschiedenen Modellkombinationen für das RCP8.5 Szenario („weiter-wie-bisher“) wurde für Anwender von Wirkmodellen im Rahmen des Bund-Länder-Fachgespräches ein sogenanntes Kernensemble

ausgewählt, dass nach vorgegebenen Qualitätskriterien die Bandbreite des Gesamtensembles repräsentiert (Tab. 7) (Dalelane *et al.*, 2018). Die Ergebnisse des RCP8.5 Ensembles werden für die Berechnung des zukünftigen Waldbrandrisikos herangezogen, da dieses aufgrund der aktuellen Emissionsentwicklung die maximalen Anpassungserfordernisse für die forstliche Planung bedingt.

Tab. 7: Ausgewertete Simulationen des ReKliEs-DE Kernensembles. GCM = Global Climate Model, RCM = Regional Climate Model

| GCM-Name | RCM-Name | Abkürzung |
|-----------|----------|-----------------|
| ECEARTH12 | RACMO | ECEARTH12_RACMO |
| MIROC5 | CCLM | MIROC5_CCLM |
| HadGEM2 | WRF | HadGEM2_WRF |
| MPIESM | CCLM | MPIESM_CCLM |
| MPIESM | WRF | MPIESM_WRF |
| HadGEM2 | WR13 | HadGEM2_WR13 |
| MPIESM | WR13 | MPIESM_WR13 |

Ergebnisse

Im Weiteren wird nur auf Ergebnisse der FWI Berechnung mit retrospektiven Daten und mit dem Klimaszenario RCP8.5 eingegangen. Insgesamt zeigen sich bei den meisten Klimamodellen des Kernensembles sehr ähnliche Schätzungen des Waldbrandrisikos für die Vergangenheit im Vergleich zu den Ergebnissen der DWD-Messdaten (Abb. 13). Allerdings fällt auf, dass die Modellkombinationen ‘hadgem_wrf’ und ‘miroc5_cclm’ ein deutlich erhöhtes Waldbrandrisiko für die Periode 1981 – 2010 schätzen. Hier kann nicht ausgeschlossen werden, dass die Eingangsdaten mit Fehlern behaftet sind. Vermutlich betrifft das hauptsächlich den Dampfdruck, da für diese beiden Modellkombinationen auch das Dampfdrucksättigungsdefizit im Vergleich deutlich erhöht ist. Beide Modelle wurden für die Abschätzung des zukünftigen Waldbrandrisikos nicht berücksichtigt, da auch bis zum Ende des Jahrhunderts die Anzahl der Tage mit einem hohen bis extremen Waldbrandrisiko deutlich über den Ergebnissen der anderen Modelle liegt.

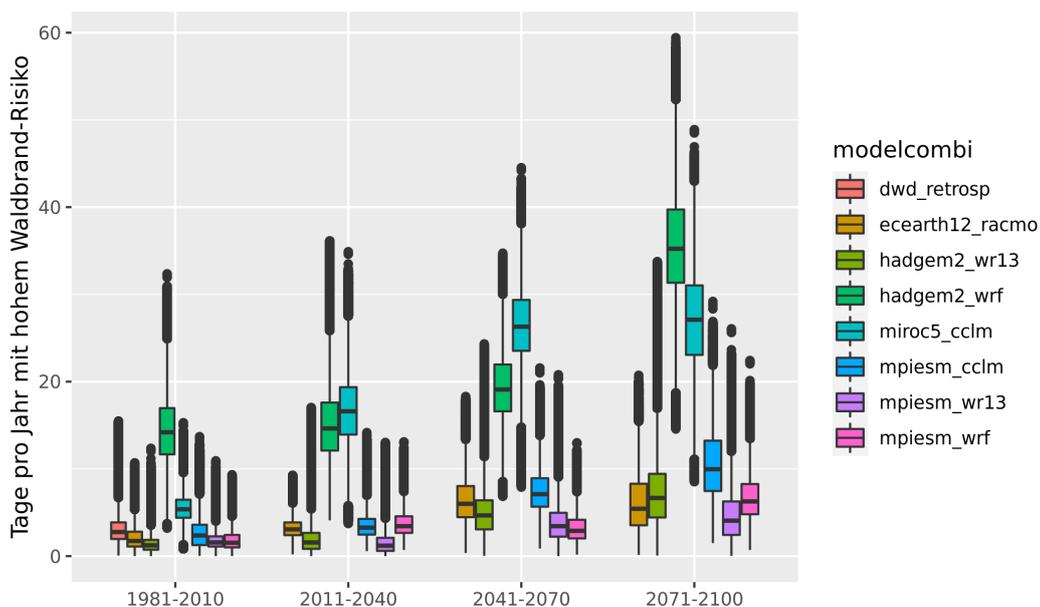


Abb. 13: Mittlere Anzahl der Tage im Jahr mit einem hohem Waldbrandrisiko für die Waldflächen in Hessen.

Unter den klimatischen Verhältnissen der Periode 1981 – 2010 ist das Waldbrandrisiko im Mittel in Hessen gering. Die Anzahl der Tage mit einem hohem bis extremen Waldbrandrisiko betragen deutlich weniger als 10 Tage im Jahr. In der Periode 2011 – 2040 wird sich das Waldbrandrisiko nach den betrachteten fünf Klimäläufen nur geringfügig erhöhen (Abb. 13). Ein Anstieg der Häufigkeit des Auftretens der gezeigten Gefährdungsklassen ist ab der Periode 2041 bis 2070 sichtbar. Im Mittel verdoppelt sich die Anzahl der Tage mit hohem bis extremen Risiko. Für einzelne Waldstandorte werden im dreißigjährigen Mittel mehr als 20 Tage berechnet. Zum Ende des Jahrhunderts (Periode 2071 – 2100) erhöht sich in allen Modellläufen das Gefährdungspotenzial nochmals leicht und erreicht in den besonders betroffenen Regionen von Hessen teilweise mehr als 30 Tage im Jahr mit hoher bis extremer Waldbrandgefährdung.

Weil das Waldbrandrisiko keineswegs über Hessen homogen verteilt ist, wurde das Waldbrandrisiko räumlich dargestellt. Im Rhein-Main-Gebiet und in der Wetterau zeichnen sich schon in der Vergangenheit Gebiete mit einer Häufung von Tagen mit moderatem (nicht gezeigt) und hohem Waldbrandrisiko ab (Abb. 14).

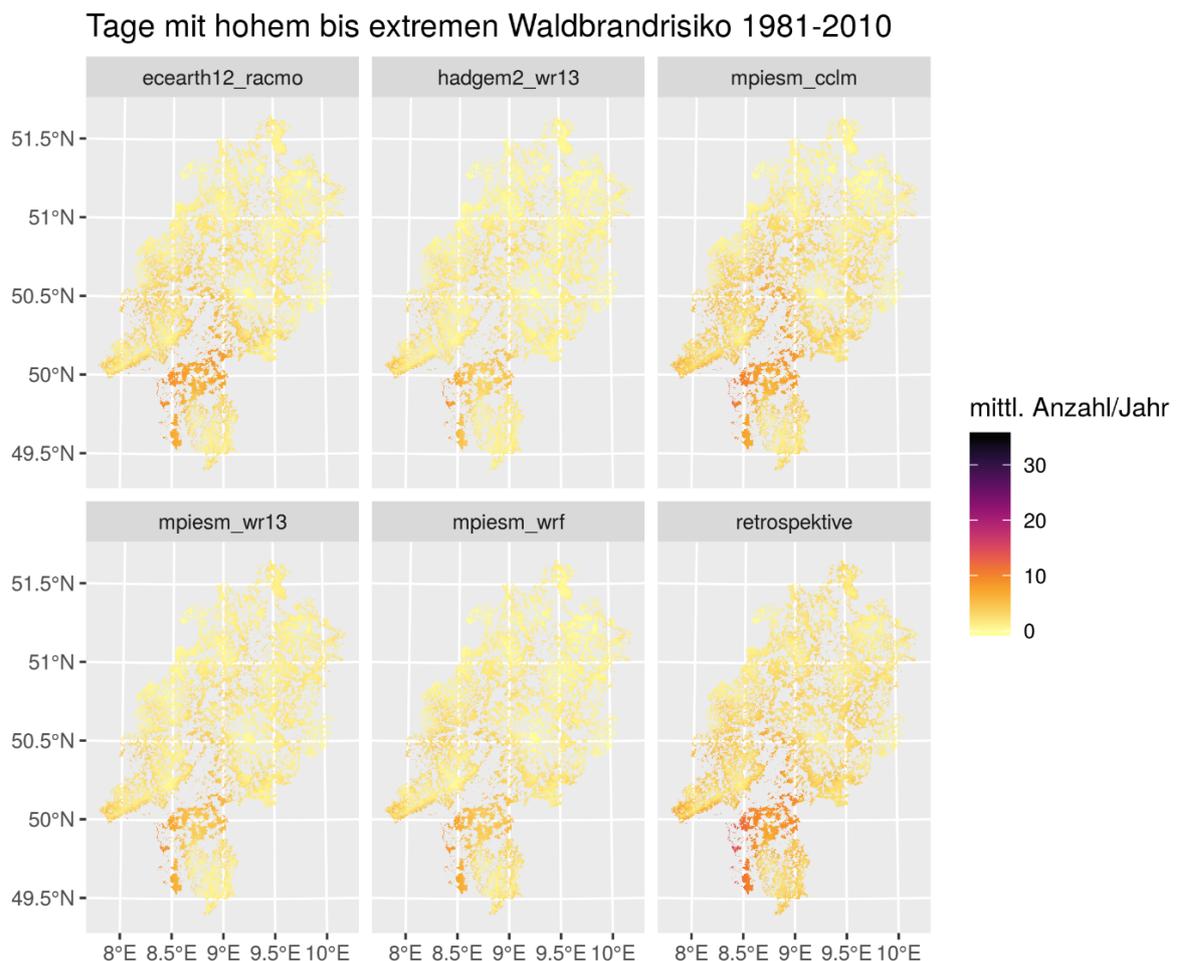


Abb. 14: Mittleres Waldbrandrisiko für die Periode 1981 – 2010 für die Waldflächen in Hessen.

Die bewaldeten Mittelgebirgsregionen in Hessen weisen dagegen in der Periode 1981 bis 2010 nur ein sehr geringes Risiko auf. Diese räumliche Verteilung bleibt nach den Modellergebnissen auch in Zukunft erhalten. Ab 2071 nimmt die Waldbrandgefahr unter den betrachteten Klimaszenarien im südlichen Hessen auf durchschnittlich 30 – 40 Tagen im Jahr zu (Abb. 15). Besonders das Modell „hadgem2_wr13“ rechnet für das Rhein-Main-Gebiet mit einer deutlichen Verschärfung der Waldbrandsituation. Auch die Mittelgebirgsregionen sind zukünftig einem deutlich höherem Waldbrandrisiko ausgesetzt.

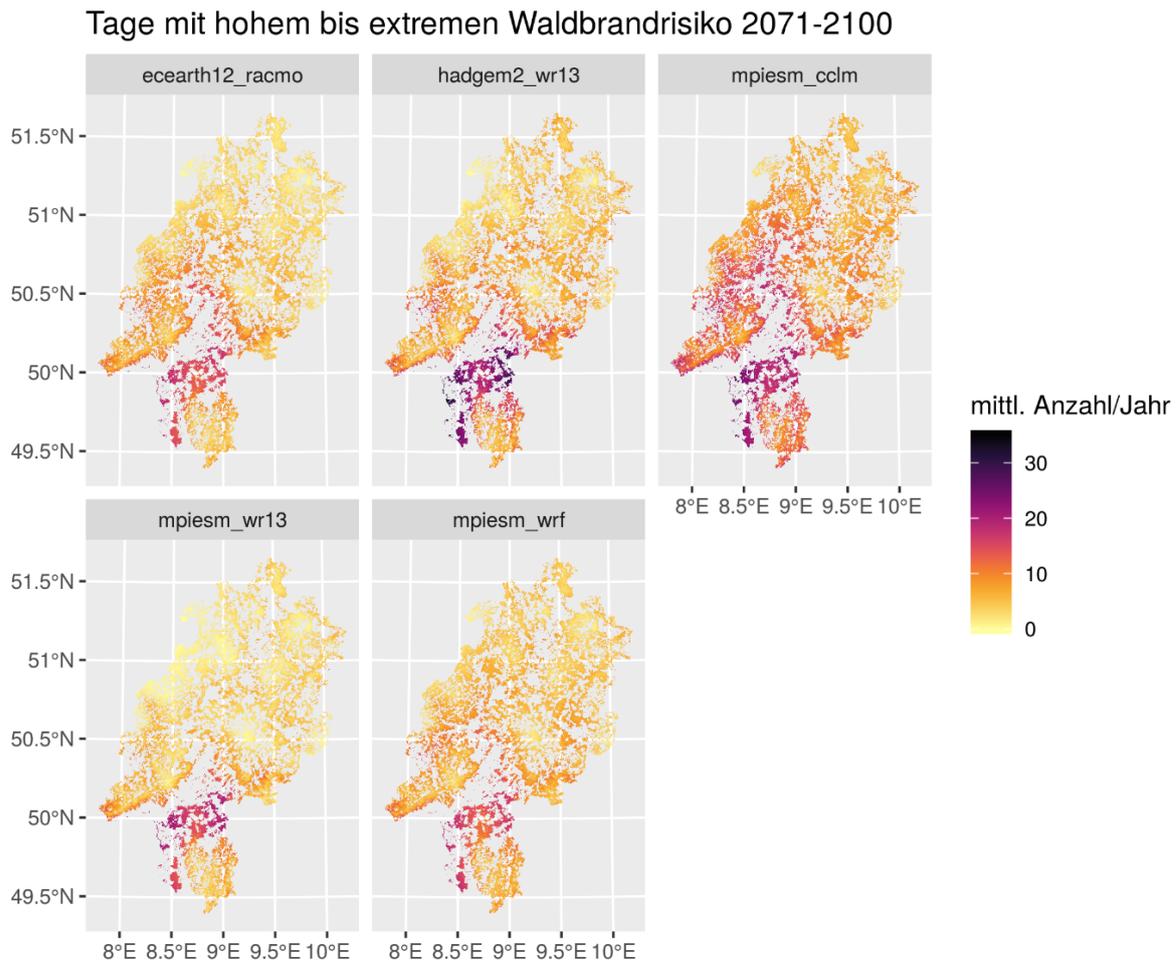


Abb. 15: Mittleres Waldbrandrisiko für die Periode 2071 – 2100 für die Waldflächen in Hessen.

Die untersuchten Klimalläufe des RCP8.5 Szenarios zeigen bei fünf von sieben Projektionen eine gute Abbildung der Waldbrandgefährdung in Hessen im Vergleich zur Abschätzung anhand von Beobachtungsdaten des DWD für die Periode 1981 – 2010. Deshalb wird bei diesen fünf Modellen auch für die Zukunft eine plausible Abschätzung des Waldbrandrisikos erwartet.

Die Einschätzung des Waldbrandrisikos anhand des FWI basiert auf der mittleren Anzahl an Tagen mit einer hohen bis extremen Gefährdung im Jahr. In einzelnen Trockenjahren kann die Anzahl der Tage deutlich über den Mittelwerten liegen. Die letzten Jahre haben gezeigt, dass insbesondere extreme und lang anhaltende Trockenperioden zu einer Verschärfung der Waldbrandgefährdung führen. Ob extreme Trockenperioden in Zukunft häufiger und länger auftreten werden, wurde hier jedoch nicht explizit untersucht.

3.3.3. Biotische Risiken

Der Schwerpunkt im Bereich der Modellierung von biotischen Risiken lag auf der Weiterentwicklung eines Modells zur Abschätzung der Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Kalamitätsholz (*WaKaHo*) aufgrund von Borkenkäfern bei der Fichte (Overbeck & Schmidt, 2012). Datengrundlage waren wie im Ausgangsmodell Forsteinrichtungsdaten, Daten der Holzeinschlagsverbuchung sowie Witterungs- und Geländeparameter. Vorarbeiten erfolgten teilweise auch im Rahmen des durch den Waldklimafonds geförderten Projektes DSS-Riskman (FKZ: 22WB401501). Die Weiterentwicklung betrifft zum einen die regionale und zeitliche Erweiterung der Parametrisierungsgrundlage. Diese wurde auf den gesamten Berglandbereich

der Trägerländer der NW-FVA ausgedehnt und der erfasste Zeitraum umfasst jetzt das Intervall 1999 – 2017. Das ursprüngliche Modell von Overbeck und Schmidt (2012) war nur mit Daten aus dem niedersächsischen Harz aus dem Zeitraum 1999 – 2010 parametrisiert worden. Durch die Erweiterung wird eine größere Bandbreite klimatischer Bedingungen erfasst und eine verbesserte Allgemeingültigkeit bei der Anwendung (in Hessen) im Klimawandel erreicht. Eine weitere wichtige Verbesserung besteht in der zeitlichen Auflösung, für die das Auftreten von Kalamitätsholz analysiert und projiziert wird. Während das ursprüngliche Modell (Overbeck & Schmidt, 2012) eine zeitliche Auflösung von 10 Jahren hatte, wird im aktuellen Modell eine 1-jährige Auftretenswahrscheinlichkeit modelliert. Diese höhere Auflösung ermöglicht damit die Berücksichtigung von Witterungsparametern einzelner Jahre und resultiert in einer deutlich erhöhten Kausalität und Genauigkeit bei der Projektion der *WaKaHo*.

Signifikante und relevante Einflussgrößen in diesem Modell sind:

- der Grundflächenmittelstamm (Dg) der Fichte im Hauptbestand
- der Mischungsanteil der Fichte im Bestand
- die topographische Exposition eines Bestandes im Segment zwischen Südwest und Südost
- das Auftreten von Käfer- bzw. Sturmschadholz im Vorjahr der Holzverbuchung
- die Temperatursumme in der Vegetationszeit der Fichte im Bezugsjahr der Holzverbuchung ($Tempsum_Veg$)
- die Temperatursumme in der Vegetationszeit der Fichte im Vorjahr der Holzverbuchung als Abweichung gegenüber dem langjährigen Mittelwert der Klimareferenzperiode 1991 – 2020 ($Abw_Tempsum_Veg_Vorjahr$)
- die Niederschlagssumme in der Vegetationszeit der Fichte im Bezugsjahr der Holzverbuchung ($Niederschlagssum_Veg$)
- die Niederschlagssumme in der Vegetationszeit der Fichte im Vorjahr der Holzverbuchung als Abweichung gegenüber dem langjährigen Mittelwert der Klimareferenzperiode 1991 – 2020 ($Abw_Niederschlagssum_Veg_Vorjahr$)

Diese wurden für die Modellanwendung entsprechend quantifiziert (Abb. 16 und 17). Das zugrundeliegende Modell berücksichtigt somit sowohl Bestandes- als auch Witterungsparameter sowie Vorschädigungen und die Topographie. Die Witterungsparameter wurden für dynamische Vegetationsperioden unter Berücksichtigung des spezifischen Temperaturverlaufes des jeweiligen Jahres in Abhängigkeit von der geographischen Lage und der Höhe über dem Meeresspiegel regionalisiert. Für die Temperatursummenwerte erfolgte anschließend eine Strahlungskorrektur in Abhängigkeit von der Himmelsrichtung und Hangneigung.

Um die Korrelation aufgrund des Höhengradienten zwischen den Temperatur- bzw. Niederschlagssummen im Bezugs- und Vorjahr zu reduzieren, wurden die Vorjahreswerte trendbereinigt, in dem die Differenzen gegenüber den langjährigen Mittelwerten der Klimareferenzperiode 1991 – 2020 berechnet wurden: $Abw_Tempsum_Veg_Vorjahr$ und $Abw_Niederschlagssum_Veg_Vorjahr$.

Die bei der Modellierung teilweise auftretenden, geringfügigen Abweichungen von monotonen Effektverläufen wurden durch Vorgabe von Nebenbedingungen bereinigt, wenn sie aus Expertensicht als unplausibel beurteilt wurden. Hier werden nur die finalen Effektverläufe mit Vorgabe der Monotoniebedingungen dargestellt (Abb. 16 und 17).

Der Effekt des Dg ist monoton steigend, wobei ab ca. 45 cm keine weitere Zunahme erfolgt (Abb. 16 A). Damit steigt die *WaKaHo* mit steigendem Dg bei sonst konstanten Bedingungen bis zu einem Wert von ca. 45 cm an und bleibt dann konstant. Der Verlauf kann als plausibel beurteilt werden, da der Dg indirekt beschreibt, inwieweit die vom Buchdrucker

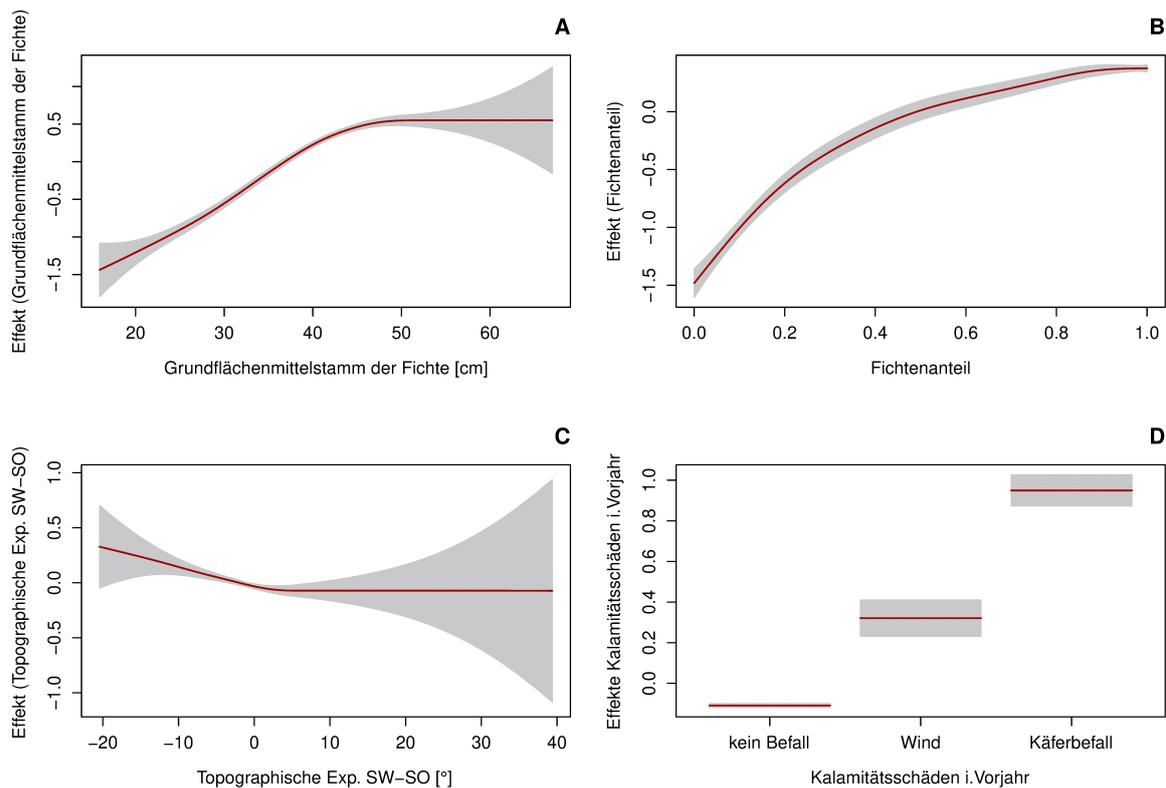


Abb. 16: Modelleffekte von Bestandesparametern (A/B), der Topographie (C) sowie von Vorschädigungen durch Borkenkäfer und Stürme (D) auf die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Kalamitätsholz durch Borkenkäfer bei der Fichte.

– als wichtigstem Borkenkäfer – benötigte Rindenstärke erreicht ist. Zusätzlich wird über den *Dg* erfasst, ob sich ein Bestand potentiell noch in der Durchforstungs- oder bereits in der Erntephase befindet, was ebenfalls Einfluss auf das Befallsrisiko hat. Erntemaßnahmen erhöhen die *WaKaHo* tendenziell, da aufgrund der stärkeren Absenkung der Bestandesgrundfläche höhere Temperaturen im Bestand resultieren.

Der Effekt des Mischungsanteils der Fichte ist über den gesamten Bereich monoton ansteigend, wobei der Gradient mit zunehmendem Fichtenanteil abnimmt (Abb. 16 B). Der Verlauf kann als plausibel beurteilt werden, da bei sonst konstanten Bedingungen die *WaKaHo* umso höher ist, je der höher der Fichtenanteil ist. Als Ursache für die positive Wirkungen von Mischbeständen werden in diesem Zusammenhang ein höherer Harzfluss der Fichte (Baier *et al.*, 2002), die maskierende Wirkungen durch volatile Pflanzeninhaltsstoffe insbesondere der Laubholzarten (Zhang *et al.*, 1999) und grundsätzlich bessere Standortsbedingungen (Wermelinger, 2004) genannt. Eine besonders hohe Wirkung wird dann erzielt, wenn die Fichte nur als Mischbaumart angebaut wird. Ab einem Anteil von ca. 0,4 lässt die Wirkung der Mischung mit weiter steigendem Fichtenanteil deutlich nach (Abb. 16 B).

Bestände, die in Richtung Südwest bis Südost exponiert sind, weisen bei sonst gleichen Bedingungen eine höhere *WaKaHo* auf, wobei der Effekt relativ schwach ist und keine Unterschiede zwischen ebenen und schattigen Lagen auftreten (Abb. 16 C). Der hier verwendete Exponiertheitsindex kennzeichnet exponierte Standorte durch negative Werte, ebene Lagen durch Werte um 0 und Schattlagen durch Werte größer 0. Die Exponiertheit bzw. Verschattung ist umso größer, je höher der Betrag des Index ist. Der Exponiertheitsindex wurde auf einem 50×50 m² Raster berechnet und anschließend wurde der Wert der höchsten Exponiertheit innerhalb einer Buchungseinheit für die Modellierung verwendet. Die Exponiertheit in Richtung Südwest bis Südost beschreibt indirekt eine erhöhte Globalstrahlung und damit Temperatur, die zu günstigeren Bedingungen für die Entwicklung von Borkenkäfern und tendenziell zu

einer erhöhten Trockenstressgefährdung der Fichte führt. Der Modelleffekt kann somit als grundsätzlich plausibel beurteilt werden. Die vergleichsweise geringe Sensitivität des Effektes kann darauf zurückzuführen sein, dass die geographische Genauigkeit der Verbuchung des Holzeinschlages für eine differenziertere Ableitung von Geländeeffekten zu gering ist.

Sind in einem Bestand im Vorjahr Kalamitätsnutzungen verbucht worden, so erhöht sich die *WaKaHo* im Folgejahr (Abb. 16 D). Dabei wirken sich Vorschädigungen durch Borkenkäfer ungünstiger aus als Sturmschäden. Der starke Zusammenhang von Borkenkäferschäden zu vorgelagerten Sturm- und Borkenkäferschäden wird durch verschiedene Untersuchungen bestätigt (Stadelmann, Bugmann, Meier *et al.*, 2013; Stadelmann, Bugmann, Wermelinger *et al.*, 2013; Marini *et al.*, 2017; Seidl & Rammer, 2017).

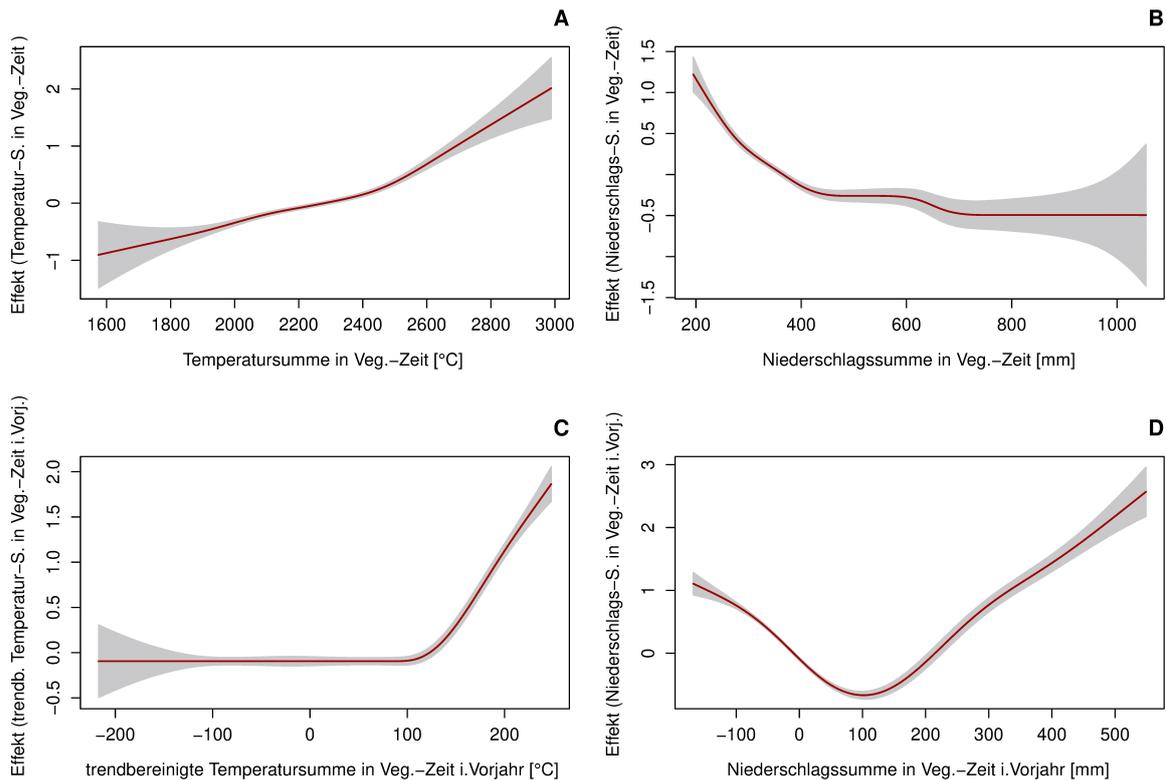


Abb. 17: Modelleffekte von Witterungsparametern auf die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Kalamitätsholz durch Borkenkäfer bei Fichte. Um die Korrelation aufgrund des Höhengradienten zwischen den Temperatur- und Niederschlagssummen im Bezugs- und Vorjahr zu reduzieren, erfolgte für die Vorjahreswerte eine Trendbereinigung, in dem die Abweichungen gegenüber dem langjährigen Mittelwert der Klimareferenzperiode 1991 – 2020 verwendet wurden (C und D).

Der Effekt der *Tempsum_Veg* ist monoton ansteigend, wobei die Steigung ab einem Wert von 2500 zunimmt (Abb. 17 A). Bei sonst konstanten Nebenbedingungen steigt die *WaKaHo* somit mit steigender *Tempsum_Veg*. Der Effekt kann als plausibel beurteilt werden, da die *Tempsum_Veg* einen starken Einfluss auf die Entwicklungsdynamik von Borkenkäferpopulationen hat und höhere Temperaturen im allgemeinen zu einer Erhöhung der Anzahl Käfergenerationen führen (Wermelinger, 2004; Raffa *et al.*, 2008). Neben der aktuellen Witterung wird über diesen Effekt auch das Klima eines Standortes erfasst.

Der Effekt der *Abw_Tempsum_Veg_Vorjahr* ist ebenfalls monoton ansteigend, wobei im Gegensatz zur *Tempsum_Veg* erst oberhalb von 100°C Abweichung zum langjährigen Mittel 1991 – 2020 überhaupt ein Anstieg zu beobachten ist (Abb. 17 C). Unter sonst konstanten Nebenbedingungen werden somit erst oberhalb von 100°C *Abw_Tempsum_Veg_Vorjahr* erhöhte *WaKaHo* projiziert. Da der Effekt hier jedoch stark ansteigt, nimmt die *WaKaHo* oberhalb

von 100°C stark zu. Die *Abw_Tempsum_Veg_Vorjahr* bestimmt wie die *Tempsum_Veg* die Bedingungen für die Entwicklung von Borkenkäferpopulationen. Borkenkäferpopulationen bauen sich bei entsprechend günstigen Bedingungen häufig über mehrere Jahre hin auf. Die *Abw_Tempsum_Veg_Vorjahr* erfasst diese verzögerte Wirkung der Vorjahreswitterung.

Der Effekt der *Niederschlagssum_Veg* ist monoton abnehmend, wobei oberhalb von 400 mm kaum noch eine Abnahme auftritt (Abb. 17 B). Unter sonst konstanten Nebenbedingungen steigt die *WaKaHo* somit mit abnehmender *Niederschlagssum_Veg* unterhalb von 400 mm an, wobei der Anstieg unterhalb von ca. 300 mm deutlich zunimmt. Der Effekt kann als plausibel beurteilt werden, da die *Niederschlagssum_Veg* die Widerstandsfähigkeit der Fichte und insbesondere den Harzfluss bestimmt (Wermelinger, 2004; Raffa *et al.*, 2008).

Der Effekt der *Abw_Niederschlagssum_Veg_Vorjahr* weist ohne Vorgabe von Monotoniebedingungen viel deutlichere Abweichungen von einem monotonen Verlauf auf als die Effekte aller anderen kontinuierlichen Variablen. Die Vorgabe eines monotonen Verlaufes hätte somit eine sehr starke Veränderung des empirischen Datenmusters bedeutet und wurde verworfen. Der Effekt weist ein deutliches Minimum bei ca. 100 mm Abweichung vom langjährigen Mittel auf (Abb. 17 D). Die *WaKaHo* steigt ausgehend von diesem Minimum sowohl mit zunehmender als auch abnehmender *Abw_Niederschlagssum_Veg_Vorjahr* an. Die Wirkung negativer Abweichungen lässt sich ursächlich wie eine geringe *Niederschlagssum_Veg* interpretieren, da auch sie zu einer Schwächung der Fichte bzw. einer Verringerung des Harzflusses führt. Die ungünstige Wirkung positiver Abweichungen auf die *WaKaHo* oberhalb des Minimums bei 100 mm wird dahingehend interpretiert, dass insbesondere durch sehr hohe Niederschlagsmengen auf vielen Mittelgebirgsstandorten Wurzelschäden bei der Fichte verursacht werden können, die im Folgejahr zu einer Beeinträchtigung der Wasseraufnahme führen, die sich wiederum negativ auf die Vitalität der Fichte auswirkt.

Perspektivisch soll die projizierte *WaKaHo* als ein weiteres Kriterium in der klimaangepassten Baumartenwahl berücksichtigt werden. Ähnlich wie bei der Projektion des Sturmschadensrisikos ermöglicht die hohe Sensitivität gegenüber der Topographie, eine kleinräumige Erfassung der standortssensitiven Eignung von WEZ mit Fichtenbeteiligung. Die kleinräumige Sensitivität (Abb. 18) resultiert überwiegend aus den strahlungskorrigierten Temperatursummen und nachrangig aus dem Exponiertheitsindex. Neben dem Höhengradienten wird allem die kleinräumige Differenzierung entsprechend der Topographie deutlich.

Als Grundlage für die Baumartenwahl wurden Projektionen für Fichtenbestände bis zum Erreichen einer Zielstärke von 45 cm ausgehend vom Keimjahr 1975 durchgeführt. Ab einem Alter von 30 wurde dazu für jedes Jahr die *WaKaHo* unter Berücksichtigung der spezifischen Witterung und der Entwicklung des *Dg* projiziert. Die Entwicklung des *Dg* wurde mit den in Kapitel 3.3.1 dargestellten Standort-Leistungsmodellen projiziert. Ab dem Jahr 2023 wurden anstelle der rezenten Witterungsparameter die Werte aus den sieben Klimaläufen des ReKliEs-DE Kernensembles des globalen Emissionsszenarios RCP8.5 verwendet. Die Projektionen wurden differenziert für verschiedene Mischungsanteile entsprechend der WEZ mit Fichtenbeteiligung durchgeführt. Abschließend wurden die jährlichen *WaKaHo* zwischen dem Alter 30 und dem standortsspezifischen Alter bei Zielstärke 45 cm gemittelt, sodass als Entscheidungskriterien je Standort und WEZ sieben Werte entsprechend der sieben Klimaläufe je Standort und WEZ zur Verfügung stehen. Die Projektion wird auf einem 50×50 m² Raster durchgeführt und die Werte werden anschließend für die Baumartenempfehlung für Standortspolygone gemittelt.

Eine Abschätzung von einzelnen biotischen Risiken war für die anderen Hauptbaumarten aufgrund fehlender Datengrundlagen nicht möglich. Im Rahmen der Überlebenszeitanalyse (Kapitel 3.3.5) wurden jedoch Modelle entwickelt, die eine standortssensitive Abschätzung von Gesamtmortalitätsraten ermöglichen.

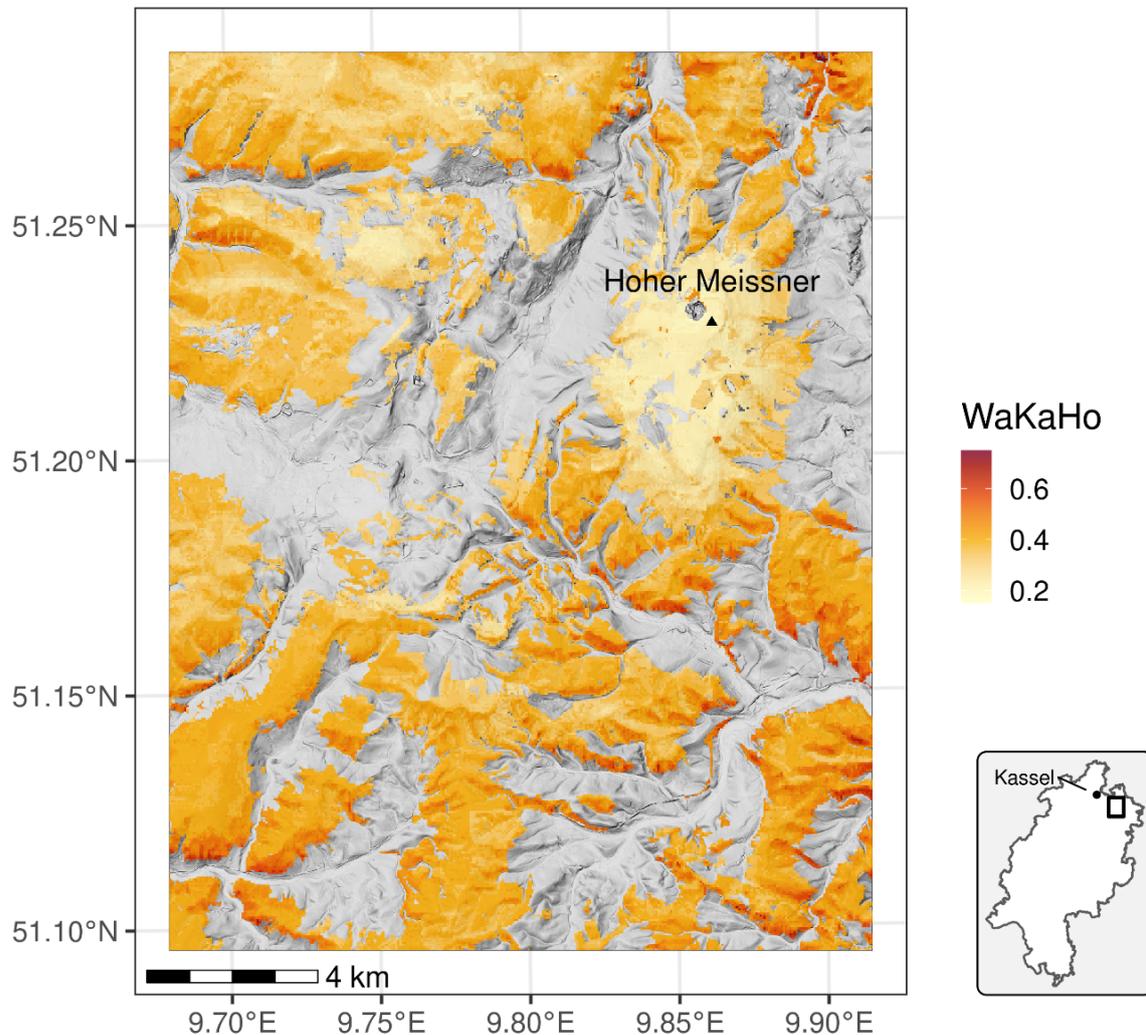


Abb. 18: Exemplarische Projektion der Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Kalamitätsholz durch Borkenkäfer bei Fichte (*WaKaHo*) im Bereich des Hohen Meißners in $50 \times 50 \text{ m}^2$ Auflösung. Die Projektion gilt für das WEZ 52 (60% Fichtenanteil), wobei das Keimjahr 1975 und ab 2020 der Klimalauf hadgem2_wettreg2013 aus dem ReKliEs-DE Kernensemble des globalen Emissionsszenarios RCP8.5 unterstellt wurden. Dargestellt sind Mittelwerte der jährlichen *WaKaHo*-Werte zwischen dem Alter 30 und dem standort-spezifischen Alter bei Zielstärke 45 cm.

3.3.4. Sturmschadensrisiko

Die Sturmschadensgefährdung der hessischen Waldstandorte wurde mit dem statistischen Modell nach Zeppenfeld *et al.* (2023) berechnet. Das Modell basiert auf einem umfangreichen Datensatz vor und nach dem Wintersturmereignis Lothar im Jahr 1999 in Baden-Württemberg. Auf dem verdichteten Messnetz von $2 \times 2 \text{ km}^2$ der zweiten Bundeswaldinventur (BWI) wurden Einzelbaumschäden nach dem Wintersturm aufgenommen. Zusätzlich konnte durch die Komplettaufnahme der Baumhöhen und -durchmesser bei der ersten BWI die Baumdimensionen auf den Zeitpunkt des Sturmereignisses mit hoher Genauigkeit fortgeschrieben werden. Die hohe Inventurpunktdichte über der gesamten Waldfläche Baden-Württembergs stellt zudem sicher, dass eine Vielzahl von unterschiedlichen standörtlichen und topographischen Ausgangssituationen in dem Datensatz enthalten sind. Dies führt zu einer höheren Generalisierbarkeit des Modells und ermöglicht plausible Prognosen für Hessen.

Das Modell berücksichtigt sowohl biotische als auch abiotische Erklärgrößen. Die biotischen Größen auf Einzelbaumebene sind Art(en)gruppe), Durchmesser und Höhe. Die abiotischen Faktoren umfassen eine modellspezifische Bodenwasserkategorie abgeleitet aus der forstlichen Standortkartierung, drei verschiedene Indizes zur Erfassung der Exponiertheit in Abhängigkeit von der Hauptsturmrichtung und als direkten Schadverursacher: die maximale Böengeschwindigkeit. Statistisch lässt sich das Modell als logistisches hierarchisches lineares Modell beschreiben.

Um die Sturmschadensgefährdung von zukünftigen Waldbestände in Hessen beurteilen zu können, wurde für sieben Baumarten (Eiche, Buche, Fichte, Tanne, Kiefer, Douglasie und Lärche) jeweils die Schadenswahrscheinlichkeit von simulierten Reinbeständen bei Zielstärke berechnet. Dazu wurde auf der Waldfläche Hessens das Wachstum von Modellbeständen mit Hilfe von Standort-Leistungsmodellen (siehe Kapitel 3.3.1) simuliert. Konkret wurden die Bestände im Jahr 1950 begründet und deren Grundflächenmittelstamm (Dg) und dessen Höhe (Hg) in 10 Jahres Schritten vom Alter 30 bis zum Alter 130 (Alter 150 bei Buche & Eiche) projiziert. Diese Zeitreihen von den Bestandesgrößen ermöglichen es, anhand von Stammdurchmesser-Verteilungen den Zeitpunkt zu ermitteln, an dem der Bestand eine gegebene Zielstärke erreicht hat. Der Dg und die Hg zu diesem Zeitpunkt werden dann als dendrometrische Eingangsvariablen für das Sturmschadensmodell benutzt. Das Bestandeswachstum wurde für jeden Lauf des ReKliEs-DE Klimamodellensembles (RCP8.5) simuliert und die entsprechende Sturmschadenswahrscheinlichkeit projiziert.

Die sturmspezifischen Bodenwasserkategorien wurden aus den Wasserhaushaltsziffern der hessischen Forstlichen Standortkartierung abgeleitet. Die Exponiertheit eines Standortes wurden mit windrichtungsabhängigen *topex-to-distance* Indizes auf Basis eines Digitalen Höhen Modells (COP-DEM GLO-90) mit einer Auflösung von 90 m (auf 50 m gerastert) berechnet. Dabei wurden Hauptwindrichtungen von Südwest und West angenommen und die resultierende Sturmschadenswahrscheinlichkeiten probabilistisch kombiniert.

Die Projektionen der zukünftigen maximalen Böengeschwindigkeiten wurden von Jung und Schindler (2021) für Winterstürme mit einer 20-jährigen Wiederkehrwahrscheinlichkeit berechnet.

Die räumliche Darstellung der Modellprojektion für Fichten-Reinbestände bei einer Zielstärke von 45 cm in einer Beispielregion am Hoher Meißner (Abb. 19) zeigt die deutlich höheren Sturmschadenswahrscheinlichkeiten in den windexponierten hohen Lagen des Gipfelplateaus des Hohen Meißners. Demgegenüber stehen die geschützten Standorte in den Tallagen und an den ost-exponierten Hängen. Der klimasensitive Modellierungsansatz berücksichtigt zudem die unterschiedlichen zukünftigen Wachstumsbedingungen und die daraus resultierenden Baumhöhen und -durchmesser (beziehungsweise deren H-D-Verhältnis) unter Annahme der Klimamodellprojektionen.

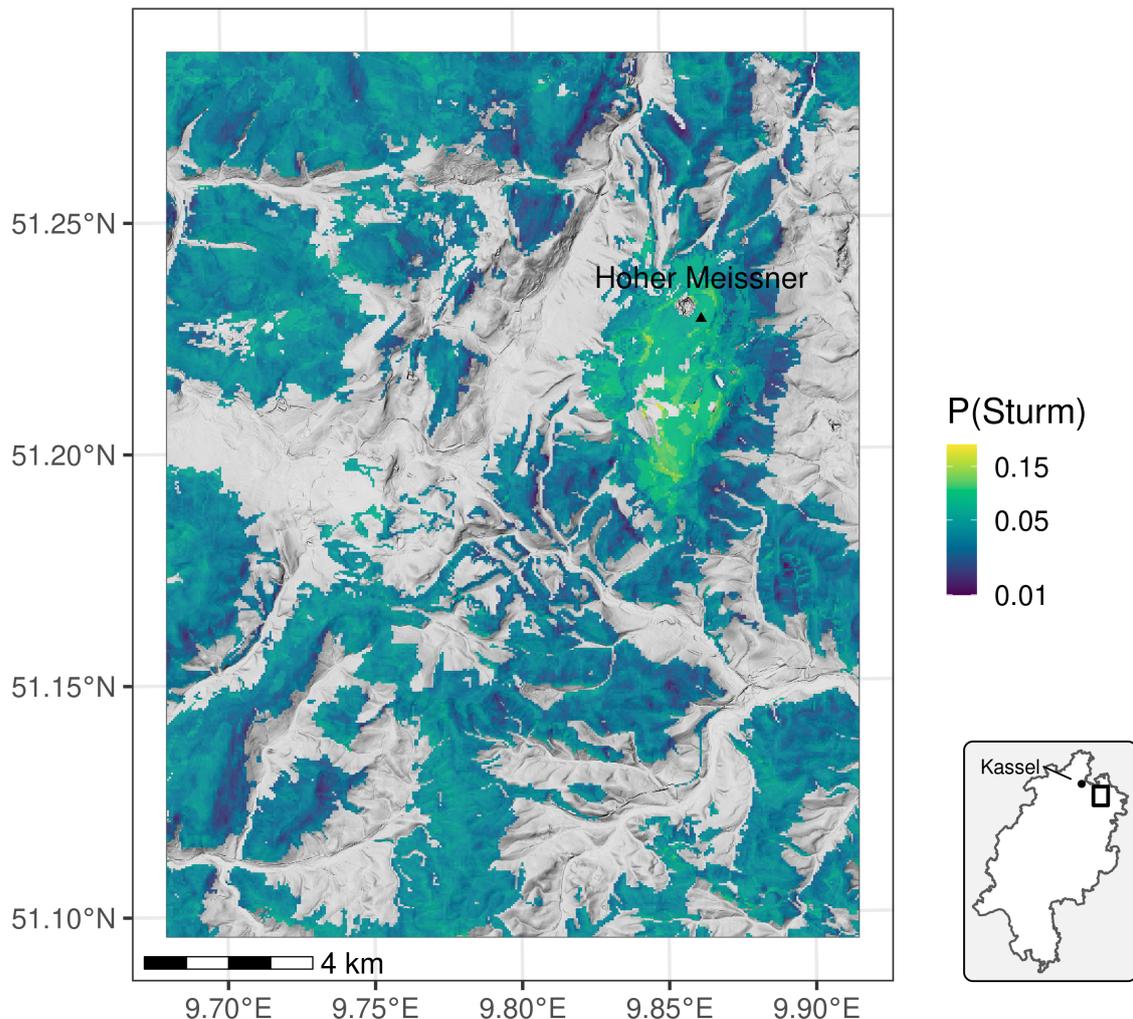


Abb. 19: Sturmschadenswahrscheinlichkeiten ($P(\text{Sturm})$) am Hohen Meißner, Nordost-Hessen. Die dargestellten Wahrscheinlichkeiten sind für Fichten-Modellbestände (begründet 1950) zu dem Zeitpunkt berechnet worden, an welchem die Zielstärke (45 cm) erreicht worden ist. Für die maximalen Böengeschwindigkeiten wurden Werte aus dem 30-jährigen Mittel 2070 – 2100 für ein Wintersturmereignis mit 20-jährigem Wiederkehrintervall (EURO-CORDEX RCP8.5) verwendet. Als Sturmwindrichtungen wurden Südwest und West angenommen und die jeweiligen Wahrscheinlichkeiten probabilistisch kombiniert. Die Sturmschadenswahrscheinlichkeiten aus sieben Klimäläufen (ReKliEs-DE RCP8.5) wurden arithmetisch gemittelt.

3.3.5. Überlebenszeitanalyse

Überlebenszeitanalysen ermöglichen die Projektion von risikobedingten Flächenverlusten über dem Alter (Staupendahl & Zucchini, 2011). Als Datengrundlage wird häufig die Waldzustandserhebung (WZE) verwendet, da das (überwiegend) jährliche Inventurintervall der WZE eine relativ hohe Genauigkeit bei der Ansprache von Absterbe- und Ausscheidegründen ermöglicht. Im Rahmen des Projektes wurden klima- und witterungssensitive Überlebenszeitmodelle für Buche, Eiche, Fichte und Kiefer entwickelt, die auf Vorarbeiten des Projektes DSS-Riskman (Waldklimafonds FKZ: 22WB401501) aufbauen. Die sehr umfangreiche Datengrundlage umfasst die WZE der Trägerländer der NW-FVA und Brandenburgs, sodass relativ große Gradienten von Standortseigenschaften abgedeckt werden. Bisher konnten Prototypen für Buche, Eiche, Fichte und Kiefer entwickelt werden. Im Gegensatz zu den ebenfalls weiterentwickelten Standort-Leistung-Modellen (Kapitel 3.3.1), dem Borkenkäfer- (Kapitel 3.3.3) und dem Sturmschadensmodell (Kapitel 3.3.4) ist bei den Überlebenszeitmodellen noch umfassenderer Entwicklungsbedarf, um robuste Projektionen für die Ableitung klimaangepasster Baummar-

tenempfehlungen bereitstellen zu können. Hier wird exemplarisch das vorläufige Modell für die Buche vorgestellt. Der WZE-Datensatz enthält 233.889 Beobachtungen von lebenden Buchen und 818 Beobachtungen von Buchen, die aufgrund von abiotischen oder biotischen Schadensursachen ausgeschieden sind. Betrachtet wird der Zeitraum 1986 – 2022, wobei nicht für alle Bundesländer der gesamte Zeitraum abgedeckt ist. Beobachtungen von Sturmschäden wurden bei der Modellierung nicht berücksichtigt, da in einem ersten Schritt ausschließlich die Effekte der Witterungsparameter Temperatur und Niederschlag bzw. Aridität auf die Mortalität analysiert werden sollten. Weiterhin liegt für den Bereich der Einschätzung der Sturmschadensgefährdung ein eigenständiger hochsensitiver Modellansatz vor (Kapitel 3.3.4) Sturmschäden wurden daher in der Analyse wie reguläre Nutzungen betrachtet. In der Methodik der Überlebenszeitanalyse spricht man in diesem Fall von Rechtszensierung (Kneib, 2006). Im vorliegenden Fall wurden statt einer direkten Modellierung von Überlebenszeiten jährliche Mortalitätsraten geschätzt, aus denen sich Überlebenszeiten aber einfach berechnen lassen. Durch diese Vorgehensweise kann die vergleichsweise einfache Methodik der Logistischen Regression mit binär verteilter Antwortvariable angewendet werden. Als signifikante und relevante Einflussgrößen wurden:

- der langjährige Mittelwert der Temperatursumme in der Vegetationszeit der Fichte in der Klimareferenzperiode 1991 – 2020 ($Tempsum_Veg_1991-2020$)
- die Temperatursumme in der Vegetationszeit der Fichte im Vorjahr der jeweiligen WZE als Abweichung gegenüber dem langjährigen Mittelwert der Klimareferenzperiode 1991 – 2020 ($Abw_Tempsum_Veg_t-1$)
- die Temperatursumme in der Vegetationszeit der Fichte 2 Jahre vor der jeweiligen WZE als Abweichung gegenüber dem langjährigen Mittelwert der Klimareferenzperiode 1991 – 2020 ($Abw_Tempsum_Veg_t-2$)
- die Temperatursumme in der Vegetationszeit der Fichte 3 Jahre vor der jeweiligen WZE als Abweichung gegenüber dem langjährigen Mittelwert der Klimareferenzperiode 1991 – 2020 ($Abw_Tempsum_Veg_t-3$)
- die Temperatursumme in der Vegetationszeit der Fichte 4 Jahre vor der jeweiligen WZE als Abweichung gegenüber dem langjährigen Mittelwert der Klimareferenzperiode 1991 – 2020 ($Abw_Tempsum_Veg_t-4$)
- der langjährige Mittelwert des Ariditätsindices in der Vegetationszeit der Fichte der Klimareferenzperiode 1991 – 2020 ($Ari_Veg_1991-2020$). Der Ariditätsindex wurde als Quotient aus der Niederschlagssumme und der Temperatursumme in der Vegetationsperiode berechnet.
- der Ariditätsindex in der Vegetationszeit der Fichte 4 Jahre vor der jeweiligen WZE als Abweichung gegenüber dem langjährigen Mittelwert der Klimareferenzperiode 1991 – 2020 ($Abw_Ari_Veg_t-4$)
- das Baumalter zum Zeitpunkt der WZE

Für die Temperatursummenwerte erfolgte eine Strahlungskorrektur in Abhängigkeit von der Himmelsrichtung und Hangneigung. Aufgrund der geringen Variabilität zwischen den Baumarten wird für alle Baumarten die Vegetationsperiode der Fichte verwendet. Auch würde die Verwendung von baumartenspezifischen Vegetationsperiodenwerten zu einer enormen Vergrößerung des für Projektionen notwendigen Datenumfangs führen.

Das selektierte Modell bildet somit sowohl die Effekte der langfristigen klimatischen Parameter $Tempsum_Veg_1991-2020$ und $Ari_Veg_1991-2020$ als auch von verschiedenen Witterungsparametern ab. Zur Datenanalyse wurden Verallgemeinerte Additive Modelle verwendet (GAM). Nach erfolgter Modellselektion wurde das abschließend ausgewählte Modell unter Vorgabe von Monotoniebedingungen reparametrisiert (GAM_Con). Die Effekte der

beiden Modellvarianten sind zum Vergleich jeweils in einer Graphik abgebildet (Abb. 20 / 21). Es wird deutlich, dass die Effektmuster durch die Monotonievorgabe weitgehend erhalten bleiben, die Effektstärke aber vor allem im warmen und trockenen Bereich mehr oder weniger stark abnimmt. Für realistische Projektionen wurde die Annahme steigender Mortalitätsraten mit steigenden Temperatursummen und zunehmender Trockenheit (sinkenden Ariditätsindex) aus sachlogischen Gründen als notwendig erachtet.

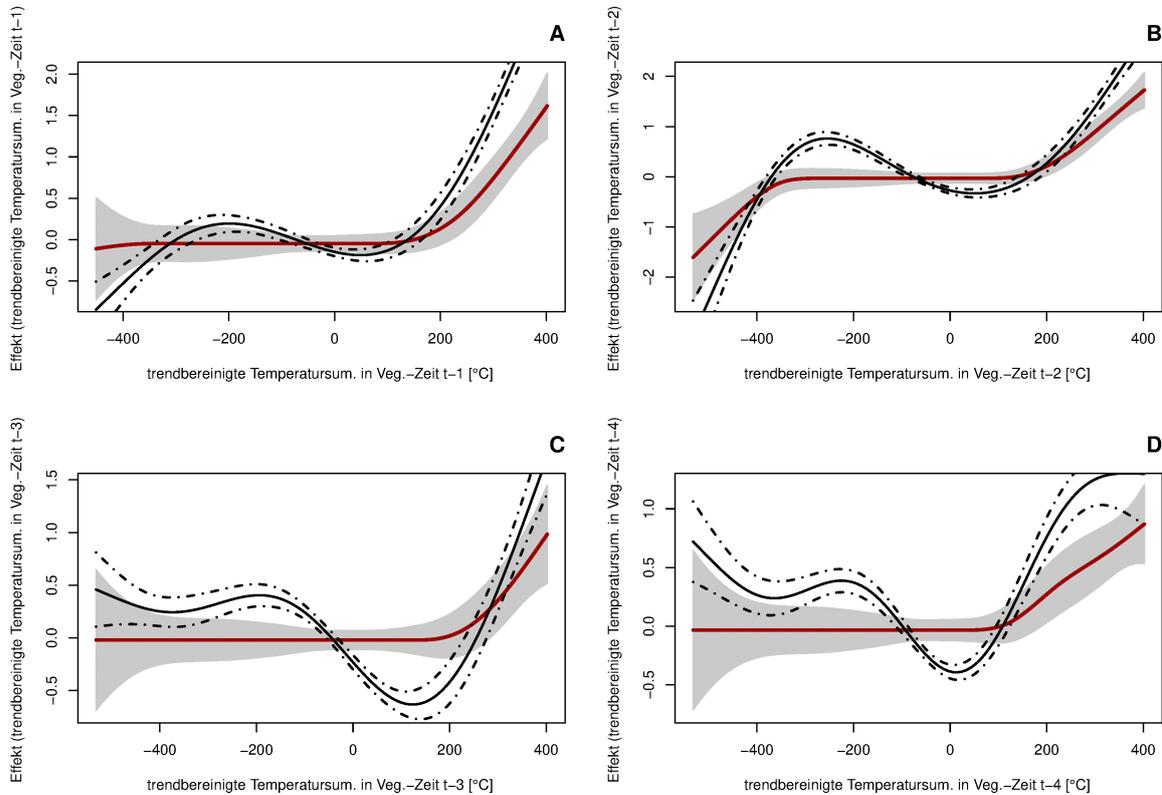


Abb. 20: Modelleffekte mit (GAM_Con) (rote Linie / grauer Konfidenzbereich) und ohne (GAM) Monotoniebedingungen (schwarze durchgezogene Linie / Konfidenzbereich innerhalb der schwarzen punkt-gestrichelten Linien) der trendbereinigten Temperatursummen in der Vegetationszeit in den Jahren $t-1$ (A), $t-2$ (B), $t-3$ (C) und $t-4$ (C) vor dem Bezugsjahr t der WZE auf die jährliche Mortalitätswahrscheinlichkeit der Buche.

Alle Witterungsparameter gehen nicht mit ihren absoluten Werten sondern als Abweichungen gegenüber den langjährigen Mittelwerten *Tempsum_Veg_1991-2020* bzw. *Ari_Veg_1991-2020* in die Modelle ein. Diese Vorgehensweise ist notwendig, um den starken gemeinsamen Höhengradienten der Witterungsparameter untereinander aber auch zu den Klimaparametern zu beseitigen. Im allgemeinen ist es nur durch die Reduktion von starker Kollinearität möglich, sachlogisch plausible Effektverläufe zu schätzen. Die weiterhin auftretenden Abweichungen von monoton verlaufenden Verläufen in der Variante *GAM* werden dagegen als Störeffekte von nicht beobachteten Einflussgrößen interpretiert, sodass eine Vorgabe von Monotoniebedingungen gerechtfertigt erscheint.

Alle trendbereinigten Temperatursummen weisen in der Variante *GAM* tendenziell steigende Effekte auf, die allerdings mit zunehmender zeitlicher Distanz zum Bezugsjahr der jeweiligen WZE weniger ausgeprägt sind (Abb. 20 A-D). In der Projektion wirken sich positive Abweichungen der Temperatursumme aus dem Vor- und Vorvorjahr somit stärker mortalitätserhöhend aus als aus den Jahren $t-3$ und $t-4$. Die Vorgabe von Monotoniebedingungen in der Variante *GAM_Con* verstärkt dieses Muster. In der Variante *GAM_Con* tritt ein mortalitätserhöhender Effekt zudem einheitlich für alle trendbereinigten Temperatursummen erst ab Werten von 200 C auf.

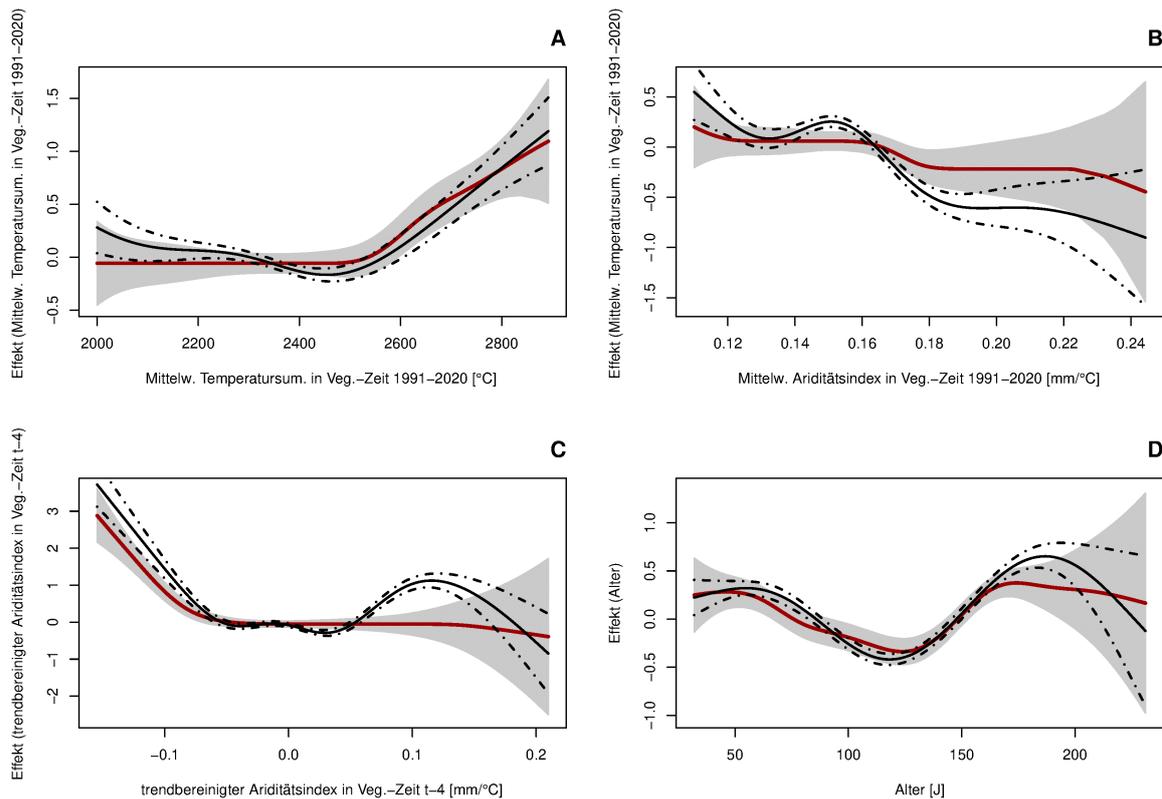


Abb. 21: Modelleffekte mit (rote Linie / grauer Konfidenzbereich) und ohne Monotoniebedingungen (schwarze durchgezogene Linie / Konfidenzbereich innerhalb der schwarzen punkt-gestrichelten Linien) der Klimaparameter *Tempsum_Veg_1991-2020* (A) und *Ari_Veg_1991-2020* (B), des Ariditätsindex in der Vegetationszeit im Jahr $t-4$ vor dem Bezugsjahr t der WZE (C) und des Einzelbaumalters zum Zeitpunkte der WZE (D) auf die jährliche Mortalitätswahrscheinlichkeit der Buche.

Die Effektamplituden der Klimaparameter *Tempsum_Veg_1991-2020* und *Ari_Veg_1991-2020* (Abb. 21 A,B) sind im Vergleich zu denen der Witterungsparameter (Abb. 20 A-D / Abb. 21 C) in beiden Modellvarianten deutlich geringer. Damit wirken sich witterungsbedingte warme bzw. trockene Anomalien deutlich stärker aus als langfristige klimatische Standortunterschiede. In der Variante *GAM_Con* tritt erst ab einer *Tempsum_Veg_1991-2020* von ca. 2500°C ein mortalitätserhöhender Effekt auf. Der Effekt des *Ari_Veg_1991-2020* ist in der Variante *GAM_Con* schwach monoton fallend und sehr viel schwächer als der Effekt des trendbereinigten Ariditätsindex *Abw_Ari_Veg_t-4*. Der Effekt des *Abw_Ari_Veg_t-4* zeigt in beiden Modellvarianten erst unterhalb eines Wertes von ca. -0.075 überhaupt eine mortalitätserhöhende Wirkung, die in der Variante *GAM_Con* etwas schwächer ausgeprägt ist. Unterhalb dieses Wertes und damit mit zunehmender Trockenheit nimmt der Effekt und damit die Mortalität bei sonst konstanten Bedingungen aber deutlich zu. Die Effekte der trendbereinigten Temperatursumme aus dem Bezugsjahr der WZE und weiterer trendbereinigter Ariditätsindices aus dem Jahr t der WZE und den Jahren $t-1$ bis $t-3$ waren nur schwach ausgeprägt oder nicht plausibel und wurden daher in der Modellselektion ausgeschlossen.

Der Alterseffekt (Abb. 21 D) ist relativ schwach ausgeprägt und zeigt in beiden Modellvarianten ein Minimum im Bereich von 125 Jahren. Ausgehend von diesem Alter steigt der Effekt und damit die Mortalitätsrate in beiden Modellvarianten hin zu jüngeren und älteren Bäumen an.

Für eine Sensitivitätsanalyse werden im Folgenden Mortalitätsraten für Buche für Waldstandorte mit unterschiedlichen klimatischen Bedingungen entlang eines Transektes durch Hessen projiziert (Abb. 22). Dabei wird an jedem Waldstandort eine Buchenbestockung

unterstellt und die jeweiligen klimatischen und Witterungsbedingungen für Projektionen im Zeitraum 1981 – 2050 und 2031 – 2100 berücksichtigt. Die Buchen sind zum Beginn der Betrachtungszeiträume jeweils 81 Jahre und zum Ende 150 Jahre alt. Die Projektionen werden ohne Extrapolation durchgeführt, d.h. zukünftige Witterungswerte, die außerhalb der Parametrisierungsdaten liegen, haben eine Wirkung wie die Maximalwerte, die im Zeitraum 1986 – 2022 innerhalb der WZE beobachtet wurden. Es handelt sich somit um sehr konservative Projektionen.

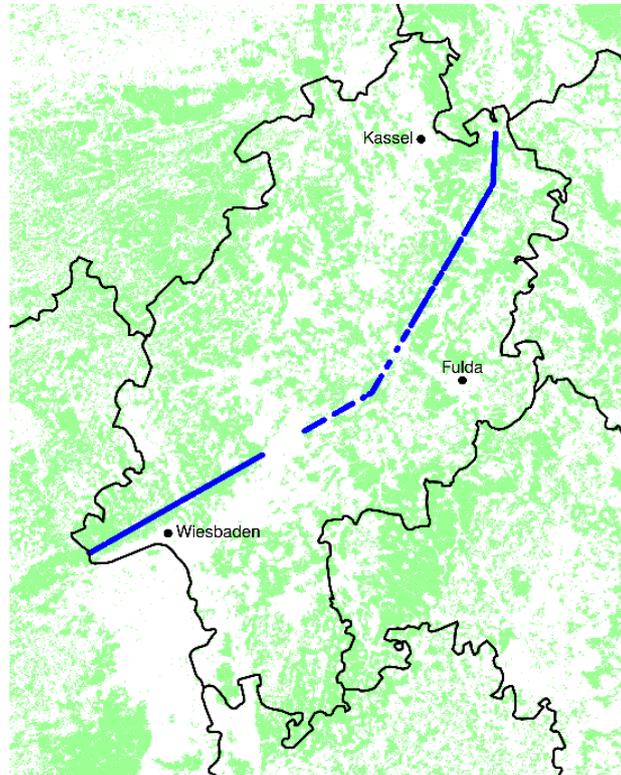


Abb. 22: Transekt durch Hessen, welcher für die Sensitivitätsanalyse des Modells zur Projektion der Buchenmortalität aufgrund von abiotischen (ohne Sturmschäden) und biotischen Risiken verwendet wurde. Für alle im Wald liegenden Punkte wurde eine Buchenbestockung unterstellt und die jeweiligen klimatischen und Witterungsbedingungen für die Projektionen verwendet.

Es wird deutlich, dass sich die durch die Variante *GAM* projizierten Mortalitätsraten bereits Mitte des 21-ten Jahrhunderts für weite Bereiche des Transektes extrem erhöhen, wenn ein pessimistischer Klimalauf aus dem ReKliEs-DE Kernensemble des globalen Emissionsszenarios RCP8.5 unterstellt wird (Abb. 23 B). Aber selbst ein bzgl. der Witterungsgrößen mittlerer Klimalauf führt zu einem bisher nie beobachteten Schadniveau (Abb. 23 A). Lediglich der günstigste Klimalauf des Kernensembles führt bis Mitte des 21-ten Jahrhunderts zu keinen Veränderungen der Mortalitätsraten (Abb. 23 C). Die projizierten Mortalitätsraten auf Basis der Variante *GAM_Con* sind deutlich geringer (Abb. 23 D,F). Hier spiegelt sich die deutlich geringere Sensitivität der Modelleffekte wider (Abb. 20 / 21) und nur der pessimistische Klimalauf zeigt bereits deutlich erhöhte Mortalitätsraten (Abb. 23 E).

Für die zweite Hälfte des 21. Jahrhunderts werden durch die Variante *GAM* für weite Bereiche des Transektes extrem erhöhte Mortalitätsraten projiziert (Abb. 24 A-C). Die Unterschiede zwischen den Klimäläufen sind zwar noch deutlich erkennbar, aber selbst der sehr günstige Klimalauf (Abb. 24 C) resultiert gegenüber der aktuellen Situation in einer Vervielfachung der Mortalitätsraten. Im sehr pessimistischen Klimalauf gibt ab es ab 2050 entlang des Transektes keinerlei Standorte mehr, auf denen die Buche nicht innerhalb weniger Jahre ausfällt (Abb. 24 B). Im Klimalauf mit mittleren Bedingungen tritt dieses Muster zeitlich versetzt ab etwa 2080 auf (Abb. 24 A). Die projizierten Mortalitätsraten auf Basis

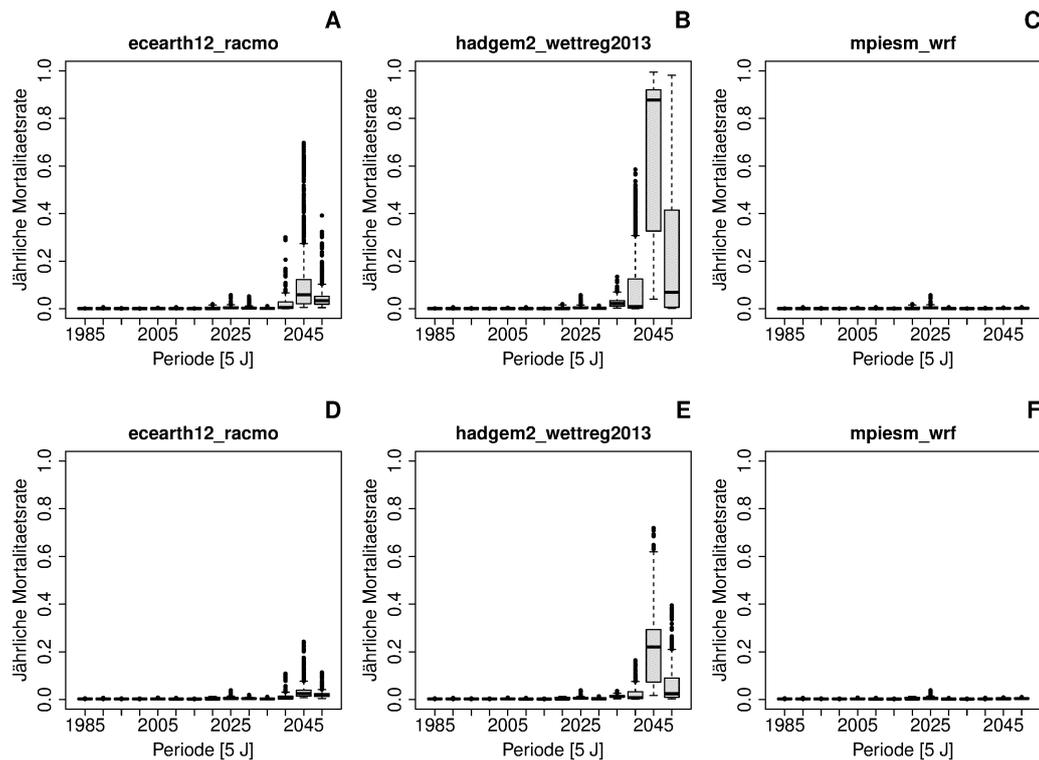


Abb. 23: Projizierte jährliche Mortalitätsraten auf Basis der Modellvariante GAM (A/B/C) und GAM_Con (D/E/F) stratifiziert nach 5-Jahresperioden (Klassenobergrenzen) im Zeitraum 1981 – 2050 für Buche entlang eines Transektes durch Hessen (Abb. 22) für drei Klimäläufe des ReKliEs-DE Kernensembles. Die Buchen sind zum Beginn des Betrachtungszeitraumes 81 Jahre und zum Ende 150 Jahre alt.

der Variante *GAM_Con* sind deutlich geringer (Abb. 24 D-F). Aber selbst der sehr günstige Klimalauf (Abb. 24 F) weist immer noch sehr viele höhere Mortalitätsraten auf, als sie im Zeitraum 1986 – 2022 beobachtet wurden.

Die Projektionen von Mortalitätsraten bzw. abgeleiteter Überlebenszeiten sollen mittelfristig als ein weiteres Kriterium der Baumarten- bzw. WEZ-Wahl verwendet werden. Die derzeitigen Modellprototypen projizieren mit Ausnahme der Modellvariante *GAM_Con* in Kombination mit dem günstigsten Klimalauf (Abb. 24 F) Mortalitätsraten, die einen Verlust der Buche einem Großteil Waldfläche bis spätestens Ende des Jahrhunderts bedeuten würden (Abb. 24). Allerdings sind die Unsicherheiten der Projektionen aktuell noch sehr hoch. Die Unsicherheit betrifft vor allem das Ausmaß der Mortalitätsraten und weniger das generelle Muster. So führt beispielsweise die Vorgabe von Monotoniebedingungen im *GAM_Con* zu der bereits beschriebenen Abschwächung der Modelleffekte, die in starken Unterschieden zwischen den Projektionen auf Basis von *GAM* bzw. *GAM_Con* resultieren (Abb. 23 / 24). Daher sollten in den nächsten Jahren dauerhaft Reparametrisierungen auf der Grundlage zukünftiger Waldzustandserhebungen erfolgen, in denen sich das Schadgeschehen aller Voraussicht nach verstetigen und für alle Baumarten auf allerdings sehr unterschiedlichem Niveau intensivieren wird. Eine Verwendung der Projektionen für eine relative Differenzierung der Standorte bzgl. der Baumarteneignung erscheint aktuell aber schon möglich. Allerdings sollte vorweg noch differenziert analysiert werden, wie sich die unterschiedlichen Standorte bzgl. der Mortalitätsraten unterscheiden. Auch werden in den derzeitigen Modellen keinerlei Effekte von Bodenparametern bspw. zur Erfassung des Geländewasserhaushaltes beschrieben, da derzeit keine einheitliche Datengrundlage für die Trägerländer der NW-FVA zur Verfügung steht. Eine Erweiterung diesbezüglich ist in einem bereits angelaufenen Forschungsprojekt im Rahmen des Waldklimafonds (FKZ: 2220WK41F4) für 2024/25 geplant.

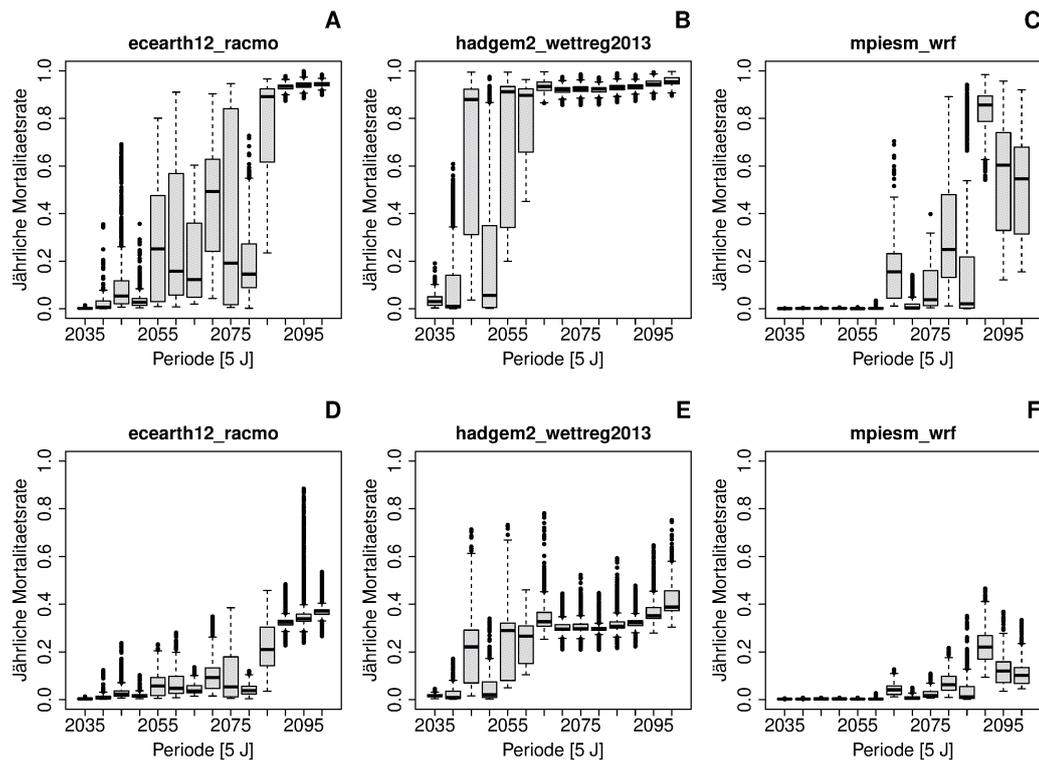


Abb. 24: Projizierte jährliche Mortalitätsraten auf Basis der Modellvariante GAM (A/B/C) und GAM_Con (D/E/F) stratifiziert nach 5-Jahresperioden (Klassenobergrenzen) im Zeitraum 2031 – 2100 für Buche entlang eines Transektes durch Hessen (Abb. 22) für 3 Klimäläufe des ReKliEs-DE Kernensembles. Die Buchen sind zum Beginn des Betrachtungszeitraumes 81 Jahre und zum Ende 150 Jahre alt.

3.3.6. Ökonomische Bewertung

In Abhängigkeit der Risiken können ökonomische Bewertungen der Baumartenempfehlungen vorgenommen werden. Die Erwartungswerte der langfristigen ökonomischen Erfolgskennziffern werden durch risikoadjustierte Normalwaldsimulationen für die Hauptbaumarten hergeleitet. Zusätzlich wird die Birke stellvertretend für die Sukzessionsbaumarten gerechnet. Das methodische Vorgehen ist an Möhring *et al.* (2022) angelehnt. Datenbasis und Vorgehen werden hier in Grundzügen beschrieben.

Als naturale Datenbasis dienen die neuen Ertragstabellen der NW-FVA (Albert *et al.*, 2022). Da für die Birke keine neuen Tabellen vorliegen, werden die Tabellen von Schwappach (1903) verwendet. Die ökonomischen Modelle basieren auf Kosten und Erlösen der Holzernte nach Fuchs *et al.* (2022), welche auf Einschlags- und Verkaufstatistiken von HessenForst aus den Jahren 2010 – 2015 basieren und vom Durchmesser des Grundflächenmittelstammes abhängig sind. Die bei Katastrophen auftretenden Auf- bzw. Abschläge auf Kosten und Erlöse werden gemäß Tabelle 8 vorgenommen. Dieser sind auch die planmäßigen Produktionszeiträume zu entnehmen.

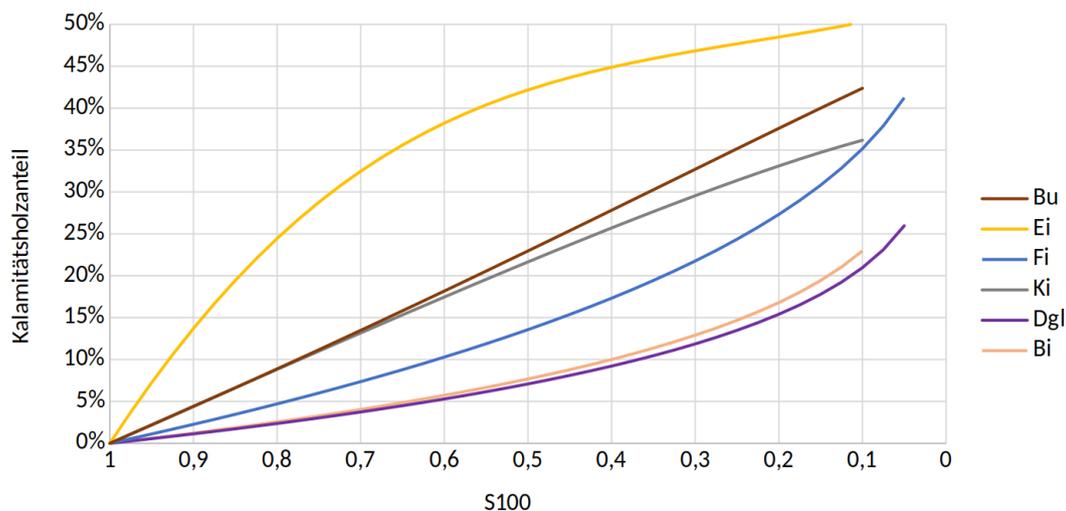
Die Kulturkosten (Tab. 8) für den regulären Erhalt einer Baumart nach Hauptnutzung und die erhöhten Kosten nach einer Katastrophe werden in Anlehnung an Möhring *et al.* (2022) berechnet, wobei sich die Kosten des Erhalts einer Baumart aus den Anteilen der Naturverjüngung und Pflanzung gemäß der hessischen BWI3-Daten (Thünen-Institut, 2012) und den jeweiligen Kosten herleiten.

Tab. 8: Eingangsdaten für die Betriebsklassensimulationen

| | | Fichte | Dougl. | Kiefer | Eiche | Buche | Birke |
|------------------------------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|
| planm. Produktionszeitraum | Jahre | 80 | 60 | 120 | 180 | 140 | 60 |
| Mindererlöse bei Kalamität | % | 45 | 20 | 20 | 10 | 20 | 20 |
| Mehraufwand bei Kalamität | % | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 |
| Kulturkosten | | | | | | | |
| Erhalt ohne Kalamität | €/ha | 1530 | 3332 | 2758 | 6075 | 2150 | 0 |
| Pflanzung nach Kal. (20% NV) | €/ha | 3780 | 4360 | 6380 | 15640 | 9160 | 0 |
| Läuterung im Alter 10 | €/ha | 600 | 600 | 600 | 600 | 600 | 600 |
| Fixkosten | €/ha/a | 160 | 160 | 160 | 160 | 160 | 160 |

Mithilfe der beschriebenen Eingangsdaten können für alle potentiell möglichen Produktionszeiträume, also vom kalamitätsbedingten Ausfall in frühen Jugendstadien bis hin zu der regulären Hauptnutzung bei Erreichen der planmäßigen Produktionszeit, Kennziffern wie Vorrat, Nutzung, Kalamitätsholzanteil und Reinertrag berechnet werden. Durch Gewichtung mit Ausfallwahrscheinlichkeiten aus einer Überlebensfunktion können im nächsten Schritt die Erwartungswerte der jeweiligen Kennziffern gebildet werden. Die Ausfallwahrscheinlichkeiten werden über eine modifizierte Weibullfunktion implementiert (Staupendahl & Möhring, 2011). Diese wird durch zwei Parameter charakterisiert: der Formparameter (α) bestimmt den Risikoverlauf (Jugend- / Altersrisiko) und die Risikostärke (S_{100}) beschreibt die Überlebenswahrscheinlichkeit bis zum Alter 100. Das Modell unterstellt dabei flächige Ausfälle und berücksichtigt keine anderen Möglichkeiten, wie z.B. die Absenkung des Bestockungsgrades durch Ausfall von Einzelbäumen.

Da die tatsächliche Betroffenheit einer Betriebsklasse nicht nur von der Risikostärke abhängt, sondern unter anderem auch vom planmäßigen Produktionszeitraum in dem das Risiko wirken kann, ist die Interpretation der Risikostärke wenig intuitiv. Stattdessen wird hier der Erwartungswert des Kalamitätsholzanteils an der gesamten Nutzung (Pflege- und Hauptnutzung) als Indikator für das Kalamitätsausmaß verwendet. Abbildung 25 zeigt die mit verschiedenen Risikostärken korrespondierenden Erwartungswerte der Kalamitätsholzanteile.

Abb. 25: Kalamitätsholzanteil an gesamter Nutzung in Abhängigkeit von der Risikostärke (S_{100}).

Als zentrale Größe für die ökonomische Bewertung der Baumarten werden Erwartungswerte der Reinerträge der Holzproduktion (keine Berücksichtigung von Jagd, Nebennutzungen, Liegenschaften etc.) angegeben. Tabelle 9 zeigt die Ergebnisse der Betriebsklassensimulationen ohne Überlebensrisiken als risikofreie Referenz.

Tab. 9: Berechnung der Betriebsklassen ohne Überlebensrisiken (jeweils I. Ekl.)

| | | Fichte | Douglasie | Kiefer | Eiche | Buche | Birke |
|---------------------------------|----------|--------|-----------|--------|-------|-------|-------|
| planmäßiger Produktionszeitraum | Jahre | 80 | 60 | 120 | 180 | 140 | 60 |
| durchschnittlicher Vorrat | Vfm/ha | 230 | 234 | 207 | 265 | 258 | 74 |
| Holzzuwachs | Vfm/ha/a | 12,3 | 17,3 | 8,8 | 6,9 | 10,3 | 4,9 |
| Pflegennutzungen | Efm/ha/a | 4,2 | 6,2 | 4,4 | 3,5 | 4,9 | 1,4 |
| kalamitätsbedingte Endnutzungen | Efm/ha/a | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| planmäßige Hauptnutzungen | Efm/ha/a | 5,7 | 7,7 | 2,7 | 2,0 | 3,3 | 2,5 |
| gesamte Nutzung | Efm/ha/a | 9,8 | 13,8 | 7,0 | 5,5 | 8,2 | 3,9 |
| ekfr. Holzerlöse | €/Efm | 54 | 55 | 34 | 89 | 33 | 21 |
| Kulturkosten pro ha | €/ha | 1530 | 3332 | 2758 | 6075 | 2150 | 0 |
| Läuterungskosten pro ha | €/ha | 600 | 600 | 600 | 600 | 600 | 600 |
| ekfr. Holzerlöse | €/ha/a | 532 | 762 | 237 | 490 | 275 | 83 |
| jährl. Kulturkosten | €/ha/a | 19 | 56 | 23 | 34 | 15 | 0 |
| jährl. Läuterungskosten | €/ha/a | 8 | 10 | 5 | 3 | 4 | 10 |
| Deckungsbeitrag | €/ha/a | 505 | 697 | 209 | 453 | 255 | 73 |
| fixe Hektargemeinkosten | €/ha/a | 160 | 160 | 160 | 160 | 160 | 160 |
| Reinertrag der Holzproduktion | €/ha/a | 345 | 537 | 49 | 293 | 95 | -87 |

Die Erwartungswerte der Reinerträge werden in Abb. 26 in Abhängigkeit des Kalamitätsholzanteils dargestellt.

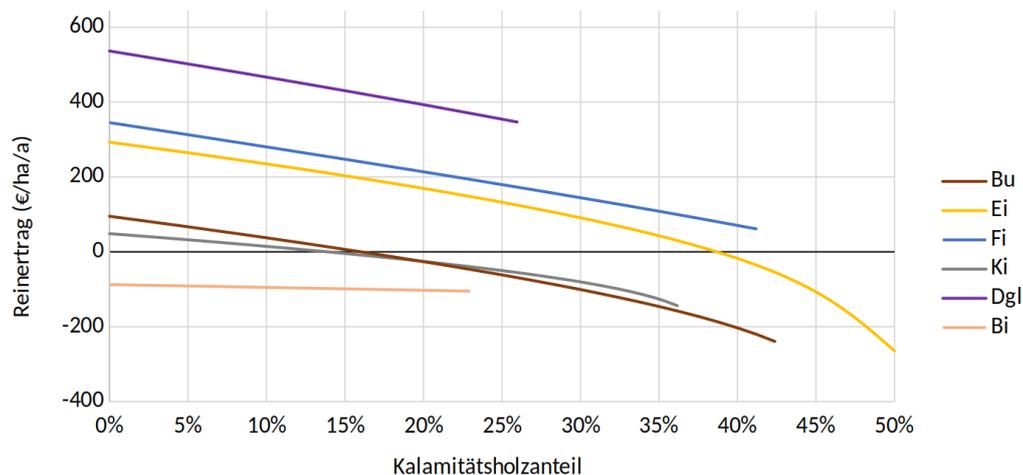


Abb. 26: Erwartungswerte der Reinerträge der Holzproduktion in Abhängigkeit von dem Kalamitätsholzanteil an gesamter Nutzung (jeweils I. Ekl.).

Die erwarteten Reinerträge sinken mit zunehmendem Risiko, wobei ab bestimmten Grenzen des Kalamitätsholzanteils die positiven Reinerträge in langfristige Verluste umschlagen. Bei Betrachtung der relativen ökonomischen Vorteilhaftigkeiten der Baumarten muss berücksichtigt werden, dass auf einem gleichen forstlichen Standort bei verschiedenen Baumarten i.d.R. unterschiedliche Kalamitätsholzanteile auftreten dürften.

3.4. Entwicklung der Baumarten- und WEZ-Empfehlungen

Der Klimawandel stellt für die nachhaltige multifunktionale Forstwirtschaft mit ihrer weitreichenden Bindung an die Standortverhältnisse und ihren langen Produktionszeiträumen eine besondere Herausforderung dar. Es wird erwartet, dass Ausmaß, räumliche und zeitliche Ausprägung sowie Geschwindigkeit des Klimawandels vielerorts die Anpassungsfähigkeit unserer Baumarten überschreiten werden. Forstbetriebe und Gesellschaft sind daher gut beraten, Risikovorkehr zu betreiben. Die waldbaulichen Handlungsoptionen zur Anpassung der Wälder an den Klimawandel reichen vom standortgemäßen Waldumbau, der Stabilisierung

der vorhandenen Wälder bis hin zur Senkung bzw. Verteilung der Risiken. Trotz aller Unsicherheiten im Detail erlaubt das bislang erarbeitete Wissen die Bereitstellung von Entscheidungshilfen zur Klima-anpassung, die in der Forstpraxis in ein adaptives Management zu integrieren sind, das grobe Fehler vermeidet und dem Erkenntnisfortschritt folgt.

Der Forschungsansatz der NW-FVA geht davon aus, dass zunehmender Trockenstress bei den meisten mitteleuropäischen Baumarten zu einer verminderten Produktivität und einer erhöhten Anfälligkeit gegenüber weiteren abiotischen und biotischen Stressfaktoren führt. Die Einschätzung des Trockenstressrisikos für grund- und stauwasserfreie Waldstandorte erfolgt über Schwellenwerte der Standortwasserbilanz (SWB). Sie verrechnet den Mittelwert der klimatischen Wasserbilanz in der Vegetationsperiode (KWB) für eine 30-jährige Klimaperiode mit der nutzbaren Feldkapazität des Bodens (nFK) für eine Bezugstiefe von 1 m. Das Entscheidungsmodell zur Klimaanpassung basiert auf dem Emissionsszenario RCP8.5, gerechnet mit dem Globalmodell ECHAM6 und dem statistischen Regionalmodell STARS II für den Zeitraum 2041 – 2070. Die Erweiterung der Empfehlungen auf Basis des ReKliEs-DE Kernensembles mit multikriteriellen Methoden wird im Laufe der nächsten Jahre angestrebt.

3.4.1. Klassifizierung der Baumarten nach ihrer Trockenstresstoleranz

Die Baumarten weisen unterschiedliche Ansprüche an die Wasserversorgung und demzufolge auch Unterschiede in ihrer Toleranz gegenüber Trockenstress auf. Sie wurden daher nach Böckmann *et al.* (2019) in Gruppen unterschiedlicher Trockenstressgefährdung eingeteilt und anhand der Standortwasserbilanz in der Vegetationszeit klassifiziert (Tab. 10). Diese Schwellenwerte stellen aber auch bei hoher Gefährdung keine Existenz- oder Verbreitungsgrenzen dar.

Tab. 10: Klassifizierung des Trockenstressrisikos der Hauptbaumarten (fett) und zugeordneter Nebenbaumarten in der Vegetationszeit im Anhalt an die Standortwasserbilanz (SWB)

| | Fichte | Buche | Eiche Douglasie | Kiefer |
|----------------------------------|------------------------|---|---|----------------------------|
| | Roterle* Moorbirke* | Weißtanne Japanlärche Bergulme Schwarznuss | Roteiche Ahornarten Esche Hainbuche Linde Europ. Lärche Küstentanne | Sandbirke Schwarzkiefer |
| Trockenstress- risiko | | | | |
| gering | > 0 mm | > -50 mm | > -150 mm | > -200 mm |
| mittel | 0 bis -80 mm | -50 bis -100 mm | -150 bis -350 mm | -200 bis -450 mm |
| hoch | < -80 mm | < -100 mm | < -350 mm | < -450 mm |

* benötigt hoch anstehendes Grundwasser

Grundlage aller Klimaanpassungsmaßnahmen ist die Überprüfung, ob auf gegebenem Standort die derzeit dort wachsenden oder dort noch zu verjüngenden Baumarten nach heutigem Stand des Wissens geeignet sind, sowohl mit dem herrschenden, als auch mit dem künftigen Klima zurechtzukommen. Zur Potenzialabschätzung der heimischen und der anbauwürdigen eingeführten Baumarten wurde an der NW-FVA eine Zuordnungstabelle entwickelt. Darin wird die Stellung der Baumarten in Mischbeständen entsprechend ihrer Wasser- und Nährstoffansprüche nach bestimmten Stufen der Standortwasserbilanz (50 mm-Stufen) und der sechs Trophiestufen in eine zweidimensionale Matrix eingeordnet. Je nach Erfüllung ihrer ökologischen Ansprüche auf einem Standort kann die Baumart führend (F), beigemischt (M), vorübergehend beigemischt (VM), begleitend (B) oder vom Anbau ausgeschlossen (grau) sein.

Hohes Risiko einer Baumart bedeutet aber nicht zwangsläufig deren unmittelbare Mortalität. Ihre Trockenstressgefährdung wird berücksichtigt, indem die Hauptbaumarten maximal bis zur Grenze ihrer hohen Trockenstressgefährdung als führend eingeordnet werden. Bis an die Grenze zu einer hohen Gefährdung bleibt die Baumart potentiell Mischbaumart. Der Sonderfall vorübergehend beigemischt bezieht sich auf waldbauliche Ausgangssituationen in Buchen- und Fichtenbeständen mit flächiger Naturverjüngung, die auf Standorten stocken, deren Wasserversorgung in der Vegetationszeit sich in den kommenden Jahrzehnten in die ungünstigste Standortwasserbilanz-Stufe mit hoher Trockenstressgefährdung verschlechtert, sodass hier die vorhandene Verjüngung nur vorübergehend im Sinne kürzerer Produktionszeiten bzw. geringerer Zielstärken in die Waldentwicklung einbezogen werden kann. Begleitbaumarten als weiterer Bestandteil der WEZ sind die auf einem breiten Standortsspektrum meist natürlich ankommenden Nebenbaumarten und natürlich ankommende Hauptbaumarten in ihrem standörtlichen Grenzbereich. Ihr Beitrag zur Risikovorsorge und zur Erhöhung der Artenvielfalt ist ökologisch nicht zu vernachlässigen. Die Baumarten- und WEZ-Zuordnungstabellen jeweils für terrestrische und hydromorphe Standorte befinden sich im Anhang (A.1 – A.4).

Da die Beeinflussung des Trockenstressrisikos für Baumarten auf den Nassstandorten nicht über die Standortwasserbilanz bestimmt werden kann, werden dort für die Zuordnung der Waldentwicklungsziele Informationen aus der Standortkartierung angewendet. Zuordnungsgrößen sind hier die Trophie und die Geländewasserhaushaltsstufe. Diese Bodenmerkmale lassen sich bislang nicht klimatisch dynamisieren und entsprechen damit den heutigen Kartierungsständen.

Grundlage für die Ableitung der WEZ ist einerseits die Baumartenklassifizierung auf gegebenen Standort und andererseits die Mischungsvorgaben, die durch den WEZ-Katalog definiert sind (siehe Kapitel 3.4.2). In Abhängigkeit besagter Baumartenklassifizierung lassen sich für alle terrestrischen Standortkombinationen (SWB/Trophie) Bereiche identifizieren, auf denen ein WEZ grundsätzlich empfohlen wird. Diese sogenannten Planungsbereiche ergeben sich aus der Schnittmenge der minimal erforderlichen Ansprüche der Baumarten des jeweiligen WEZ.

Über die grundsätzlichen WEZ-Empfehlungen auf Basis der standörtlichen und klimatischen Grundlage hinaus, ist der Algorithmus in der Lage Restriktionen bei der Baumartenklassifizierung oder der WEZ-Empfehlung zu berücksichtigen. Die Gründe für die Anwendung von Restriktionen können vielfältig sein. Neben strategischen können auch waldwachstumskundliche oder physiologische Gesichtspunkte eine Rolle spielen, die durch Standortwasserbilanz und Trophie nur bedingt erfasst werden können. Für die Empfehlung in Hessen wurden daher folgende Restriktionen bezüglich der Baumartenklassifizierung vorgenommen:

- Im Bereich der SWB-Stufe ≥ 0 mm sind die dort ggf. ebenfalls standortgemäßen Baumarten Kiefer und Schwarzkiefer nicht eingeordnet, weil dieser Standortsbereich flächenmäßig stark schrumpft und Baumarten mit höheren Ansprüchen an die Wasserversorgung vorbehalten bleiben sollte.
- Die SWB-Stufe -50 bis -100 mm bildet den mittleren Trockenstressrisikobereich der Buche ab. Mit Blick auf die Bedeutung der Buche in Hessen und für den Naturschutz wurde hier für die ganze Stufe noch führende Buche vorgesehen, die i.d.R. aus Naturverjüngung hervorgeht.
- Im Bereich der SWB-Stufen ≥ 0 bis -150 mm ist keine führende Sandbirke vorgesehen, um diesen Standortsbereich für Baumarten mit höheren Ansprüchen an die Wasserversorgung und besseren Ertragsaussichten zu reservieren.
- Im Bereich SWB -100 bis -150 mm ist die Vogelkirsche nicht als führend eingestuft, weil die Leistung und Vitalität mit abnehmender Wasserversorgung deutlich sinkt.
- Im frischeren Bereich (SWB > -100 mm) ist keine führende Winterlinde vorgesehen, um ertragreicheren Baumarten Planungsfläche zu reservieren.

- Auf den reichen Kalkstandorten sind mehrere Baumarten ausgeschlossen, um Rotfäule oder Ernährungsungleichgewichten vorzubeugen.

Das breite Anbauspektrum der gut an den Klimawandel angepassten Esche berücksichtigt nicht das biotische Risiko des Eschen-Triebsterbens. In der Regel werden unter heutigen Bedingungen keine Eschen gepflanzt und auch im Fall von Naturverjüngung keine Bestände mit führender Esche angestrebt. Ein Ausschluss der Esche ist aber ebenso falsch.

Im Verlauf des Klimawandels ist außerdem zu erwarten, dass sich in den höheren Lagen des Berglandes die klimatischen Bedingungen für bestimmte Baumarten mit der Zeit verbessern werden. Da zunächst aber noch mit den für diese Lagen typischen Gefährdungen durch Schnee und Frost gerechnet werden muss, gelten für die Begründung und Etablierung der Eichenarten Anbaugrenzen, die dynamisch anhand von Temperatursummen modelliert wurden. Ein entsprechender Hinweis wird im BaEm (siehe Kapitel 3.5.1) angezeigt.

Ergänzend ist darauf hinzuweisen, dass die Potenzialabschätzung der Baumarten keine Restriktionen berücksichtigt, die sich aus Schutzgebiets- und Zertifizierungsaufgaben ergeben. Grundsätzlich wird nicht zwischen natürlicher und künstlicher Bestandesbegründung unterschieden. Dies muss betrieblich unter Einbeziehung der waldbaulichen Ausgangslage entschieden werden.

3.4.2. Entwicklung neuer WEZ Kataloge

Waldentwicklungsziele (WEZ) beschreiben verschiedene Mischwälder, in denen Baumarten, die in ihren ökologischen Ansprüchen sowie in ihrem Wuchsverhalten zueinander passend kombiniert werden. Oft entsprechen diese Mischungen auch der natürlichen Vergesellschaftung. Die Bevorzugung von Mischbeständen dient der Erhöhung der Stabilität und der Risikoreduktion. In einem Waldentwicklungsziel werden das Leitbild des angestrebten Waldaufbaus, seine sukzessionale Stellung sowie die Bedeutung für die Schutz- und Erholungsfunktion beschrieben. Darüber hinaus werden Ziele für die Holzerzeugung in Form von angestrebten Zielstärken in bestimmten Produktionszeiträumen festgelegt. Die das Waldentwicklungsziel prägenden Baumartenanteile werden, unterschieden nach Verjüngungs- und Entwicklungsziel, in prozentualen Anteilen angegeben.

Im Zuge des Projektes L12 wurde der für den Staatswald bestehende Katalog für Waldentwicklungsziele überarbeitet (Nowack *et al.*, 2023) und zusätzlich ein auf die Bedürfnisse der Kommunal- und Privatwaldbesitzenden zugeschnittener und mit Vertretern des Hessischen Waldbesitzerverbandes abgestimmter Katalog erstellt (Döbbeler *et al.*, 2023). Der Waldentwicklungszielkatalog für den Kommunal- und Privatwald zum Stand Mai 2023 umfasst 32 WEZ und zusätzliche zwei Sonder-WEZ. Neu hinzugekommen sind die WEZ 19, 39, 20 R und 50 R (Anhang A.7). Der Katalog für den Staatswald enthält aufgrund der FSC-Zertifizierung geringfügige Abweichungen und kann bei HessenForst eingesehen werden.

3.5. Übertragung der Ergebnisse in die Praxis

Die im Projekt erarbeiteten Ergebnisse und Erkenntnisse sollten so schnell und effizient wie möglich in die Praxis überführt werden. Dies geschah und geschieht weiterhin auf verschiedenen Ebenen. Zunächst waren durch die Zusammensetzung der Projektteilnehmer mit HessenForst und dem Hessischen Waldbesitzerverband bereits erfahrene Praktiker an der Entwicklung und Interpretation der Ergebnisse beteiligt. So war von Anfang an gewährleistet, dass das bereits anerkannte Wissen der Praktiker aktiv in die Entwicklung neuer Ergebnisse einfließt. Somit wurde bereits die erste Validierung im Projekt durchgeführt noch bevor die Ergebnisse der breiten Öffentlichkeit zugänglich gemacht wurden. Diese erhöhte die Akzeptanz der entwickelten Baumartenempfehlungen beträchtlich.

Eine weitere Ebene des Wissenstransfers liegt in einer leicht verständlichen Dokumentation sowie der öffentlichen Bereitstellung der Ergebnisse in einer Form, dass die Waldbesitzenden mit diesen transparent ihre Entscheidungen treffen können. Als geeignetes Werkzeug wurde daher ein Entscheidungsunterstützungssystem (DSS) konzipiert. Dieses ist öffentlich über ein Webportal an der NW-FVA zu erreichen, in welchem die Waldbesitzenden einfach ihre Bestände identifizieren und die im Projekt entwickelten Baumartenempfehlungen (BaEm) abrufen können. Für eine noch leichtere Handhabung des System wurde zusätzlich ein mobile Version für Android und Apple Mobiltelefone entwickelt. Mit diesen Applikationen ist das Auffinden der Bestände über die GPS Funktion des Telefons am einfachsten zu bewerkstelligen.

Da trotz guter Dokumentation und vielen Rückmeldungen durch die Praktiker immer noch Fragen offen bleiben, werden als dritte Stufe des Wissenstransfers aktive Schulungen zur Nutzung, dem Umgang sowie der Interpretation der Empfehlungen des DSS angeboten. Die Schulungen wurden in enger Zusammenarbeit mit HessenForst konzipiert und durchgeführt. Bereits zum jetzigen Zeitpunkt (August 2023) wurden diese von zahlreichen Waldbesitzenden in Anspruch genommen. Die Schulungen werden auch weiterhin durch die NW-FVA und HessenForst angeboten.

Abschließend sind im Bereich Wissenstransfer auch die Präsentation des Projektes und des DSS auf Tagungen („KWF-Thementagen in Jessen“ – 2022), als Schulung beim RP-Darmstadt (2022), auf verschiedenen Veranstaltungen des Hessischen Waldbesitzerverbandes (2020 – 2023) sowie auf dem „Tag der offenen Tür der NW-FVA“ (2022) zu nennen.

3.5.1. Entscheidungsunterstützungssystem „BaEm“

Das im Projekt entwickelte Entscheidungsunterstützungssystem zu den Baumartenempfehlungen („BaEm“) für alle Waldstandorte Hessens kann über die Homepage der NW-FVA (<https://www.nw-fva.de/>) aufgerufen werden. Hier befindet sich das Webportal unter dem Punkt „Baumartenempfehlungen“. Auf der nächsten Seite ist dann Hessen auszuwählen. Dort bekommt man eine Kurzanleitung zur Benutzung sowie ein Video zur „Einführung in den Web Service“. Weiterhin findet man auf dieser Seite die „Waldentwicklungsziele (WEZ) für den hessischen Kommunal- und Privatwald“, Begriffserklärungen sowie begleitende Lehr- und Erklärvideos zur praktischen Anwendung der Baumartenempfehlungen für exemplarisch ausgewählte Fälle. Da der Service einer fortwährenden Weiterentwicklung unterliegt, wird das Datum des Stands angegeben und der Änderungsverlauf kann eingesehen werden. Mit Stand Mai 2023 stehen unter dem Punkt „Aktualisierungen BaEm Hessen“ der Änderungsverlauf sowie ergänzende Informationen „Zur Eichenhöhengrenze“ und „Zur Einschränkung der Weißtanne auf wechselfeuchten Standorten“ als Download zur Verfügung (siehe auch A.5, A.6). Über diese Webseite ist es auch möglich Rückmeldungen und Anmerkungen zum Web-Service direkt an die NW-FVA zu senden.

Neben der öffentlichen Präsentation der Ergebnisse auf dem Webportal der NW-FVA wurden die Ergebnisse auch in das forstbetriebliche GIS von HessenForst integriert. In diesem wurden noch weitere betriebsspezifische Anpassungen durchgeführt, um den speziellen Bedingungen von HessenForst gerecht zu werden. Dies ist ein gutes Beispiel dafür, wie solche Systeme erweitert und im betrieblichen Umfeld eingesetzt werden können.

3.5.2. Mobile Version des DSS „BaEm“

Die Baumartenempfehlungen werden auch als sogenannter REST-WEB-Service¹ („REpresentational State Transfer“) und als WMS Service² (Web Map Service) angeboten. Somit kann

¹<https://nw-fva.de/BaEm/rest/v1/>

²<https://www.nw-fva.de/BaEm/wms?request=GetCapabilities&version=1.3.0>

das DSS direkt in bestehende Softwareprodukte (z.B. Betriebs- /Fachanwendungen) integriert werden. Die Konzeption, die Implementierung, die laufende Wartung und das Hosting des gesamten Systems erfolgen an der NW-FVA.

Als Ergänzung zum Webportal wurde im Rahmen des Projektes L11 („Klimasensitive Forstwirtschaft mit Breitenwirkung: Digitaler Wissenstransfer“) jeweils eine Software (Applikation bzw. App) für die weit verbreiteten Betriebssysteme für mobile Geräte Android und iOS (Apple) entwickelt (Hansen, 2021; Sauer, 2021).

Das Konzept der beiden mobilen Anwendungen basiert auf zwei Hauptkomponenten. Das Fundament bildet der erweiterte REST-Service des Webportals „BaEm“ (Abb. 27). Dieser wurde um Funktionen erweitert, welche die Anwendungen mit allen notwendigen Daten und Medien für die positionsspezifischen Baumartenempfehlungen versorgen. Die REST-Architektur basiert auf dem HTTP-Protokoll und dient vor allem der Maschine-zu-Maschine-Kommunikation. Der Service läuft verteilt auf mehreren Applikationsservern hinter einem Load-Balancer. So können bis zu einer gewissen Anfrageanzahl stabile Antwortzeiten gewährleistet werden. Die Server werden direkt an der NW-FVA gehostet. Die Basis-URL für den Service ist: <https://www.nw-fva.de/BaEm/rest/v1>. Eine Auswahl der wichtigsten verfügbaren Funktionen wird in Tabelle 11 dargestellt und erläutert.

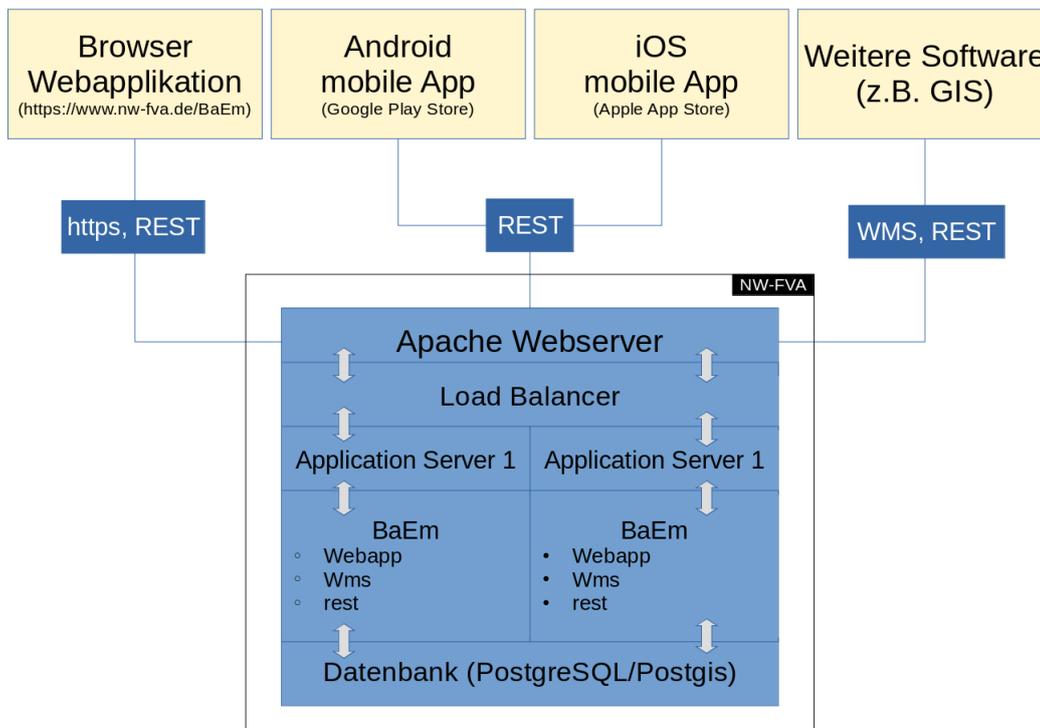


Abb. 27: Das IT-Konzept des Entscheidungsunterstützungssystems „BaEm“ (DSS **B**aumarten**E**mpfehlungen).

Die Implementierung der grafischen Benutzeroberfläche (GUI) für die Betriebssysteme iOS und Android bildet zum REST-Service die zweite Komponente bzw. das mobile Gegenstück. Die GUI kapselt die Nutzeranfragen und leitet sie an den REST-Service weiter. Die Antwort des Service wird in der App ausgewertet, aufbereitet und in der jeweiligen GUI dargestellt. Realisiert wurde die iOS-App in der Programmiersprache „swift“. Die Android-Version wurde in Java implementiert. Die beiden Apps sind im „Google play StoreTM“ bzw. im „Apple App StoreTM“ mit dem Suchbegriff „nw-fva“, „Baumartenwahl“ o.ä. zu finden.

Der hier verwendete Server-Client-Ansatz impliziert, dass die Apps selbst nicht mit dem Datensatz zu den Baumartenempfehlungen ausgestattet sind und die Empfehlungsdaten erst bei einer konkreten Nutzeranfrage vom Server über die REST-Schnittstelle ausgeliefert werden.

Tab. 11: Funktionen des REST Services der NW-FVA

| Befehl | Erklärung |
|--------------------------|---|
| <i>/recomm_xy</i> | Abrufen einer Empfehlung zu einer gegebenen Koordinate |
| <i>/recomm_wkt</i> | Abrufen von Empfehlungen zu einer im WKT-Format (well known text) angegebenen Geometrie |
| <i>/recomm_wkb</i> | Abrufen von Empfehlungen zu einer im WKB-Format (well known binary) angegebenen Geometrie |
| <i>/county_supported</i> | Prüft, ob ein Bundesland unterstützt wird |
| <i>/target_type_info</i> | Liefert weiterführende Informationen zu einem Zieltyp (WEZ) aus |
| <i>/target_type_diag</i> | Liefert ein Diagramm zum Empfehlungsbereich (Wasserbilanz/Nährstoffversorgung) eines Zieltyps aus |
| <i>/shapefile</i> | Liefert die Empfehlungen in Form eines Shape-Files für eine gegebene Bounding Box aus. |
| <i>/changelog</i> | Liefert eine Änderungshistorie aus |

Dies hat mehrere Vorteile: Zum einen ist der Speicherbedarf für die App auf dem Endgerät sehr gering, zum anderen muss so nicht nach jeder Datenaktualisierung ein Update der App durchgeführt werden. Darüber hinaus können über die Versionierung des REST-Services (nicht der Daten) auch grundlegende Änderungen der hinterlegten Verfahren zur Ableitung der Baumartenempfehlungen problemlos implementiert und bei Bedarf parallel angeboten werden.

Ein herausragender Vorteil der Apps gegenüber dem Webportal ist die Positionsermittlung eines Waldbestandes über GPS. Sie ermöglicht bei Internetempfang den sofortigen Informationsabruf vor Ort, sodass eine Abschätzung der waldbaulichen Ausgangssituation direkt mit dem Standort verknüpft werden kann. Ohne Empfang wird der gewählte Standort gespeichert und kann zu einem späteren Zeitpunkt samt zugehörigen Informationen abgerufen werden. Die Positionsermittlung ist besonders hilfreich bei fehlender Waldeinteilung bzw. Kartengrundlage oder bei schwieriger Grenzziehung, beispielsweise im kleinparzellierten Privatwald.

3.5.3. Schulungen

Im Projekt wurden und werden Schulungen auf zwei Wegen angeboten und durchgeführt. Zunächst einmal gibt es die allgemeinen Schulungen für den Privatwald von der NW-FVA in enger Zusammenarbeit mit HessenForst. Eine gesonderte Ebene stellen die Schulungen bei HessenForst dar, da hier neben den inhaltlichen Aspekten des DSS auch noch betriebsinterne Anpassungen und Interpretationen geschult werden.

NW-FVA

Da mit dem Projektpartner HessenForst bereits die Schulung der staatlichen Stellen abgedeckt wird, konzentrierten sich die Schulungen der NW-FVA auf die privaten und kommunalen Waldbesitzenden. Waldbesitzenden und Forstleuten werden die Projektergebnisse kontinuierlich durch verschiedene zur Verfügung stehende Mittel wie Lehrgänge, Vorträge, Publikationen, Werbung und Lehr- und Erklärvideos nahe gebracht. Die Schulungen wurden immer in enger Zusammenarbeit mit dem Hessischen Waldbesitzerverband beworben, sodass zahlreiche Schulungen in verschiedenen Teilen Hessens angeboten und durchgeführt werden konnten.

Ein wichtiges Element bei den Schulungen ist auch die Schulung der Waldbesitzenden durch online angebotene Lehr- und Erklärvideos. Neben den auf dem Webportal des DSS „BaEm“

bereits angebotenen Lehrvideos sind weitere in Zusammenarbeit mit der Firma „ForstErklärt“ zu weiteren Waldentwicklungszielen in Hessen in Planung.

HessenForst

Bei HessenForst hat der Wissenstransfer zu Beginn insbesondere in Form von Theorieschulungen stattgefunden. Diese sind für die Forsteinrichterinnen und -einrichter, für Waldbautrainerinnen und -trainer, für Referendarinnen und Referendare sowie für Anwärtnerinnen und Anwärtler durchgeführt worden. Die Waldbautrainerinnen und -trainer integrieren die geschulerten Inhalte seitdem in Waldbautrainings mit unterschiedlichen thematischen Schwerpunkten (Wiederbewaldung, Pflege, Waldumbau). Mittels Onlineschulungen konnte anschließend in allen Forstämtern die Theorie sowie die Anwendung der neuen Informationsmaterialien, bspw. der Standortwasserbilanzkarte oder der Baumartenpotenzialkarten, im betriebseigenen GIS geschult werden.

Auch die ersten Outdoorschulungen konnten in den Forstämtern realisiert werden. Hierbei wurden unterschiedliche Standorte und waldbauliche Ausgangssituationen für die Schulungen genutzt, um verschiedene waldbauliche Behandlungen und damit verbunden den Weg zum jeweils gewählten Waldentwicklungsziel zu besprechen. Die Outdoorschulungen werden auch im Jahr 2023 weitergeführt.

Im Forstamt Weilrod hat außerdem eine Schulung mit einer kurzen Einführung in die Theorie und anschließendem Outdooranteil für den betreuten Kommunal- und Privatwald (KuPW) stattgefunden. Zukünftig soll jährlich eine Schulung im internen Bildungsprogramm von HessenForst angeboten werden, um insbesondere neue Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter zu schulen. Das Verfahren der klimaangepassten Baumartenwahl ist außerdem als fester Bestandteil in das Ausbildungsprogramm der Anwärtnerinnen und Anwärtler sowie der Forstreferendarinnen und -referendare integriert.

Veranstaltungen wie die Jahrestagung des Hessischen Forstvereins wurden genutzt, um auch hier das Verfahren der klimaangepassten Baumartenwahl in Hessen vorzustellen. Auf der 5. Hessischen Landesnaturschutztagung wurden auf einem Poster die Inhalte der klimaangepassten Baumartenwahl vorgestellt. Intern wurden sowohl in der Mitarbeiterzeitung als auch in IT-Infos über die Neuerungen und die Möglichkeit zur Schulung informiert.

3.6. Abschlussarbeiten

In einer Masterarbeit an der Hochschule für angewandte Wissenschaft und Kunst (HAWK) in Göttingen wurden von Frau Braun (2023) Strategien zur Förderung von Bekanntmachung und Nutzung der Entscheidungshilfen für den Kommunal- und Privatwald entwickelt. Aufbauend auf den Ergebnissen einer Umfrage unter Waldbesitzenden und -beratenden konnte geschlossen werden, dass unter den Teilnehmenden zunächst zwar ein hoher Beratungsbedarf besteht, die klimaangepassten Baumartenempfehlungen aber noch nicht als neuer Standard etabliert sind. Fachzeitschriften, Forstämter und die NW-FVA sind geeignet, das Projekt zu bewerben. Die Zielgruppe der Entscheidungsträger im Wald ist sehr heterogen, weshalb eine breit ausgelegte Öffentlichkeitsarbeit über verschiedene Medien empfohlen wird. Vor-Ort-Schulungen werden präferiert, aber auch Lehrvideos sind gewünscht. Für den weiteren Wissenstransfer sollen die sehr wertvollen Hinweise berücksichtigt werden.

4. Schlussfolgerungen & Ausblick

Im Rahmen des Integrierten Klimaschutzplan Hessen 2025 wurde das Projekt „Klimarisiko- und Zielbestockungskarten Forst – Verbesserte Beratungsgrundlagen für neue Herausforderungen an hessische Waldbesitzer“ als das erste Projekt in der Maßnahme L-12 gestartet. Mit einer Laufzeit von fünf Jahren für den wissenschaftlichen Teil und noch zwei weiteren Jahren für den Wissenstransfer wurden umfangreiche Geldmittel für dieses Projekt bewilligt.

Die Projektziele sind im Wesentlichen erfüllt und in einigen Teilaspekten sogar übertroffen worden. Letzteres bezieht sich auf das entwickelte DSS „BaEm“, welches sich großer Beliebtheit unter den Waldbesitzenden erfreut. Die Akzeptanz des Webportals zeigt sich in der hohen Anzahl an Aufrufen und Rückmeldungen. Die mobile Version wurde bereits mehr als 750 mal installiert (Stand: August 2023). Neben den Waldbesitzenden der Privaten und Kommunalwälder werden die Empfehlungen auch bei HessenForst (als Projektpartner) intensiv genutzt.

Neben der Aufarbeitung der neuen Klimaszenarien war die Überarbeitung und Auffüllung der forstlichen Standortkartierung eine wesentliche Voraussetzung für den Erfolg des Projektes. Im Bereich der von HessenForst betreuten Wälder wurde vor allem die Ausweisung der Trophie mit Hilfe der „Fuzzy Logic“ stärker differenziert. Dies erlaubt eine feiner abgestimmte Waldbauplanung als die bisherige Karte. Da diese neue Trophieeinschätzung auf der Grundlage verschiedener Datensätze erfolgt, steht als nächstes noch die Validierung besonderer streitiger Standorte im Gelände an. Da dies nur mit einem hohen Personal- und Zeitaufwand erfolgen kann, werden sich hierbei auch nur langfristig Präzisierungen zu erwarten sein. Diese müssen dann in das System der NW-FVA wieder integriert werden, um eine verbesserte Vorhersage abzuleiten.

Die aktuelle Version des DSS „BaEm“ verwendet für die Ableitung der Empfehlungen vor allem die Einschätzung des Trockenstressrisikos nach Böckmann *et al.* (2019) (Tab. 10). Daneben wird bereits in der aktuellen Version auch die Spätfrostgefährdung der Eiche als auch die spezielle Eignung der Weißtanne auf hydromorphen Standorten berücksichtigt. Im betrieblichen GIS von HessenForst wird zusätzlich noch das Schiefervorkommen als Ausschlußkriterium für die Kiefer verwendet. Somit kann das bestehende System bereits als multikriterielles System verstanden werden. Es wurden jedoch in der Projektlaufzeit weitere Kriterien für die Baumarten- und WEZ-Auswahl entwickelt. Hier wurde in den Bereichen Wachstumsmodellierung, Sturmwurfgefährdung, biotische Risiken als auch in der Waldbrandgefährdung gute Kriterien entwickelt. Diese sollen in der nächsten Version in die multikriterielle WEZ Auswahl einfließen.

Die neueren Entwicklungen der Klimafolgenforschung in Deutschland machen außerdem eine Anpassung des waldbaulichen Entscheidungsalgorithmus (siehe Kapitel 3.4.1) notwendig. Da die bisherige klimaangepasste Baumartenempfehlung einzig auf dem regionalisierten STARS II-Modell mit dem Globalmodell ECHAM6 beruht, wurde der Fokus der Weiterentwicklung des Algorithmus auf die Einbindung von Ensembles regionaler Klimaprojektionen gelegt. Explizit ist hier das ReKliEs-DE Kernensembles (siehe Kapitel 3.1) gemeint, welches sieben Klimamodelle beinhaltet. Die Herausforderung bestand dabei auf den Verzicht der Bildung von Mittelwert oder Median und einer daraus abgeleiteten Baumartenempfehlung, da die Eintrittswahrscheinlichkeit der einzelnen Klimamodelle als gleich anzusehen ist. Die Nutzung von Lageparametern würde diese Aussage verwischen.

In der nächsten Version wird daher für jede Klimaprojektion des Ensembles eine eigene Baumartenempfehlung berechnet. Durch Bildung von absoluten Häufigkeiten (H_7) für die jeweiligen Mischbestandstypen kann somit über die gesamte Bandbreite des Ensembles die Empfehlung mit Robustheitsgraden angegeben werden. Vereinfacht gesagt bedeutet dies, dass

je höher der Robustheitsgrad ist, desto mehr Klimamodelle empfehlen einen bestimmten Mischbestandstyp.

Für eine übersichtliche und nachvollziehbare Darstellung der Robustheitsgrade werden diese in vier Gruppen unterteilt. Die Schwellenwerte der jeweiligen Gruppen wurden auf Basis der Zusammensetzung des ReKliEs-DE Kernensembles getätigt, um die darin enthaltenen Modellfamilien (statistisch oder dynamisch) angemessen berücksichtigen zu können. Das Kernensemble besteht aus sieben Klimäläufen mit zwei statistischen und fünf dynamischen Regionalmodellen, wobei die statistischen Regionalmodelle grundsätzlich zu einer pessimistischeren Einschätzung des Klimas kommen. Eine sehr klimarobuste Baumartenempfehlung mit einer absoluten Häufigkeit ≥ 6 beinhaltet somit immer mindestens ein statistisches Modell, während dies bei der klimarobusten und bedingt klimarobusten Empfehlung nicht zwingend der Fall ist. Bei einer absoluten Häufigkeit von ≤ 2 wird die Robustheit als zu gering angesehen, um sie in eine Empfehlung aufnehmen zu können.

Da umfangreiche, schriftliche Dokumentationen zwar hilfreich aber doch nicht für jeden Waldbesitzenden geeignet sind, sollen weiterhin Schulungen angeboten und Lehrvideos erstellt werden. So wird zur Zeit das Schulungsangebot für das Jahr 2023 für kommunale und private Waldbesitzer wurde intensiv über verschiedene Medien beworben: Anzeigen in den Zeitschriften „Landwirtschaftliches Wochenblatt“ und „Deutscher Waldbesitzer“, einer Anzeige auf der Homepage der NW-FVA sowie auf der des Hessischen Waldbesitzerverbandes. Weitere Lehrvideos zur Verwendung des DSS als auch zu speziellen Waldbildern und ihren möglichen WEZ werden kontinuierlich auf der Homepage der NW-FVA neu zur Verfügung gestellt.

5. Literatur

- Ad-hoc-AG Boden. (2006): *Konzept für eine Vereinheitlichung der Bodenkarte 1:50.000 (BK50)*. Königswinter.
- Ahrends, B., Hafner, S., Evers, J., Steinicke, C., Schmidt, W., & Meesenburg, H. (2016): Regionalisierung bodenphysikalischer Parameter für Waldstandorte in Sachsen-Anhalt—Unsicherheitsbetrachtung an Standorten verschiedener Umweltmessnetze. *Beiträge aus der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt*, 14, 1–13.
- Ahrends, B., Heitkamp, F., Buresch, M., Evers, J., Hentschel, S., Bialozyt, R., & Meesenburg, H. (2023): Neue Herausforderungen an das Waldmanagement: Möglichkeiten und Grenzen des „Digital Soil Mapping“ bei der Bereitstellung flächenhafter Datensätze für die Forstplanung am Beispiel von Hessen. *Allgemeine Forst- und Jagd-Zeitung*, 192, 193–218.
- AK Standortkartierung. (1996): *Forstliche Standortaufnahme: Begriffe, Definitionen, Einteilungen, Kennzeichnungen, Erläuterungen* (5. Aufl.). IHW-Verlag.
- AK Standortkartierung. (2016): *Forstliche Standortaufnahme: Begriffe, Definitionen, Einteilungen, Kennzeichnungen, Erläuterungen* (7. Aufl.). IHW-Verlag.
- Albert, M., Leefken, G., Nuske, R. S., Ahrends, B., Suttmöller, J., & Spellmann, H. (2016): Auswirkungen von klimatischer Unsicherheit auf die Forstplanung am Beispiel von vier Regionen im norddeutschen Tiefland. *Allgemeine Forst- und Jagd-Zeitung*, 187, 161–185.
- Albert, M., Nagel, J., Schmidt, M., Nagel, R.-V., & Spellmann, H. (2022): Eine neue Generation von Ertragstafeln für Eiche, Buche, Fichte, Douglasie und Kiefer.
- Albert, M., Nagel, R.-V., Nuske, R. S., Suttmöller, J., & Spellmann, H. (2017): Tree species selection in the face of drought risk—uncertainty in forest planning. *Forests*, 8(10), 363.
- Alfons, A. (2012). *cvTools: Cross-validation tools for regression models* (Version 0.3.2). <https://cran.r-project.org/web/packages/cvTools/>
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998): *Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements*. FAO - Food; Agriculture Organization of the United Nations.
- Arrouays, D., McBratney, A., Bouma, J., Libohova, Z., Richer-de-Forges, A. C., Morgan, C. L., Roudier, P., Poggio, L., & Mulder, V. L. (2020): Impressions of digital soil maps: The good, the not so good, and making them ever better. *Geoderma Regional*, 20, e00255.
- Baier, P., Führer, E., Kirisits, T., & Rosner, S. (2002): Defence reactions of norway spruce against bark beetles and the associated fungus *ceratocystis polonica* in secondary pure and mixed species stands. *Forest Ecology and Management*, 159(1), 73–86.
- Behrens, T., Zhu, A.-X., Schmidt, K., & Scholten, T. (2010): Multi-scale digital terrain analysis and feature selection for digital soil mapping. *Geoderma*, 155(3), 175–185.
- Belgiu, M., & Drăguț, L. (2016): Random forest in remote sensing: A review of applications and future directions. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 114, 24–31.
- Bishop, T. F. A., Horta, A., & Karunaratne, S. B. (2015): Validation of digital soil maps at different spatial supports. *Geoderma*, 241-242, 238–249.
- Böckmann, T., Hansen, J., Hauskeller-Bullerjahn, K., Jensen, T., Nagel, J., Nagel, R. V., Overbeck, M., Pampe, A., Petereit-Bitter, A., & Schmidt, M. (2019): Klimaangepasste Baumartenwahl in den Niedersächsischen Landesforsten. *Aus dem Walde—Schriftenreihe Waldentwicklung in Niedersachsen*, 61.
- Braun, S. (2023): *Strategieentwicklung zur Förderung von Bekanntheit und Nutzung der 'Entscheidungshilfen zur klimaangepassten Baumartenwahl für den hessischen Kommunal- und Privatwald' unter Waldbesitzenden* (Masterarbeit). HAWK. Göttingen.

- Brungard, C. W., Boettinger, J. L., Duniway, M. C., Wills, S. A., & Edwards Jr, T. C. (2015): Machine learning for predicting soil classes in three semi-arid landscapes. *Geoderma*, 239, 68–83.
- Chapin III, F. S., Matson, P. A., & Vitousek, P. M. (2011): *Principles of terrestrial ecosystem ecology* (2. Aufl.). Springer.
- Dalelane, C., Früh, B., Steger, C., & Walter, A. (2018): A pragmatic approach to build a reduced regional climate projection ensemble for Germany using the EURO-CORDEX 8.5 ensemble. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 57(3), 477–491.
- Dietrich, H., & Böhner, J. (2008): Cold air production and flow in a low mountain range landscape in Hesse (Germany). *Hamburger Beiträge zur Physischen Geographie und Landschaftsökologie*, 19, 37–48.
- Döbbeler, H., Nagel, R.-V., Spellmann, H., & Hamkens, H. (2023): Waldentwicklungsziele (WEZ) für den hessischen Kommunal- und Privatwald. Empfehlungen der NW-FVA in Zusammenarbeit mit dem Hessischen Waldbesitzerverband. Abgerufen am 9. August 2023 unter https://www.nw-fva.de/fileadmin/nwfva/common/unterstuetzen/pdf/software/WEZ_Katalog_2023.pdf
- Dormann, C. F., Elith, J., Bacher, S., Buchmann, C., Carl, G., Carré, G., Marquéz, J. R. G., Gruber, B., Lafourcade, B., & Leitão, P. J. (2013): Collinearity: a review of methods to deal with it and a simulation study evaluating their performance. *Ecography*, 36(1), 27–46.
- EFFIS. (2023): *Fire Danger Forecast*. Abgerufen am 13. Juli 2023 unter <https://effis.jrc.ec.europa.eu/about-effis/technical-background/fire-danger-forecast>
- Evans, J. S., Murphy, M. A., Holden, Z. A., & Cushman, S. A. (2010): Modeling species distribution and change using random forest. In: *Predictive species and habitat modeling in landscape ecology: Concepts and applications* (S. 139–159). Springer.
- Feigenwinter, I., Kotlarski, S., Casanueva, A., Schwierz, C., & Liniger, M. A. (2018): *Exploring quantile mapping as a tool to produce user-tailored climate scenarios for Switzerland*. MeteoSchweiz.
- Fischer, H. S., Michler, B., Ziche, D., & Fischer, A. (2019): Plants as indicators of soil chemical properties. In: *Status and dynamics of forests in Germany. Results of the National Forest Monitoring* (S. 295–309). Springer Open. https://doi.org/10.1007/978-3-030-15734-0_10
- Fleck, S., Albert, M., Plasil, P., Nagel, R., Suttmöller, J., Ahrends, B., Schmidt, M., Evers, J., Hansen, J., Overbeck, M., Schmidt, W., Spellmann, H., & Meeseburg, H. (2015): Pilotstudie zu den lokalen Auswirkungen des Klimawandels auf die Forstwirtschaft in ausgewählten Regionen Sachsen-Anhalts.
- Friedrich, C., Fohrer, N., & Frede, H.-G. (2002): Quantification of soil properties based on external information by means of fuzzy-set theory. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 165(4), 511–516.
- Fuchs, J. M., Husmann, K., v. Bodelschwingh, H., Koster, R., Staupendahl, K., Offer, A., Möhring, B., & Paul, C. (2022). *woodValuationDE: Wood Valuation Germany (MS Excel version)* (Version 1.0.1). Zenodo.
- Hamkens, H., Spellmann, H., Nagel, R.-V., & Buresch, M. (2020): *Entscheidungshilfen zur klimaangepassten Baumartenwahl im Land Sachsen-Anhalt*.
- Hansen, J. (2021). *Klimaangepasste BaumartenEmpfehlungen* (Version 1.0.3). Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt. Abgerufen am 14. Juli 2023 unter <https://www.nw-fva.de/veroeffentlichen/software/#c894>
- 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, 37–47.
- Heitkamp, F., Ahrends, B., Evers, J., Steinicke, C., & Meeseburg, H. (2020): Inference of forest soil nutrient regimes by integrating soil chemistry with fuzzy-logic: Regionwide application for stakeholders of hesse, germany. *Geoderma Regional*, 23, e00340.

- Hengl, T., Heuvelink, G. B., Kempen, B., Leenaars, J. G., Walsh, M. G., Shepherd, K. D., Sila, A., MacMillan, R. A., Mendes de Jesus, J., & Tamene, L. (2015): Mapping soil properties of Africa at 250 m resolution: Random forests significantly improve current predictions. *PLOS ONE*, 10(6), e0125814.
- HLNUG. (2018): *Erläuterungen zu den Bodenflächendaten und zur Bodenkarte von Hessen 1 : 50 000*. 2. überarbeitete Auflage. Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie.
- HMLUF. (2002): *Hessische Anweisung für Foresteinrichtungsarbeiten* (HAFEA). Hessisches Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Forsten.
- Hübener, H., Bülow, K., Fooker, C., Früh, B., Hoffmann, P., Höpp, S., Keuler, K., Menz, C., Mohr, V., Radtke, K., Ramthun, H., Spekat, A., Steger, C., Toussaint, F., Warrach-Sagi, K., & Woldt, M. (2017): *ReKliEs-De Ergebnisbericht*. Abgerufen am 9. Januar 2020 unter https://cera-www.dkrz.de/WDCC/ui/cersearch/entry?acronym=ReKliEs-De_Ergebnisbericht
- HVBG. (2018): *Amtlich Topografisch-Kartografisches Informationssystem*. Hessische Verwaltung für Bodenmanagement und Geoinformation. <https://hvbh.hessen.de>
- IPCC. (2014): *Climate Change 2013 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Jacob, D., Petersen, J., Eggert, B., Alias, A., Christensen, O. B., Bouwer, L. M., Braun, A., Colette, A., Déqué, M., & Georgievski, G. (2014): EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. *Regional environmental change*, 14, 563–578.
- Jansen, M., Eberl, C., & Beese, F. (2002): Regionalization of soil chemical variables in the Harz mountains. In: M. Jansen, M. Judas & J. Saborowski (Hrsg.), *Spatial modelling in forest ecology and management* (S. 68–86). Springer.
- Joseph, V. R. (2022): Optimal ratio for data splitting. *Statistical Analysis and Data Mining: The ASA Data Science Journal*, 15(4), 531–538.
- Jung, C., & Schindler, D. (2021): Does the winter storm-related wind gust intensity in Germany increase under warming climate?—A high-resolution assessment. *Weather and Climate Extremes*, 33, 100360.
- Jungclaus, J. H., Lorenz, S. J., Timmreck, C., Reick, C. H., Brovkin, V., Six, K., Segschneider, J., Giorgetta, M. A., Crowley, T. J., & Pongratz, J. (2010): Climate and carbon-cycle variability over the last millennium. *Climate of the Past*, 6(5), 723–737.
- Kneib, T. (2006): Mixed model-based inference in geospatial hazard regression for interval-censored survival times. *Computational Statistics & Data Analysis*, 51(2), 777–792.
- Köhler, M., Steinicke, C., Evers, J., Meesenburg, H., & Ahrends, B. (2016): Modelling water and nutrient regime of forests in the framework of the forest site map of Lower Saxony. *Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz (Forest Ecology, Landscape Research and Nature Protection)*, (16), 83–94.
- Korf, V. (1939): Příspěvek k matematické definici vzrůstového zákona hmot lesních porostů. *Lesnická práce*, 18, 339–356.
- Kuhn, M., & Johnson, K. (2013): *Applied predictive modeling*. Springer.
- Landesbetrieb HessenForst. (1999): *Hessische Waldbaufibel – Grundsätze und Empfehlungen zur naturnahen Wirtschaftsweise im hessischen Staatswald*. Hessisches Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft und Forsten.
- Landis, J. R., & Koch, G. G. (1977): The measurement of observer agreement for categorical data. *biometrics*, 159–174.
- Lappi, J. (1997): A longitudinal analysis of Height/Diameter curves. *Forest Science*, 43(4), 555–570.
- Mage, S. M., & Porder, S. (2013): Parent material and topography determine soil phosphorus status in the Luquillo mountains of Puerto Rico. *Ecosystems*, 16(2), 284–294.

- Marini, L., Økland, B., Jönsson, A. M., Bentz, B., Carroll, A., Forster, B., Grégoire, J.-C., Hurling, R., Nageleisen, L. M., Netherer, S., Ravn, H. P., Weed, A., & Schroeder, M. (2017): Climate drivers of bark beetle outbreak dynamics in Norway spruce forests. *Ecography*, 40(12), 1426–1435.
- Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S. L., Péan, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., Goldfarb, L., & Gomis, M. I. (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*, 2.
- Meesenburg, H., Ahrends, B., Fleck, S., Wagner, M., Fortmann, H., Scheler, B., Klinck, U., Dammann, I., Eichhorn, J., Mindrup, M., & Meiwes, K. J. (2016): Long-term changes of ecosystem services at Solling, Germany: Recovery from acidification, but increasing nitrogen saturation? *Ecological Indicators*, 65, 103–112.
- Menzel, A. (1997): *Phänologie von Waldbäumen unter sich ändernden Klimabedingungen: Auswertung der Beobachtungen in den internationalen phänologischen Gärten und Möglichkeiten der Modellierung von Phänodaten*. Ludwig-Maximilians-Universität.
- Möhring, B., Rosenberger, R., Dieter, M., Hartebrodt, C., von Hatzfeldt, N. G., Hillmann, M., Moczia, F., Ontrup, G., & Petkau, A. (2022): Was kosten zunehmende Risiken im Wald? *Holz-Zentralblatt*, 148(48), 842–845.
- Murphy, M. A., Evans, J. S., & Storfer, A. (2010): Quantifying *Bufo boreas* connectivity in Yellowstone National Park with landscape genetics. *Ecology*, 91(1), 252–261.
- Natural Resources Canada. (2023): *Canadian Wildland Fire Information System | Canadian Forest Fire Weather Index (FWI) System*. Abgerufen am 13. Juli 2023 unter <https://cwfis.cfs.nrcan.gc.ca/background/summary/fwi>
- Nowack, S., Weidig, J., Ullrich, T., von Bodelschwingh, H., Schwarz, F., Döbbeler, H., Hans, H., Nagel, R.-V., & Böckmann, T. (2023): Katalog der Waldentwicklungsziele im Hessischen Staatswald.
- Nuske, R. (2022). *vegperiod: Determine Thermal Vegetation Periods* (Version 0.4.0). Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt. Abgerufen am 14. Juli 2023 unter <https://zenodo.org/record/7272438>
- Orlowsky, B., Gerstengarbe, F.-W., & Werner, P. C. (2008): A resampling scheme for regional climate simulations and its performance compared to a dynamical RCM. *Theoretical and Applied Climatology*, 92(3), 209–223.
- Overbeck, M., Schmidt, M., Fischer, C., Evers, J., Schulze, A., Hövelmann, T., & Spellmann, H. (2011): Ein statistisches Modell zur Regionalisierung der nutzbaren Feldkapazität von Waldstandorten in Niedersachsen. *Forstarchiv*, 82(3), 92–100. Abgerufen am 17. November 2014 unter http://www.nw-fva.de/fileadmin/user_upload/Verwaltung/Publikationen/2011/Overbeck_et_al_FOA_2011-Heft3.pdf
- Overbeck, M., & Schmidt, M. (2012): Modelling infestation risk of Norway spruce by *Ips typographus* (L.) in the Lower Saxon Harz Mountains (Germany). *Forest Ecology and Management*, 266, 115–125.
- Paar, U., Evers, J., Damman, I., König, N., Schulze, A., Schmidt, M., Schönfelder, E., Scheler, B., Ullrich, T., & Eichhorn, J. (2016): *Waldbodenzustandsbericht für Hessen. Ergebnisse der zweiten Bodenzustandserhebung im Wald (BZE II)* (Bd. 15). Universitätsverlag Göttingen.
- Peters, G. P., Andrew, R. M., Boden, T., Canadell, J. G., Ciais, P., Le Quéré, C., Marland, G., Raupach, M. R., & Wilson, C. (2013): The challenge to keep global warming below 2 C. *Nature Climate Change*, 3(1), 4–6.
- Puhlmann, H., & von Wilpert, K. (2011): Test und Entwicklung von Pedotransferfunktionen für Wasserretention und hydraulische Leitfähigkeit von Waldböden. *Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz*, 12, 61–71.
- Raffa, K. F., Aukema, B. H., Bentz, B. J., Carroll, A. L., Hicke, J. A., Turner, M. G., & Romme, W. H. (2008): Cross-scale drivers of natural disturbances prone to anthropogenic amplification: the dynamics of bark beetle eruptions. *Bioscience*, 58(6), 501–517.

- San-Miguel-Ayanz, J., Schulte, E., Schmuck, G., Camia, A., Strobl, P., Liberta, G., Giovando, C., Boca, R., Sedano, F., & Kempeneers, P. (2012): Comprehensive monitoring of wildfires in Europe: the European forest fire information system (EFFIS). In: *Approaches to managing disaster-Assessing hazards, emergencies and disaster impacts*. IntechOpen.
- Sauer, J. (2021). *Klimaangepasste Baumartenwahl mobil* (Version 1.23). Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt. Abgerufen am 14. Juli 2023 unter <https://www.nw-fva.de/veroeffentlichen/software/#c894>
- Schaap, M., Wichink Kruit, R. J., Kranenburg, R., Segers, A., Builtjes, P., Banzhaf, S., & Scheuschner, T. (2015): *Atmospheric deposition to German natural and semi-natural ecosystems during 2009* (Project No. (FKZ) 3712 63 240-1). Umweltbundesamt.
- Schaap, M., Hendriks, C., Kranenburg, R., Kuenen, J., Schlutow, A., Nagel, H.-D., & Ritter, A. (2018): *PINETI-3: Modellierung atmosphärischer Stoffeinträge von 2000 bis 2015 zur Bewertung der ökosystem-spezifischen Gefährdung von Biodiversität durch Luftschadstoffe in Deutschland* (Texte Umweltbundesamt Nr. 79/2018). Umweltbundesamt (UBA). Dessau-Roßlau.
- Schmidt, M. (2020): Standortssensitive und kalibrierbare Bonitätsfächer: Wachstumspotenziale wichtiger Baumarten unter Klimawandel. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung*, 190(5), 136–160.
- Schmidt, W., Volker Stüber, Thomas Ullrich, Uwe Paar, Jan Evers, Klaus Dammann, Thomas Hövelmann & Marcus Schmidt. (2015): *Synopse der Hauptmerkmale der forstlichen Standortskartierungsverfahren der Nordwestdeutschen Bundesländer* (Bd. 12). Universitätsverlag Göttingen.
- Scholten, T., Goebes, P., Kühn, P., Seitz, S., Assmann, T., Bauhus, J., Bruelheide, H., Buscot, F., Erfmeier, A., Fischer, M., Härdtle, W., He, J.-S., Ma, K., Niklaus, P. A., Scherer-Lorenzen, M., Schmid, B., Shi, X., Song, Z., von Oheimb, G., ... Schmidt, K. (2017): On the combined effect of soil fertility and topography on tree growth in subtropical forest ecosystems—a study from SE China. *Journal of Plant Ecology*, 10(1), 111–127.
- Schulla, J., & Jasper, K. (2007): Model description wasim-eth. *Institute for Atmospheric and Climate Science, Swiss Federal Institute of Technology, Zürich*.
- Schulz, R., & Asche, N. (2000): *Forstliche Standortkartierung in NRW* (Bd. 1/00).
- Schwappach, A. (1903): Beiträge zur Kenntnis der Wuchsleistung von Birkenbestände n. *Zeitschr. f. Forst-u. Jagdwesen*, 479–484.
- Seidl, R., & Rammer, W. (2017): Climate change amplifies the interactions between wind and bark beetle disturbances in forest landscapes. *Landscape Ecology*, 32(7), 1485–1498.
- Spellmann, H., Suttmöller, J., & Meesenburg, H. (2007): Risikovorsorge im Zeichen des Klimawandels. *AFZ-DerWald*, 23, 1246–1249.
- Stadelmann, G., Bugmann, H., Meier, F., Wermelinger, B., & Bigler, C. (2013): Effects of salvage logging and sanitation felling on bark beetle (*Ips typographus* L.) infestations. *Forest Ecology and Management*, 305, 273–281.
- Stadelmann, G., Bugmann, H., Wermelinger, B., Meier, F., & Bigler, C. (2013): A predictive framework to assess spatio-temporal variability of infestations by the european spruce bark beetle. *Ecography*, 36(11), 1208–1217.
- Staupendahl, K., & Möhring, B. (2011): Integrating natural risks into silvicultural decision models: a survival function approach. *Forest Policy and Economics*, 13(6), 496–502.
- Staupendahl, K., & Zucchini, W. (2011): Schätzung von Überlebensfunktionen der Hauptbaumarten auf der Basis von Zeitreihendaten der Rheinland-Pfälzischen Waldzustandserhebung. *Allgemeine Forst und Jagdzeitung*, 182(7), 129–145.
- Stevens, B., Giorgetta, M., Esch, M., Mauritsen, T., Crueger, T., Rast, S., Salzmann, M., Schmidt, H., Bader, J., & Block, K. (2013): Atmospheric component of the MPI-M earth system model: ECHAM6. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 5(2), 146–172.

- Sutmöller, J., Schönfelder, E., & Meesenburg, H. (2021): Perspektiven der Anwendung von Klimaprojektionen in der Forstwirtschaft. *promet.*, 104, 47–53.
- Sutmöller, J., Spellmann, H., Fiebiger, C., & Albert, M. (2008): Der Klimawandel und seine Auswirkungen auf die Buchenwälder in Deutschland. *Ergeb. Angew. Forsch. Buche*, 3, 135–158.
- Taylor, K. E., Stouffer, R. J., & Meehl, G. A. (2012): An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bulletin of the American meteorological Society*, 93(4), 485–498.
- Taylor, S. (2020): Atmospheric Cascades Shape Wildfire Activity and Fire Management Decision Spaces Across Scales – A Conceptual Framework for Fire Prediction. *Frontiers in Environmental Science*, 8, 527278.
- Thünen-Institut. (2012): *Dritte Bundeswaldinventur—Ergebnisdatenbank*. Abgerufen am 17. Juli 2023 unter <https://bwi.info/>
- Ulrich, B., & Shrivastava, M. B. (1978): Schätzung quantitativer Bodenparameter bei der forstlichen Standortskartierung am Beispiel des hessischen Berglands. *Forstwissenschaftliches Centralblatt*, 97(1), 41–50.
- von Wilpert, K., Hartmann, P., Puhmann, H., Schmidt-Walter, P., Meesenburg, H., Müller, J., & Evers, J. (2016): Bodenwasserhaushalt und Trockenstress. In: *Dynamik und räumliche Muster forstlicher Standorte in Deutschland - Ergebnisse der Bodenzustandserhebung im Wald 2006 bis 2008* (S. 343–386). Johann Heinrich von Thünen-Institut.
- von Wilpert, K. (1990): Die Jahrringstruktur von Fichten in Abhängigkeit vom Bodenwasserhaushalt auf Pseudogley und Parabraunerde: ein Methodenkonzept zur Erfassung standortsspezifischer Wasserstreßdisposition. *Freiburger bodenkundl. Abhandlungen*, 24, 184.
- Wagner, S. (2008): Klimawandel-Überlegungen zu waldbaulichen Strategien. *AFZ-DerWald*, 63(20), 1104–1107.
- WBW. (2021): *Die Anpassung von Wäldern und Waldwirtschaft an den Klimawandel : Gutachten des Wissenschaftlichen Beirates für Waldpolitik* (Oktober 2021). BMEL. <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bund-ibib-bmel-10348>
- Wermelinger, B. (2004): Ecology and management of the spruce bark beetle *Ips typographus* – a review of recent research. *Forest Ecology and Management*, 202(1), 67–82.
- Winham, S. J., Freimuth, R. R., & Biernacka, J. M. (2013): A weighted random forests approach to improve predictive performance. *Statistical Analysis and Data Mining: The ASA Data Science Journal*, 6(6), 496–505.
- Wolff, B., & Riek, W. (2006): *Evaluierung von Verfahren zur Erfassung des Grobbodenanteils von Waldböden – Erarbeitung von Empfehlungen für die Anwendung dieser Verfahren im Rahmen der Bodenzustandserhebung im Wald* (Endbericht).
- Wood, S. N. (2017): *Generalized additive models: an introduction with R*. CRC press.
- Zeppenfeld, T., Jung, C., Schindler, D., Sennhenn-Reulen, H., Ipsen, M. J., & Schmidt, M. (2023): Winter storm risk assessment in forests with high resolution gust speed data. *European Journal of Forest Research*, 142(5), 1045–1058.
- Zhang, Q.-H., Schlyter, F., & Anderson, P. (1999): Green leaf volatiles interrupt pheromone response of spruce bark beetle, *Ips typographus*. *Journal of Chemical Ecology*, 25(12), 2847–2861.
- Zwanzig, L., Zwanzig, M., & Sauer, D. (2021): Outcomes of a quantitative analysis of 48 soil chronosequence studies in humid mid and high latitudes: Importance of vegetation in driving podzolization. *CATENA*, 196, 104821.

A.3. WEZ Zuordnung für hydromorphe Standorte

WEZ-Zuordnungstabelle für hydromorphe (grund- oder stauwasserbeeinflusste) Standorte

| Trophiestufe | WEZ-Zuordnungstabelle für hydromorphe (grund- oder stauwasserbeeinflusste) Standorte | | | | | | | | | |
|---------------------|--|---------------------------------|--|--|---|--|--|--|--|--|
| | Oligotroph | Schwach Mesotroph | Mesotroph | Gut Mesotroph | Eutroph | Kalkeutroph | | | | |
| 5 (feucht) | 71 74 | 20 10 21 13 23 | 10 20 13 21 31 18 23 40 | 10 20 13 21 31 18 23 40 | 10 20 13 21 31 13 23 40 | 10 20 13 21 31 13 23 40 | | | | |
| 6 (wechselfeucht) | 45 71 74 75 | 20 10 21 14 28 18 29 * | 10 20 13 21 31 14 28 39 18 29 | 10 20 13 21 31 14 28 39 18 29 | 10 20 13 21 31 13 23 36 40 14 28 39 18 29 | 20 31 20 31 23 36 40 * 39 55 | | | | |
| 7 (nass) | 45 | 14 45 | 14 40 | 10 13 31 40 | 10 13 31 40 | 10 13 31 40 | | | | |
| 8 (sickerfeucht) | 45 71 74 75 | 20 | 20 23 | 20 31 23 | 20 31 23 | 20 31 23 | | | | |
| 46 (wechseltrocken) | 45 71 74 75 | 10 14 18 | 10 14 18 | 10 14 18 | 71 10 74 13 74 18 | 10 13 31 | | | | |

*WEZ mit führender Buche nur bei einer Stauschicht >1 m unterhalb Geländeoberkante



Erstellt von der NW-FVA
Online veröffentlicht im Mai 2023
www.nw-fva.de

A.4. WEZ Zuordnung für terrestrische Standorte

| WEZ-Zuordnung für terrestrische Standorte | | | | | | | | | |
|---|----------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| WEZ-Zuordnung (Kommunal- und Privatwald) | | | | | | | | | |
| Trophiestufe | Oligotroph | Schwach Mesotroph | Mesotroph | Gut Mesotroph | Eutroph | Kalkeutroph | | | |
| Kl. 9 < -350 mm | 47 74 | 19 47 74 | 19 47 74 | 19 47 74 | 19 47 74 | 19 | 19 | 47 | 19 |
| Kl. 8 -300 bis -350 mm | 47 74 | 19 47 74 | 19 47 74 | 71 74 76 | 71 74 76 | 19 33 47 | 19 | 33 47 | 19 33 47 |
| Kl. 7 -250 bis -300 mm | 47 74 76 | 19 47 74 76 | 10 14 18 19 47 53 67 76 | 10 14 18 19 47 53 67 76 | 10 13 33 39 53 67 76 | 10 13 33 39 53 67 | 10 13 33 39 53 67 | 10 13 33 39 53 67 | 10 13 33 39 53 67 |
| Kl. 6 -200 bis -250 mm | 47 74 76 | 14 47 74 76 | 10 14 18 47 53 67 76 | 10 14 18 47 53 67 76 | 10 13 33 39 53 67 76 | 10 13 33 39 53 67 | 10 13 33 39 53 67 | 10 13 33 39 53 67 | 10 13 33 39 53 67 |
| Kl. 5 -150 bis -200 mm | 47 74 76 | 14 47 74 76 | 10 14 18 47 53 67 76 | 10 14 18 47 53 67 76 | 10 13 33 39 53 67 76 | 10 13 33 39 53 67 | 10 13 33 39 53 67 | 10 13 33 39 53 67 | 10 13 33 39 53 67 |
| Kl. 4 -100 bis -150 mm | 71 74 76 | 10 14 18 47 74 76 | 10 14 18 47 53 67 76 | 10 14 18 47 53 67 76 | 10 13 33 39 53 67 76 | 10 13 33 39 53 67 | 10 13 33 39 53 67 | 10 13 33 39 53 67 | 10 13 33 39 53 67 |
| Kl. 3 -50 bis -100 mm | 71 74 76 | 10 21 25 28 29 45 52 62 65 74 75 76 | 20 21 25 28 29 45 52 62 65 74 75 76 | 20 21 25 28 29 45 52 62 65 74 75 76 | 20 21 25 28 29 45 52 62 65 74 75 76 | 20 21 25 28 29 45 52 62 65 74 75 76 | 20 21 25 28 29 45 52 62 65 74 75 76 | 20 21 25 28 29 45 52 62 65 74 75 76 | 20 21 25 28 29 45 52 62 65 74 75 76 |
| Kl. 2 0 bis -50 mm | 45 52 62 65 74 75 76 | 10 21 25 28 29 45 52 62 65 74 75 76 | 20 21 25 28 29 45 52 62 65 74 75 76 | 20 21 25 28 29 45 52 62 65 74 75 76 | 20 21 25 28 29 45 52 62 65 74 75 76 | 20 21 25 28 29 45 52 62 65 74 75 76 | 20 21 25 28 29 45 52 62 65 74 75 76 | 20 21 25 28 29 45 52 62 65 74 75 76 | 20 21 25 28 29 45 52 62 65 74 75 76 |
| Kl. 1 >= 0 mm | 45 52 62 65 74 75 76 | 10 21 25 28 29 45 52 62 65 74 75 76 | 20 21 25 28 29 45 52 62 65 74 75 76 | 20 21 25 28 29 45 52 62 65 74 75 76 | 20 21 25 28 29 45 52 62 65 74 75 76 | 20 21 25 28 29 45 52 62 65 74 75 76 | 20 21 25 28 29 45 52 62 65 74 75 76 | 20 21 25 28 29 45 52 62 65 74 75 76 | 20 21 25 28 29 45 52 62 65 74 75 76 |

Standortswasserbilanz [in mm]



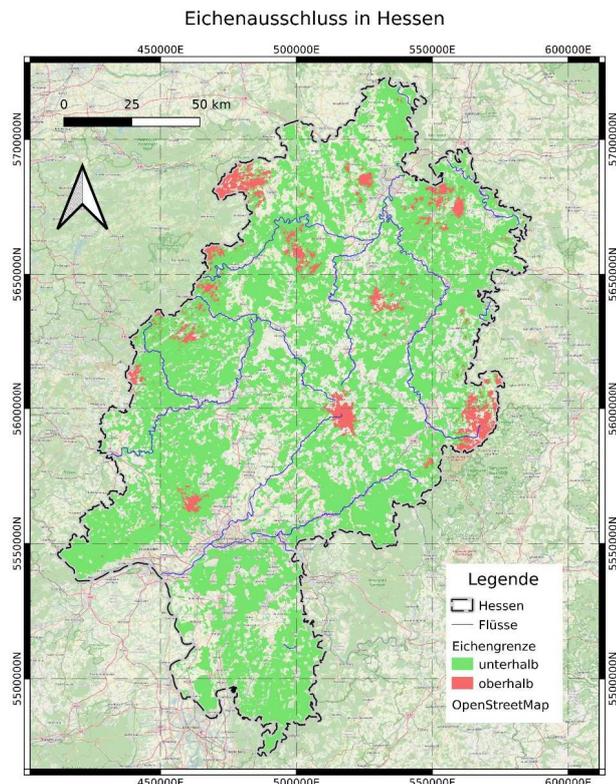
Erstellt von der NW-FVA
 Online veröffentlicht im Mai 2023
 www.nw-fore.de

A.5. Erläuterungen zur Eichenhöhengrenze

Zur Eichenhöhengrenze

(Ergänzung zu Aktualisierungen BaEm Hessen 30.05.2023; siehe Website der NW-FVA unter: <https://www.nw-fva.de/unterstuetzen/software/baem/hessen/>)

Die heimischen Eichenarten weisen für ein wirtschaftlich ausreichendes und waldbaulich interessantes Wachstum die höchsten Ansprüche bzgl. der Wärmesumme unter den Hauptbaumarten auf. Um diesen Standortfaktor bei der Baumartenwahl regional, aber auch kleinstandörtlich besser berücksichtigen zu können, wurde ein neues Verfahren zur Einschätzung der Eignung Forstlicher Standorte für den Eichenanbau entwickelt. Grundlage dieses Verfahrens sind für ganz Hessen regionalisierte, langjährige Mittelwerte der Temperatursumme in der Vegetationsperiode für die Periode 1991-2020. Diese regionalisierten Temperatursummen wurden unter Berücksichtigung der geographischen Lage, der Höhe über dem Meeresspiegel (ü. NHN) sowie der Exposition und Neigung eines Standortes abgeschätzt. Somit lassen sich die Standorte nicht nur entlang großräumiger und höhenzonaler Gradienten, sondern auch kleinstandörtlich z. B. nach Nord- und Südhang differenziert bewerten. Anschließend wurde expertenbasiert ein unterer Grenzwert der Temperatursumme für den Eichenanbau abgeleitet. Dieser Wert entspricht dem Mittelwert der Temperatursumme, die auf 525 m (ü. NHN) auf der Waldfläche Hessens erreicht wurde. Alle Standorte, deren Temperatursummen unterhalb dieses Grenzwertes liegen, wurden vom Eichenanbau ausgeschlossen (s. Abb.).



Als gutachtliche Nebenbedingung wurde festgelegt, dass Eiche in einer Höhenlage unter 350 m immer empfohlen, über 610 m immer ausgeschlossen wird.

Zur Ableitung des Grenzwertes wurden verschiedene Werte der Temperatursumme anhand ihrer Auswirkungen auf die potenzielle Anbaufläche der Eiche verglichen. Neben der sehr viel feineren Differenzierung der Standorte ermöglicht das neue Verfahren auch eine dynamische Anpassung der Eichenanbaugrenze im Klimawandel, in dem anstelle der Werte der Periode 1991-2020 zukünftige Projektionen verwendet werden.

Erstellt von der NW-FVA
Online veröffentlicht: 30.05.2023
www.nw-fva.de

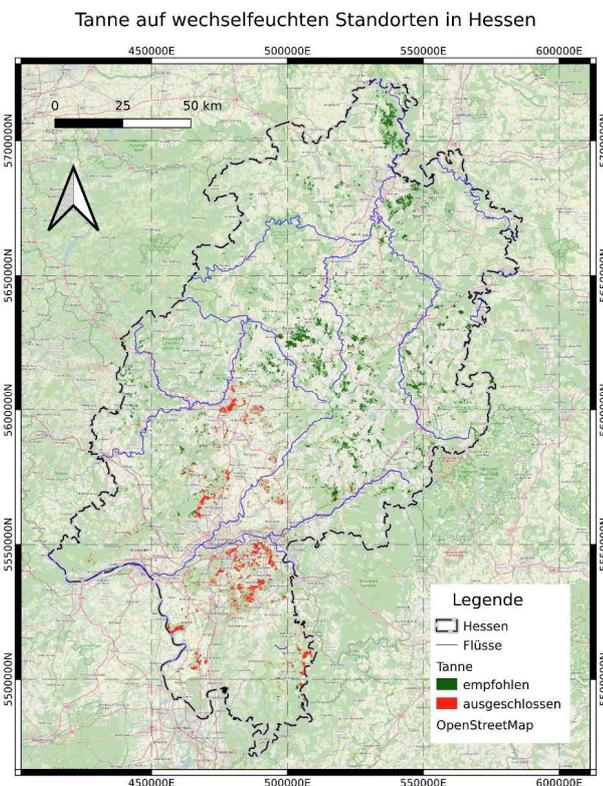


A.6. Weißtanne auf wechselfeuchten Standorten

Zur Einschränkung der Weißtanne auf wechselfeuchten Standorten

(Ergänzung zu Aktualisierungen BaEm Hessen 30.05.2023; siehe Website der NW-FVA unter: <https://www.nw-fva.de/unterstuetzen/software/baem/hessen>)

Die Weißtanne wird aufgrund ihrer ökologischen Eigenschaften in Zukunft eine wichtige Rolle spielen. Allerdings hat sie recht hohe Ansprüche an die Wasserversorgung und wird daher für terrestrische Standorte bis zu einer Standortwasserbilanzklasse von -50 bis -100 mm (Klasse 3) empfohlen. Besonders interessant ist sie für wechselfeuchte Standorte, da sie aufgrund ihrer hohen Durchwurzelungsenergie als eine der wenigen Baumarten neben der Eiche in der Lage ist, Stauchichten zu durchdringen. Für diese Standorte wurden Waldentwicklungsziele bislang nur anhand der Kombination von Geländewasserhaushalt und Nährstoffversorgung empfohlen. Die Standortwasserbilanz spielte im Gegensatz zu den terrestrischen Standorten keine Rolle, denn die nutzbare Feldkapazität hat bei Wechselfeuchte eine geringere Aussagekraft, da alle Bodenporen zumindest temporär mit Wasser gefüllt sind – was künftig allerdings seltener zu erwarten ist.



Dies führte aber dazu, dass insbesondere die Weißtanne regional auch auf Standorten empfohlen wurde, wo sie auch bei einer günstigen Bodenwasserversorgung aufgrund einer im Klimawandel zu erwartenden sehr geringen klimatischen Wasserbilanz nicht mehr angebaut werden sollte.

Um daher differenziertere klimaanangepasste Empfehlungen geben zu können, wurde mit Hilfe der klimatischen Wasserbilanz und einer modellierten nutzbaren Feldkapazität für wechselfeuchte Standorte ein Grenzwert ermittelt, ab welchem die Weißtanne ausgeschlossen wird. Um jedoch den günstigeren Bedingungen bezüglich des Geländewasserhaushalts Rechnung zu tragen, wurde die Empfehlungsgrenze bei -150 mm (Klasse 4) der Standortwasserbilanz gezogen. Die Einschränkung betrifft überwiegend wechselfeuchte Standorte im südlichen Hessen (s. Abb.).

Erstellt von der NW-FVA
Online veröffentlicht: 03.08.2023
www.nw-fva.de



Waldentwicklungsziele (WEZ) für den hessischen Kommunal- und Privatwald

*Empfehlungen der NW-FVA
in Zusammenarbeit mit dem
Hessischen Waldbesitzerverband*

Stand: 26.05.2023



NW-FVA

Nordwestdeutsche
Forstliche Versuchsanstalt



Titel:

Waldentwicklungsziele (WEZ) für den hessischen Kommunal- und Privatwald

Untertitel:

Empfehlungen der NW-FVA in Zusammenarbeit mit dem Hessischen Waldbesitzerverband

Impressum:**Herausgeber:**

Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt
Grätzelstraße 2
37079 Göttingen

Tel.: 0551 / 69401-0

Fax: 0551 / 69401-160

E-Mail: zentrale@nw-fva.de

Internet: www.nw-fva.de

Autoren:

Döbbeler, H.; Nagel, R.-V.; Spellmann, H.; Hamkens, H.

Beteiligte:

Arbeitsgruppe Waldbau (Hess. Waldbesitzerverband): Albus, M.; Block, H.; Becker, M.; Frese, A.; v. Kanitz, H. (Koordination Raupach, C.)

Arbeitsgruppe Boden und Klima: Ahrends, B.; Buresch, M.; Eichhorn, J.; Evers, J.; Heitkamp, F.; Listing, M.; Paar, U.; Meesenburg, H.; Suttmöller, J.

Projektkoordination: Bialozyt, R.

Titelfoto:

Evers, J.

Mai 2023

Inhalt

| | |
|--|----|
| WEZ 10 Eiche-Buche/Hainbuche | 4 |
| WEZ 13 Eiche-Edellaubbäume..... | 5 |
| WEZ 14 Eiche-Birke/Kiefer | 6 |
| WEZ 18 Roteiche-Buche | 7 |
| WEZ 19 Eiche wärmeliebend (thermophil)..... | 8 |
| WEZ 20 Buche | 9 |
| WEZ 21 Buche-Eiche/Roteiche | 10 |
| WEZ 23 Buche-Edellaubbäume | 11 |
| WEZ 25 Buche-Fichte | 12 |
| WEZ 26 Buche-Douglasie | 13 |
| WEZ 28 Buche-Lärche | 14 |
| WEZ 29 Buche-Tanne | 15 |
| WEZ 31 Edellaubbäume (gut wasserversorgte Standorte) | 16 |
| WEZ 33 Edellaubbäume (warme und trockenere Standorte)..... | 17 |
| WEZ 36 Wildkirsche (Bergahorn) | 18 |
| WEZ 39 Edellaubbäume-Tanne | 19 |
| WEZ 40 Roterle..... | 20 |
| WEZ 45 Moorbirke-(Fichte) | 21 |
| WEZ 47 Sandbirke-Kiefer | 22 |
| WEZ 52 Fichte-Buche/Bergahorn | 23 |
| WEZ 53 Küstentanne-Buche | 24 |
| WEZ 54 Fichte-Birke/Eberesche | 25 |
| WEZ 55 Weißtanne-Buche | 26 |
| WEZ 62 Douglasie-Buche | 27 |
| WEZ 65 Douglasie-Fichte-Buche..... | 28 |
| WEZ 67 Douglasie/Küstentanne-Kiefer-Buche | 29 |
| WEZ 71 Kiefer-Eiche | 30 |
| WEZ 72 Kiefer-Buche-Lärche..... | 31 |
| WEZ 74 Kiefer-Birke..... | 32 |
| WEZ 75 Kiefer-Buche-Fichte | 33 |
| WEZ 76 Kiefer-Douglasie-Buche | 34 |
| WEZ 82 Lärche-Buche | 35 |
| Sonder - WEZ 50 R Fichte mit hohem Risiko | 36 |
| Sonder - WEZ 20 R Buche mit hohem Risiko | 38 |

WEZ 10 Eiche-Buche/Hainbuche

Leitbild

Mehrschichtiger Wald aus führender Eiche sowie dienender Buche und Hainbuche im Zwischen- und Unterstand oder gruppen- bis horstweiser Mosaikstruktur unterschiedlichen Alters sowie Begleitbaumarten (u.a. Bergahorn, Eberesche, Birke, Aspe, Weide).

Sukzessionale Stellung/Naturnähe

Entspricht natürlichen Buchen-Eichen-Wäldern der kollinen und submontanen Stufe sowie sekundären Waldgesellschaften auf Buchen-Standorten mit vielfältigen ökologischen Vorteilen.

Schutz und Erholung

Lichte Waldgesellschaften mit reichem Artenspektrum, Höhlenbäumen, Alt- und Totholz sowie hohem Wert für das Landschaftsbild.

Produktionsziele

| | |
|----------------------------|---|
| Eichenwert- und Sägeholz | Zielstärke BHD 70+ cm in 180-240 Jahren |
| Buchen-/Hainbuchensägeholz | Entnahme zur Pflege von Eichen |

Baumartenanteile und Standortsspektrum

Entwicklungsziel

| | |
|--|---------|
| Eichen | 70-80 % |
| Buche/Hainbuche | 10-20 % |
| Begleitbaumarten mit Zwischen- und Unterstand aus Buche/Hainbuche | 10 % |

Verjüngungsziel

| | |
|------------------|----------|
| Eichen | 90-100 % |
| Begleitbaumarten | bis 10 % |

Mischungsform

Buche gruppen- bis horstweise, Hainbuche einzeln- bis gruppenweise sowie truppweise Begleitbaumarten.

Einschränkung des Standortsspektrums

Keine führende Eiche in höheren / kälteren Lagen



WEZ 13 Eiche-Edellaubbäume

Leitbild

Horst- bis kleinflächenweiser, einschichtiger bis mehrschichtiger Eichenwald mit Hainbuche im Zwischen- und Unterstand, in Femeln gruppen- bis kleinflächenweise durchsetzt mit Eschen, Ahornen, Flatterulmen und anderen Edellaubbaumarten, an Rändern auch Wildobst.

Sukzessionale Stellung/Naturnähe

Entspricht der Waldgesellschaft reicher Hainbuchen-Stieleichenwälder mit Edellaubbäumen auf Grund- und Stauwasserböden (FFH-Lebensraumtyp); ehemals in Flussniederungen der natürlichen Waldgesellschaft der Hartholzauenwälder.

Schutz und Erholung

Besonders artenreiche natürliche Waldgesellschaft (u. a. Hartholzau) mit ausgeprägt reichem Artenspektrum, Höhlenbäumen, Alt- und Totholz.

Sehr abwechslungsreiche, vertikal und horizontal mosaikartig strukturierte Wälder.

Produktionsziele

Eichenwert- und Sägeholz
Edellaubwertholz

Zielstärke BHD 70+ cm in 180-240 Jahren
Zielstärke BHD 50+ cm in 70-120 Jahren

Baumartenanteile und Standortsspektrum

Entwicklungsziel

| | |
|------------------|----------|
| (Stiel-)Eiche | 50-70 % |
| Edellaubbäume | 30-40 % |
| Begleitbaumarten | bis 20 % |

mit Zwischen- und Unterstand aus Hainbuche/Buche

Verjüngungsziel

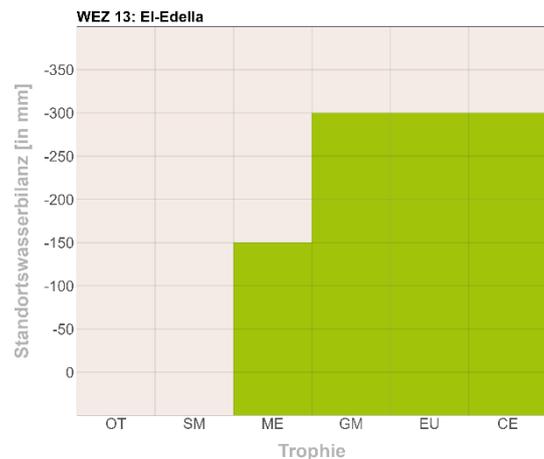
| | |
|------------------|----------|
| (Stiel-)Eiche | 60-80 % |
| Edellaubbäume | 30-40 % |
| Begleitbaumarten | bis 20 % |

Mischungsform

Gruppen bis Kleinflächen von Edellaubbäumen sowie Begleitbaumarten aus zeitlich gestreckter Femelnutzung.

Einschränkung des Standortsspektrums

Keine führende Eiche in höheren / kälteren Lagen



WEZ 14 Eiche-Birke/Kiefer

Leitbild

Ein- und mehrschichtige Wälder aus führender Eiche; Birke oder Kiefer, ferner Buche mit wechselnden Anteilen in allen Schichten sowie weiteren Anteilen sukzessionaler Begleitbaumarten (u.a. Eberesche, Aspe, Weide, Roterle).

Sukzessionale Stellung/Naturnähe

Entspricht zahlreichen Sukzessionsstadien von Birken/Kiefern-Pionierwäldern, Birken-Eichen-Zwischenstadien zu verschiedenen Schlusswaldgesellschaften; natürliche Waldgesellschaft des feuchten Birken-(Buchen)-Stieleichenwaldes auf ärmeren mineralischen Grund- und Stauwasserböden; regional auch auf ärmeren trockenen Sanden.

Schutz und Erholung

Natürliche lichte Waldgesellschaft mit lichtliebendem Artenspektrum von Fauna und Flora, Höhlenbäumen, Alt- und Totholz.

Produktionsziele

Extensive Holzproduktion mit fakultativer Nutzung.

Baumartenanteile und Standortsspektrum

Entwicklungsziel

| | |
|---|---------|
| Eiche | 50-60 % |
| Birke/Kiefer | 20-40 % |
| ggf. Buche und Begleitbaumarten auch im Zwischen- und Unterstand | 10-20 % |

Verjüngungsziel

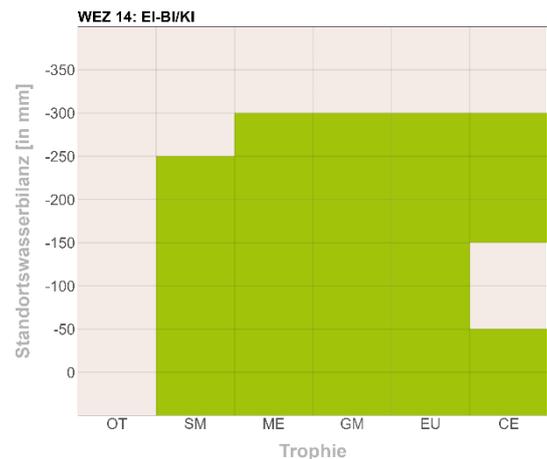
| | |
|------------------|---------|
| Eiche | 50-80 % |
| Birke/Kiefer | 20-40 % |
| Begleitbaumarten | 10-20 % |

Mischungsform

Eichen, Birken und Kiefern (Buchen, Roterlen) gruppen bis kleinflächenweise gemischt.

Einschränkung des Standortsspektrums

Keine führende Eiche in höheren / kälteren Lagen



WEZ 18 Roteiche-Buche

Leitbild

Mehrschichtiger Mischwald aus produktionsbestimmender Roteiche und einzelnen Buchen im Herrschenden sowie im Zwischen- bis Unterstand; Erhöhung der Vertikalstruktur durch Unter- und Zwischenstand der Roteiche; mit Begleitbaumarten der heimischen Vegetation (Birke, Bergahorn, Hainbuche, Winterlinde, Eberesche, Aspe u.a.). Bei hohem Trockenstressrisiko für die Buche können ggf. Hainbuche bzw. Winterlinde die Rolle der Mischbaumart übernehmen.

Das Waldentwicklungsziel stellt eine Alternative zu Nadelbaum-Waldentwicklungszielen dar, da die Roteiche eine höhere Ertragsleistung als andere Laubbaumarten auf schwächer nährstoff- und wasserversorgten Standorten erwarten lässt. Die Risikostreuung basiert auf der besseren Tiefendurchwurzelung der Roteiche und der geringeren Trockenstressgefährdung im Vergleich zu Fichte und Buche.

Sukzessionale Stellung/Naturnähe

Entspricht keiner natürlichen Waldgesellschaft. Ökologisch wirksame Anteile von Buche und weiteren heimischen Laubbaumarten sowie sukzessionalen Begleitbaumarten integrieren die an eine breite klimatische Amplitude gut angepasste Roteiche in das heimische Vegetationspektrum.

Schutz und Erholung

Waldbrandschutz und Laubriegel in der Rhein-Main-Ebene in ausgedehnten Kiefernangebieten; Buchenanteile und andere einheimische Baumarten dienen der Vernetzung mit der heimischen Fauna und Flora. Erhaltung von Höhlenbäumen, Alt- und Totholz. Abwechslungsreiche Laubmischwälder mit schönem Herbstaspekt.

Produktionsziele

| | |
|-------------------|--|
| Roteichenwertholz | Zielstärke BHD 70+ cm in 80-140 Jahren |
| Roteichensägeholz | Zielstärke BHD 60+ cm in 80-120 Jahren |
| Buchensägeholz | Zielstärke BHD 50+ cm in 80-120 Jahren |

Baumartenanteile und Standortsspektrum

Waldbauliche Zielstellung

| | |
|--|----------|
| Roteiche | 60-80 % |
| Buche (ggf. Hainbuche, Winterlinde) | bis 20 % |
| Begleitbaumarten | 10 % |

Verjüngungsziel

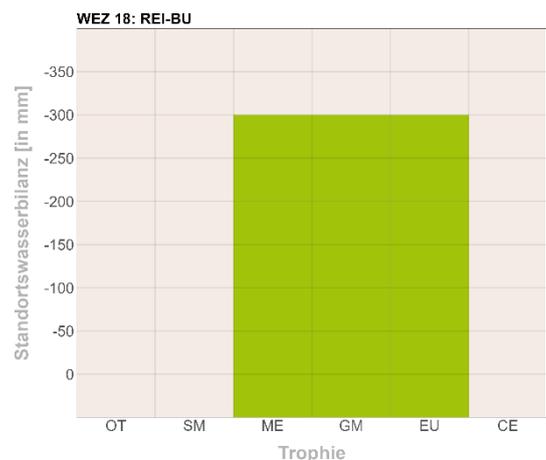
| | |
|--|----------|
| Roteiche | 60-80 % |
| Buche (ggf. Hainbuche, Winterlinde) | 20-40 % |
| Begleitbaumarten | bis 10 % |

Mischungsform

Buche und Begleitbaumarten einzeln bis truppweise.

Einschränkung des Standortsspektrums

Keine führende Eiche in höheren / kälteren Lagen



WEZ 19 Eiche wärmeliebend (thermophil)

Leitbild

Artenreicher Wald aus Flaum- und Traubeneiche, ggf. in Mischung mit Stiel- oder Zerreiche sowie Hainbuche. Auf reicheren Standorten begleitet von Elsbeere, Mehlbeere, Wildobst und Speierling sowie ggf. Schwarzkiefer; Burgenahorn, Feldahorn, Sandbirke, Kiefer und Aspe auf mittleren bis armen Standorten.

Bei sehr geringer Bodenmächtigkeit treten bogige, unschnürige und astige Wuchsformen mit nur geringen Baumhöhen und Durchmessern auf.

Sukzessionale Stellung/Naturnähe

Entspricht natürlichen, stark trockenheitsertagenden, wärme- und lichtliebenden Flaumeichenmischwäldern. Submediterran getönt mit kontinentalen Elementen (Zerreiche). Aus vegetationskundlicher Sicht heute nur als Relikte auf extremen (xerothermen) Standorten vorhanden. Übergang zu Busch- oder Steppenwäldern.

Schutz und Erholung

Lichte Waldgesellschaften mit sehr reichem Artenspektrum und hohem Wert für den Walderhalt im Klimawandel sowie für den Boden- und Erosionsschutz auf besonders trockenen (exponiert, flachgründig) Standorten; letztere i.d.R. mit besonderem Schutzstatus.

Produktionsziele

Bewirtschaftung traditionell als Nieder- oder Mittelwald mit überwiegender Energieholznutzung. Z. T. Sägeholzerziehung möglich. Holzproduktion kein prioritäres Ziel.

Baumartenanteile und Standortsspektrum

Entwicklungsziel

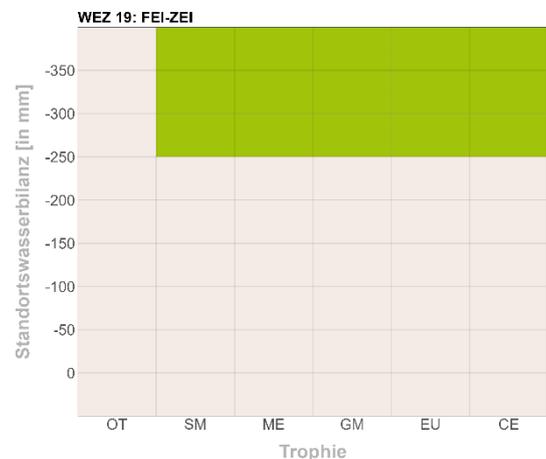
| | |
|--|---------|
| Flaum-, /Traubeneiche | 50-80 % |
| Ggf. Zerr- /Stieleiche | 30-50 % |
| Ggf. Elsbeere | 10-20 % |
| Begleitbaumarten | 20 % |
| z. T. mit Zwischen- und Unterstand aus Hainbuche | |

Verjüngungsziel

| | |
|------------------|---------|
| Eichen | 70-90 % |
| Ggf. Elsbeere | 10-20 % |
| Begleitbaumarten | 10-20 % |

Mischungsform

Eichen einzeln bis kleinflächenweise. Elsbeere ggf. in Trupps oder Gruppen. Begleitbaumarten einzeln bis gruppenweise.



WEZ 20 Buche

Leitbild

Femelartig oder flächig sich verjüngende Buchenwälder in Mosaik- oder Hallenstruktur mit geringen Anteilen sukzessionaler Begleitbaumarten (Eiche, Bergahorn, Esche, Kirsche, Ulme, Eberesche, Birke, Salweide, Fichte u.a.).

Sukzessionale Stellung/Naturnähe

Entspricht zahlreichen natürlichen Buchen-Waldgesellschaften (FFH-Lebensraumtypen) im armen bis reichen Standortsspektrum in fortgeschrittener sukzessionaler Entwicklung mit der zugehörigen Bodenvegetation in Hallenstruktur („Optimalphase“ in 50- bis 200jährigen Wäldern) oder Mosaikstruktur (über 200jährige Wälder mit Alterungs- und Zerfallsphasen).

Schutz und Erholung

Natürliche Waldgesellschaften, Höhlenbäume, Alt- und Totholz; Hutewälder, Kopfbuchen, schattige Wälder mit wenig Bodenvegetation.

Produktionsziele

Buchenwert- und Sägeholz Zielstärke BHD 60+ cm in 100-160 Jahren

Baumartenanteile und Standortsspektrum

Entwicklungsziel

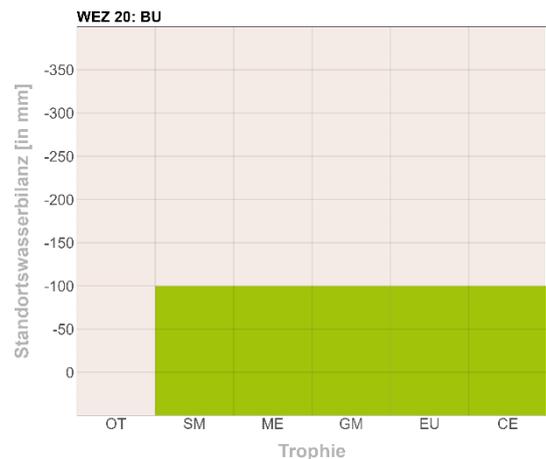
| | |
|---|----------|
| Buche | 80-100 % |
| Begleitbaumarten mit Buche im Unter- und Zwischenstand | bis 20 % |

Verjüngungsziel

| | |
|------------------|----------|
| Buche | 70-100 % |
| Begleitbaumarten | bis 30 % |

Mischungsform

Begleitbaumarten einzeln bis gruppenweise, ungleichaltrig, oft nur als Zeitmischung.



WEZ 21 Buche-Eiche/Roteiche

Leitbild

In Mosaikstruktur im Buchenwald eingestreute Horste und Kleinflächen von Eiche/Roteiche; auf ganzer Fläche unterschiedlich verteilter Jungwuchs und Unterstand von Buche. Wechselnde Anteile sukzessionaler Begleitbaumarten (Ahorn, Winterlinde, Hainbuche, Eberesche, Birke, u.a.).

Sukzessionale Stellung/Naturnähe

Entspricht, abgesehen von der Roteiche, natürlichen Buchenmischwäldern des kollinen bis submontanen Berglandes. Die ökologisch bestimmenden Anteile der Buche sowie sukzessionale Begleitbaumarten integrieren die an eine breite klimatische Amplitude gut angepasste Roteiche in das heimische Artenspektrum.

Schutz und Erholung

Natürliche Waldgesellschaften und fortgeschrittene Sukzessionsstadien in Buchenwäldern mit reichem Artenspektrum, Erhalt von Höhlenbäumen, Alt- und Totholz.

Produktionsziele

| | | |
|-----------------------------|-----------------------|----------------------|
| Buchenwert- und Sägeholz | Zielstärke BHD 60+ | cm in 120-160 Jahren |
| Eichenwert- und Sägeholz | Zielstärke BHD 60-70+ | cm in 160-220 Jahren |
| Roteichenwert- und Sägeholz | Zielstärke BHD 70+ | cm in 80-120 Jahren |

Baumartenanteile und Standortsspektrum

Entwicklungsziel

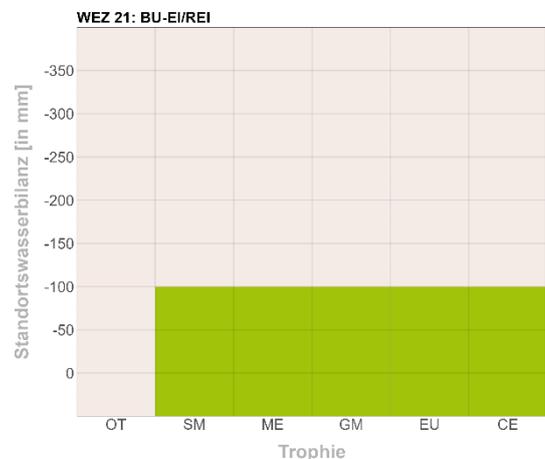
| | |
|----------------------------------|---------|
| Buche | 60-70 % |
| Eiche/Roteiche | 20-30 % |
| Begleitbaumarten | 10 % |
| auf Teilflächen Buchenunterstand | |

Verjüngungsziel

| | |
|------------------|----------|
| Buche | 60-70 % |
| Eiche/Roteiche | 20-30 % |
| Begleitbaumarten | bis 10 % |

Mischungsform

Buche ungleichaltrig in Femelstrukturen, oft als 2. Generation aus Naturverjüngung mit Überführung der Eiche in den Folgebestand, sonst Eiche/Roteiche auf Löchern von Horst- bis Kleinflächengröße, Begleitbaumarten horst- bis kleinflächenweise eingesprengt.



WEZ 23 Buche-Edellaubbäume

Leitbild

Femelartiger Waldaufbau mit führender Buche, auch im Zwischen- und Unterstand, mit variablen Anteilen von Esche, Bergahorn, Spitzahorn, Bergulme, Winter- und Sommerlinde, Elsbeere, Wildkirsche (Wildobst), Eibe sowie sonstigen natürlichen Begleitbaumarten. Edellaubbäume horst- bis kleinflächenweise unregelmäßig im Buchenwald eingemischt.

Sukzessionale Stellung/Naturnähe

Entspricht Waldmeister-Buchenwäldern auf eutrophen Standorten sowie Waldgersten-Buchenwäldern auf Kalkstandorten.

Schutz und Erholung

Natürliche Waldgesellschaften einschließlich ihrer Sukzessionsstadien mit sehr reichem Artenspektrum, Höhlenbäumen, Alt- und Totholz. Ganzjährig vielfältig im Erscheinungsbild. Erhalt seltener Baumarten.

Produktionsziele

| | |
|----------------------|---|
| Buchensägeholz | Zielstärke BHD 60+ cm in 100-140 Jahren |
| Edellaubwertholz | Zielstärke BHD 50+ cm in 80-120 Jahren |
| Wildkirschenwertholz | Zielstärke BHD 50+ cm in 60- 80 Jahren |

Baumartenanteile und Standortsspektrum

Entwicklungsziel

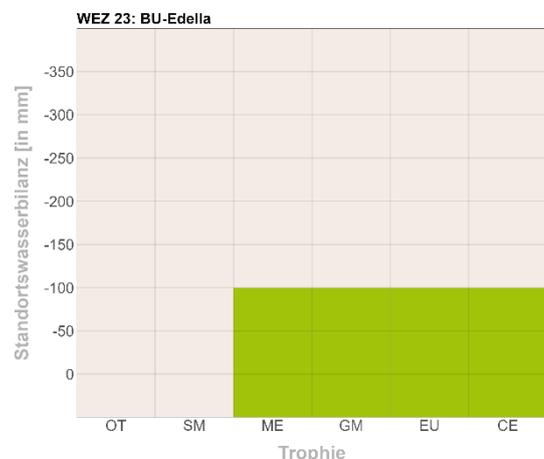
| | |
|--|----------|
| Buche | 40-60 % |
| Edellaubbäume | 40-50 % |
| Begleitbaumarten | bis 10 % |
| Teilflächiger Unter- und Zwischenstand aus Buche | |

Verjüngungsziel

| | |
|------------------|----------|
| Buche | 40-60 % |
| Edellaubbäume | 30-50 % |
| Begleitbaumarten | bis 10 % |

Mischungsform

Edellaubbaumarten jeder Art jeweils horst- bis kleinflächenweise im femelartig strukturierten Buchenwald eingemischt. Wildkirsche auch gruppenweise, häufig an Waldinnen- und außenrändern eingestreut.



WEZ 25 Buche-Fichte

Leitbild

Femelartig oder in Mosaikstrukturen (Störungslücken und -löchern) sich verjüngender Mischwald aus Buche mit Gruppen- bis Kleinflächenbeimischung der Fichte, ggf. Douglasie und wechselnden Anteilen sukzessionaler Begleitbaumarten mit unterschiedlicher Nutz- und Schutzfunktion (Eiche, Bergahorn, Lärche, Birke, Eberesche, Weide, Aspe, u.a.).

Sukzessionale Stellung/Naturnähe

Nähe zu natürlichen Buchen-Fichtenwäldern der montanen bis obermontanen Zone, ansonsten zu natürlichen Buchenwaldgesellschaften mit unterschiedlichen Ausprägungen durch die beigemischte, heimische Fichte. In Mischung mit Douglasie können langlebige, stark strukturierte und wertvolle Dauerwälder entstehen.

Schutz und Erholung

Heimische Buchenwälder mit deutlichem Vorrang der Buche nebst zugehörigem Artenspektrum sowie Höhlenbäumen, Alt- und Totholz. Durch Mischung von Baumarten sowie Vertikal- und Horizontalstrukturen ganzjährig attraktive Wälder.

Produktionsziele

Buchenwert- und sägeholz
Fichtensägeholz

Zielstärke BHD 60+ cm in 100-140 Jahren
Zielstärke BHD 45+ cm in 60-100 Jahren

Baumartenanteile und Standortsspektrum

Entwicklungsziel

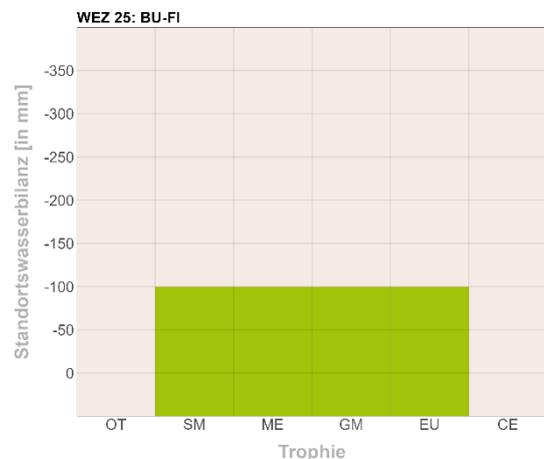
| | |
|--|----------|
| Buche | 50-70 % |
| Fichte | 20-40 % |
| ggf. Douglasie | bis 20 % |
| Begleitbaumarten | 10 % |
| Teilflächiger Unter- und Zwischenstand aus Buche | |

Verjüngungsziel

| | |
|------------------|----------|
| Buche | 40-70 % |
| Fichte | 20-40 % |
| ggf. Douglasie | bis 20 % |
| Begleitbaumarten | bis 10 % |

Mischungsform

Horstweise Beimischung von Fichten (ggf. Douglasien) in femelartiger Struktur, Begleitbaumarten trupp- bis gruppenweise in Lücken und Löchern.



WEZ 26 Buche-Douglasie

Leitbild

Mischwald in Femelstruktur mit gruppen- bis horstweiser Beimischung von Douglasie sowie Anteilen sukzessionaler Begleitbaumarten (Eiche, Bergahorn, andere Nadelbaumarten, Birken, Ebereschen, Weiden, Aspen u. a.). Vertikale Differenzierung durch Femelstruktur sowie durch Buchenunter- und -zwischenstand. Anteile der Nadelbaumarten differenziert je nach Wasser- und Nährstoffversorgung.

Sukzessionale Stellung/Naturnähe

Kommt zahlreichen naturnahen Buchen-Waldgesellschaften nahe, jedoch mit Veränderung durch die beigemischte Douglasie. In der Entwicklung späten Sukzessionsstadien der Buche mit noch nicht verdrängten Mischbaumarten ähnlich.

Schutz und Erholung

Erhaltung heimischer Buchenwälder mit deutlicher Dominanz der Buche nebst zugehörigem Artenspektrum sowie Höhlenbäumen, Alt- und Totholz. Durch Mischung von verschiedenen Baumarten sowie Vertikal- und Horizontalstrukturen ganzjährig attraktive Wälder.

Produktionsziele

| | |
|--------------------|---|
| Buchensägeholz | Zielstärke BHD 60+ cm in 100-140 Jahren |
| Douglasienwertholz | Zielstärke BHD 70+ cm in 80-100 Jahren |
| Douglasiansägeholz | Zielstärke BHD 60+ cm in 60- 80 Jahren |

Baumartenanteile und Standortsspektrum

Entwicklungsziel

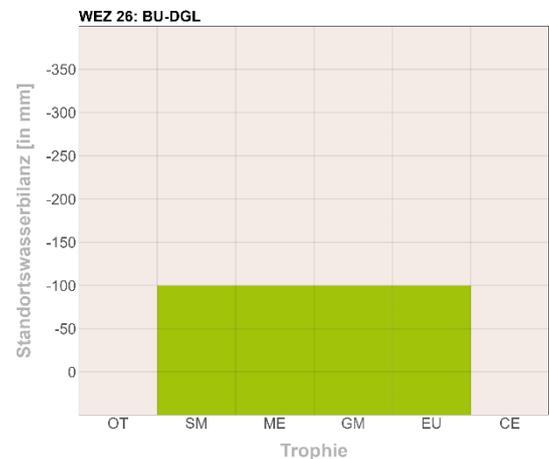
| | |
|---|---------|
| Buche | 50-70 % |
| Douglasie | 20-40 % |
| Begleitbaumarten mit Buche im Unter- und Zwischenstand | 10 % |

Verjüngungsziel

| | |
|------------------------------------|---------|
| Buche | 40-60 % |
| Douglasie | 30-40 % |
| Begleitbaumarten | 10-20 % |
| Buchenunterstand auf ganzer Fläche | |

Mischungsform

Gruppen- bis horstweise Beimischung von Douglasien und anderen Begleitbaumarten (ggf. auch Fichten) femelartig in Lücken und Löchern.



WEZ 28 Buche-Lärche

Leitbild

Femelstruktur der Buche, mosaikartig in Löchern unregelmäßig eingestreute Gruppen bis Kleinflächen von Lärche (Europäische oder Japanische Lärche), Anteile von Eiche und Bergahorn vorkommend, geringe Naturverjüngungsanteile von Fichte, mit wechselnden Anteilen sukzessionaler Begleitbaumarten (Birke, Eberesche, Weide, Aspe u.a.) sowie Buchen-Unterstand.

Sukzessionale Stellung/Naturnähe

Kommt zahlreichen naturnahen Buchen-Waldgesellschaften nahe, jedoch mit Veränderung durch die beigemischte Lärche. Ähnelt späten Sukzessionsstadien von Buchen-Waldgesellschaften mit noch nicht verdrängten Mischbaumarten.

Schutz und Erholung

Erhaltung wenig veränderter heimischer Buchenwälder mit deutlichem Vorrang der Buche nebst zugehörigem Artenspektrum sowie Höhlenbäumen, Alt- und Totholz.

Auf Freiflächen verbessern Lärchenvorwälder die physikalischen Bodeneigenschaften und sorgen für Frost- und Strahlungsschutz sowie Windruhe und mindern damit Schäden an der Buche.

Im Frühlings-, Sommer- und Herbstaspekt bunt gefärbte und abwechslungsreiche Wälder.

Produktionsziele

| | |
|-----------------|---|
| Buchensägeholz | Zielstärke BHD 60+ cm in 100-140 Jahren |
| Lärchenwertholz | Zielstärke BHD 65+ cm in 80-140 Jahren |
| Lärchensägeholz | Zielstärke BHD 50+ cm in 60-100 Jahren |

Baumartenanteile und Standortsspektrum

Entwicklungsziel

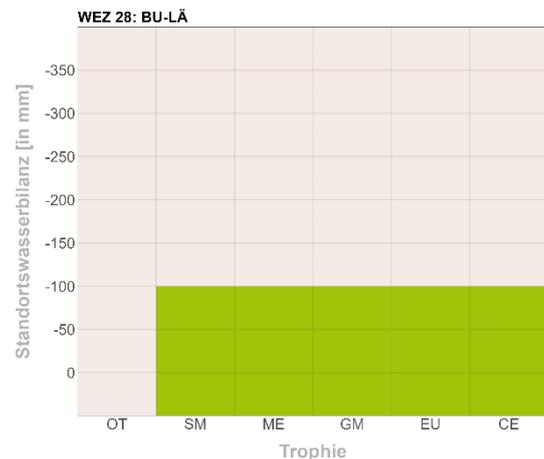
| | |
|---|---------|
| Buche | 60-70 % |
| Lärche | 20-40 % |
| Begleitbaumarten | 10-20 % |
| Buchenunter- und -zwischenstand auf ganzer Fläche | |

Verjüngungsziel

| | |
|------------------|---------|
| Buche | 50-70 % |
| Lärche | 30-40 % |
| Begleitbaumarten | 10-20 % |

Mischungsform

In Femelstruktur aufgebauter Mischwald, gruppen- bis horstweise Mischung mit Lärchen unterschiedlichen Alters.



WEZ 29 Buche-Tanne

Leitbild

Vertikal und horizontal reich strukturierte Mischwälder aus produktionsbestimmender Buche, Tanne und ggf. Fichte sowie sukzessionalen Begleitbaumarten (Eiche, Eberesche, Birke u.a.); in Sonderfällen statt Weißtanne auch Küstentanne.

Sukzessionale Stellung/Naturnähe

Nähe zu natürlichen Buchen-Tannen/Fichtenwäldern des montanen bis obermontanen Berglandes, bzw. ggf. mit Veränderungen durch die beigemischte Küstentanne.

Schutz und Erholung

Erhaltung nennenswerter, ökologisch wirksamer Anteile von Buche, Höhlenbäume, Alt- und Totholz. Vertikal und horizontal strukturreicher Waldaufbau.

Produktionsziele

| | |
|----------------------|---|
| Buchensägeholz | Zielstärke BHD 60+ cm in 100-140 Jahren |
| Weißtannensägeholz | Zielstärke BHD 50+ cm in 80-140 Jahren |
| Küstentannensägeholz | Zielstärke BHD 50+ cm in 50- 80 Jahren |
| Fichtensägeholz | Zielstärke BHD 45+ cm in 60-100 Jahren |

Baumartenanteile und Standortsspektrum

Entwicklungsziel

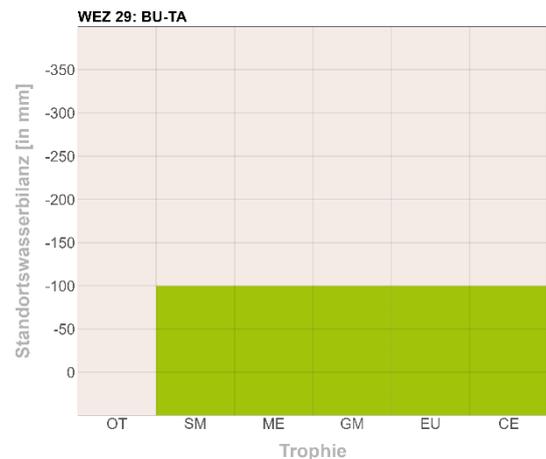
| | |
|-----------------------|---------|
| Buche | 50-60 % |
| Weißtanne/Küstentanne | 20-40 % |
| ggf. Fichte | 10-20 % |
| Begleitbaumarten | bis 5 % |

Verjüngungsziel

| | |
|-----------------------|----------|
| Buche | 50-60 % |
| Weißtanne/Küstentanne | 20-40 % |
| ggf. Fichte | 10-20 % |
| Begleitbaumarten | bis 10 % |

Mischungsform

Trupp- bis horstweise in permanenter Verjüngung.



WEZ 31 Edellaubbäume (gut wasserversorgte Standorte)

Leitbild

Trupp- bis horstweise ungleichaltrig aufgebauter Mischwald aus anspruchsvollen Edellaubbaumarten: Esche, Bergahorn, Flatter- und Bergulme, Winterlinde, Wildkirsche sowie Roterle mit unterschiedlichen Anteilen von Buche, Hainbuche und Eiche auch im Zwischen- und Unterstand sowie anderen Begleitbaumarten (u.a. Spitzahorn und Elsbeere) in permanenter Lücken-, Loch und Femelverjüngung.

Sukzessionale Stellung/Naturnähe

Auf allen reichen Standorten (Kalk, Basalt, Diabas, u.a.) mit guter Wasserversorgung typisches Pionier- bis frühes Sukzessionsstadium von Buchenwaldgesellschaften, im Übrigen azonale Ahorn-Eschen-Wälder (z.T. Schluchtwälder). Anspruchsvolle, dynamische Wälder mit artenreicher Flora, natürlichen Waldgersten-Buchenwäldern in Übergängen zu artenreichen Sumpf- und Auwäldern entsprechend.

Schutz und Erholung

Natürliche Waldgesellschaften und sehr artenreiche Sukzessionsstadien reicher und frischer Buchenwaldgesellschaften, Höhlenbäume, Alt- und Totholz.

In Struktur, Artenvielfalt und jahreszeitlichem Erscheinungsbild abwechslungsreiche Wälder.

Produktionsziele

| | |
|------------------|---|
| Edellaubwertholz | Zielstärke BHD 55+ cm in 80-120 Jahren |
| Edellaubsägeholz | Zielstärke BHD 50+ cm in 80-100 Jahren |
| Buchensägeholz | Zielstärke BHD 60+ cm in 100-140 Jahren |

Baumartenanteile und Standortsspektrum

Entwicklungsziel

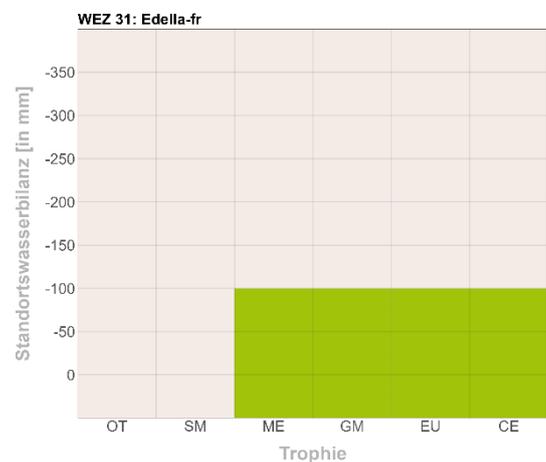
| | |
|--|---------|
| Edellaubbäume | 70-80 % |
| Buche/Hainbuche auch im Unter- und Zwischenstand; inkl. Begleitbaumarten | 20-30 % |

Verjüngungsziel

| | |
|--|---------|
| Edellaubbäume | 80-90 % |
| Buche/Hainbuche u. Begleitbaumarten | 10-20 % |

Mischungsform

Trupp- bis horstweise gemischt mit Buche/Hainbuche.



WEZ 33 Edellaubbäume (warme und trockenere Standorte)

Leitbild

Horst- bis einzelstammweise ungleichaltrig aufgebauter Mischwald aus trockenheitstoleranten Lichtbaumarten: Esche, Sommerlinde, Elsbeere, Traubeneiche, Wildobst, mit unterschiedlichen Anteilen von Buche, Berg-, Spitz- und Feldahorn; Buche und vor allem Hainbuche im Zwischen- bis Unterstand sowie wechselnden Anteilen von Begleitbaumarten (Eibe, Eberesche, Birke).

Sukzessionale Stellung/Naturnähe

Entspricht Sukzessionsstadien thermophiler Kalkbuchenwälder. Wegen häufig wiederkehrender Ausfälle in Buche (Trocknis, Schleimfluss, Stammfäule) führt die Entwicklung nicht immer zur Schlusswaldgesellschaft des Kalkbuchenwaldes.

Schutz und Erholung

Unterschiedliche Sukzessionsstadien trockener Buchenwaldgesellschaften mit erhöhtem Störungsrisiko durch Trockenheit, mit großem Artenspektrum, Höhlenbäumen, Alt- und Totholz. In Struktur, Artenvielfalt und jahreszeitlichem Erscheinungsbild abwechslungsreiche Wälder.

Produktionsziele

Eschen-, Sommerlinden-,
Traubeneichen-, Buchen-
und Ahornsägeholz

Zielstärke BHD 50+ cm in 120-160 Jahren

Elsbeeren- und Wildobstwertholz

Zielstärke BHD 40+ cm in 120-160 Jahren

Baumartenanteile und Standortsspektrum

Entwicklungsziel

| | |
|---|----------|
| Edellaubbäume | 50-80 % |
| Traubeneiche | 10-20 % |
| Buche/Hainbuche | 10-20 % |
| Begleitbaumarten | bis 10 % |
| Teilflächig Hainbuche/Buche im Zwischen- und Unterstand | |

Verjüngungsziel

| | |
|------------------|----------|
| Edellaubbäume | 60-80 % |
| Eiche | 10-20 % |
| Buche/Hainbuche | 5-10 % |
| Begleitbaumarten | bis 10 % |

Mischungsform

In Trupps, Gruppen und Horsten (Kleinflächen) ausgeprägte Mischung von Lichtbaumarten mit Buche/Hainbuche auf ganzer Fläche, auch im Zwischen- und Unterstand.



WEZ 36 Wildkirsche (Bergahorn)

Leitbild

Zweischichtige Laubholzbestände mit führender Kirsche, ggf. gruppen- bis horstweise eingesprengt Bergahorn in der herrschenden Schicht und dienender Hainbuche, ggf. Buche oder Winterlinde im Unter- und Zwischenstand sowie wechselnden Anteilen sukzessionaler Begleitbaumarten.

Sukzessionale Stellung/Naturnähe

Pionierstadien bis frühe Sukzessionsstadien reicher Buchen-Waldgesellschaften wie Waldmeister-Buchenwälder.

Schutz und Erholung

Frühe Sukzessionsstadien von Buchenwäldern mit dem typischen Artenspektrum, Erhaltung seltener Baumarten, Höhlenbäume, Alt- und Totholz. Abwechslungsreiche Laubmischwälder mit schönem Frühjahrsaspekt.

Produktionsziele

Wildkirschenwertholz

Zielstärke BHD 50+ cm in 60- 80 Jahren

Bergahornsägeholz

Zielstärke BHD 50+ cm in 80-120 Jahren

Baumartenanteile und Standortsspektrum

Entwicklungsziel

| | |
|---|----------|
| Wildkirsche | 70-100 % |
| ggf. Bergahorn | bis 30 % |
| Begleitbaumarten | 10 % |
| mit Zwischen- und Unterstand aus Hainbuche (ggf. auch Winterlinde und Buche) | |

Verjüngungsziel

| | |
|---|----------|
| Wildkirsche | 70-100 % |
| ggf. Bergahorn | bis 30 % |
| Hainbuche, Winterlinde, Buche und Begleitbaumarten | 20- 30 % |

Mischungsform

Wildkirsche ggf. gruppen- bis horstweise gemischt mit Bergahorn, Mitbau von dienender Hainbuche (ggf. Buche).



WEZ 39 Edellaubbäume-Tanne

Leitbild

Ungleichaltriger Wald in Femelstruktur aus anspruchsvollen Edellaubbäumen, wie Ahorn, Esche oder Wildkirsche, in Mischung mit Weißtanne bzw. Küstentanne (Douglasie auf trockeneren Standorten), zuweilen mit Eiche und Buche, Hainbuche oder Linde im Zwischen- und Unterstand sowie mit sukzessionalen Begleitbaumarten.

Die Beimischung der Tanne dient auch der Walderhaltung auf Standorten mit erhöhtem Störungsrisiko (z.B. windexponierte Basaltkuppenlagen, wechselfeuchte bis wechselfrockene Plateaulagen) oder als Ergänzung in Beständen mit hohen Ausfällen von Esche (Eschentriebsterben) oder Ahorn (Rußrindenkrankheit).

Sukzessionale Stellung/Naturnähe

Entspricht in der kollinen bis montanen Stufe frühen, sehr artenreichen Sukzessionsstadien von natürlichen Waldmeister-Buchenwäldern auf reichen Standorten (Basalt, Diabas...) und von Kalk-Buchenwäldern mit Veränderung durch die beigemischte Tanne.

Schutz und Erholung

Natürliche Waldgesellschaften einschließlich ihrer Sukzessionsstadien mit sehr reichem Artenspektrum, Höhlenbäumen, Alt- und Totholz; ganzjährig vielfältig im Erscheinungsbild.

Produktionsziele

| | |
|---------------------------|---|
| Ahorn- und Eschensägeholz | Zielstärke BHD 50+ cm in 100-140 Jahren |
| Eichensägeholz | Zielstärke BHD 60+ cm in 160-180 Jahren |
| Wildkirschenwertholz | Zielstärke BHD 40+ cm in 60- 80 Jahren |
| Weißtannensägeholz | Zielstärke BHD 45+ cm in 80-100 Jahren |
| Küstentannensägeholz | Zielstärke BHD 45+ cm in 40- 60 Jahren |
| Douglasiensägeholz | Zielstärke BHD 50+ cm in 60-100 Jahren |

Baumartenanteile und Standortsspektrum

Entwicklungsziel

| | |
|---|---------|
| Edellaubbäume | 40-60 % |
| Weißtanne/Küstentanne/Douglasie | 30-50 % |
| Begleitbaumarten mit Zwischen- und Unterstand aus Hainbuche (ggf. auch Winterlinde und Buche) | 10-20 % |

Verjüngungsziel

| | |
|---|---------|
| Edellaubbäume | 50-70 % |
| Weißtanne/Küstentanne/Douglasie | 20-40 % |
| Hainbuche, Winterlinde, Buche und Begleitbaumarten | 10-20 % |

Mischungsform

Edellaubbäume trupp- bis horstweise, Tanne/
Douglasie gruppen- bis horstweise beigemischt.



WEZ 40 Roterle

Leitbild

Meist einschichtiger Erlenwald auch mit einzeln bis gruppenweise beigemischter Esche, Moorbirke, Flatterulme, Stieleiche, Hainbuche sowie weiteren Begleitbaumarten in geringem Umfang.

Sukzessionale Stellung/Naturnähe

Entspricht der natürlichen Waldgesellschaft des Erlenbruchwaldes auf ziemlich gut (bis gut) nährstoffversorgten organischen Nassstandorten, auf ärmeren z.T. auch veränderten organischen Nassstandorten mit Moorbirke; auf reichen mineralischen Standorten der bachbegleitenden und quelligen Erlen-Eschenwälder mit Flatterulme, Eiche (Bergahorn, Esche).

Schutz und Erholung

Azonale Natürliche Waldgesellschaft mit breitem charakteristischem Artenspektrum, spezieller Bodenvegetation (Großseggen), Höhlenbäumen, Alt- und Totholz.

Produktionsziele

Roterlensägeholz

Zielstärke BHD 45+ cm in 60-80 Jahren

Baumartenanteile und Standortsspektrum

Entwicklungsziel

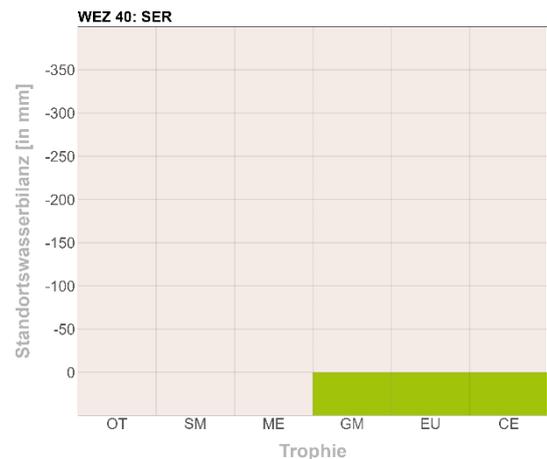
| | |
|------------------|----------|
| Roterle | 70-100 % |
| Begleitbaumarten | bis 30 % |

Verjüngungsziel

| | |
|------------------|----------|
| Roterle | 70-90 % |
| Begleitbaumarten | bis 30 % |

Mischungsform

Begleitbaumarten einzeln bis gruppenweise eingemischt.



WEZ 45 Moorbirke-(Fichte)

Leitbild

Moorbirkenwälder einschichtig oder in Mosaikstruktur mit Einzelbäumen, Trupps bis Horsten unterschiedlich alter Fichten oder Kiefern sowie Begleitbaumarten wie Eberesche, Aspe (ggf. Salweide) und Straucharten.

Sukzessionale Stellung/Naturnähe

Entspricht der natürlichen Waldgesellschaft des Moorbirkenbruchwaldes auf schwächer nährstoffversorgten Nassstandorten.

Schutz und Erholung

Vorrangig Erhaltung dieser seltenen natürlichen Waldgesellschaft mit zugehöriger Fauna und Flora. Lebhaftes Laubfärbung im Frühjahr und Herbst.

Produktionsziele

Extensive Holzproduktion mit fakultativer Nutzung.

Baumartenanteile und Standortsspektrum

Entwicklungsziel

| | |
|--------------------|----------|
| Moorbirke | 50-100 % |
| ggf. Fichte/Kiefer | bis 40 % |
| Begleitbaumarten | bis 30 % |

Verjüngungsziel

| | |
|--------------------|----------|
| Moorbirke | 50-100 % |
| ggf. Fichte/Kiefer | bis 30 % |
| Begleitbaumarten | bis 30 % |

Mischungsform

Moorbirke mit Anteilen von Fichte oder Kiefer in einzelner bis flächenweiser Beimischung.



WEZ 47 Sandbirke-Kiefer

Leitbild

Sandbirkenwälder einschichtig oder in Mosaikstruktur mit Einzelbäumen, Trupps bis Horsten unterschiedlich alter Kiefern oder Eichen (Trauben- und Stieleiche) sowie Begleitbaumarten wie Eberesche, Aspe (ggf. Salweide, Buche u.a.) und Straucharten.

Sukzessionale Stellung/Naturnähe

Es handelt sich um frühe Sukzessionsstadien verschiedener natürlicher Waldgesellschaften.

Schutz und Erholung

Frühe Sukzessionsstadien mit lichtliebender Fauna und Flora, Höhlenbäumen, Alt- und Totholz, vor allem auf größeren Störungsflächen. Lichte Wälder mit farbenprächtigen Frühjahrs- und Herbstaspekt.

Produktionsziele

Auf ertragsschwachen und/oder wechselfeuchten Standorten extensive Holzproduktion mit fakultativer Nutzung. Auf besseren Standorten Vorwald mit Nutzung von Birken- und Kiefern-sägeholz und Waldumbau mit Schattbaumarten (Tanne, Buche).

Baumartenanteile und Standortsspektrum

Entwicklungsziel

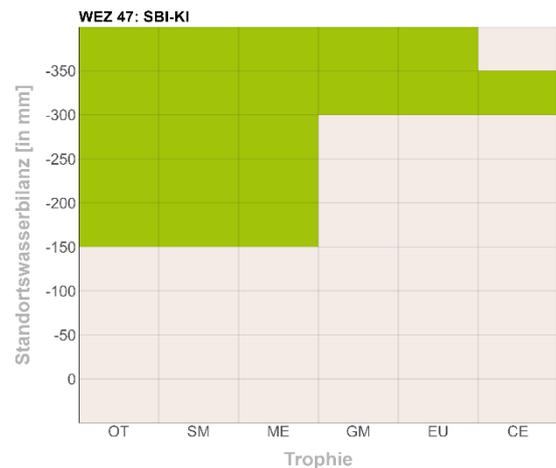
| | |
|------------------|----------|
| Sandbirke | 60-70 % |
| Kiefer | bis 30 % |
| Eiche | bis 20 % |
| Begleitbaumarten | bis 20 % |

Verjüngungsziel

| | |
|------------------|----------|
| Sandbirke | 50-80 % |
| Kiefer | bis 20 % |
| Eiche | bis 20 % |
| Begleitbaumarten | bis 20 % |

Mischungsform

Sandbirke mit Anteilen von Kiefer oder Eiche in einzelner bis flächenweiser Beimischung.



WEZ 52 Fichte-Buche/Bergahorn

Leitbild

Ausgangssituation sind meist Fichten(rein-)bestände, die unter Ausnutzung von Störungen durch gruppen- bis kleinflächenweise Beimischung von Buche sowie Bergahorn (auf den besseren mesotrophen Standorten) und stabilen Nadelbaumarten in Mischwälder überführt werden. Dabei sind Anteile sukzessionale Begleitbaumarten (Eberesche, Birke, Salweide, Aspe u.a.) integriert.

Sukzessionale Stellung/Naturnähe

Entspricht in den montanen/submontanen Lagen näherungsweise den Waldgesellschaften des Buchen-/Buchenmischwaldes. Entwicklung in schlusswaldnahen Stadien unbestimmt, evtl. Mosaik-Phasenwechsel zwischen Fichte und Buche.

Schutz und Erholung

Erhalt bzw. Entwicklung eines ökologisch wirksamen und stabilitätsfördernden Anteils von Buche und anderen Begleitbaumarten. Abwechslungsreiches Waldbild mit kontrastreicher Herbstfärbung, geprägt durch reiche vertikale und horizontale Strukturen.

Produktionsziele

| | |
|-----------------------------|--|
| Fichtensägeholz | Zielstärke BHD 45+ cm in 60-100 Jahren |
| Buchenwert- und Sägeholz | Zielstärke BHD 55+ cm in 100-160 Jahren |
| Bergahornwert- und Sägeholz | Zielstärke BHD 50+ cm in 100-160 Jahren abhängig von Standort und Höhenlage |

Baumartenanteile und Standortspektrum

Entwicklungsziel

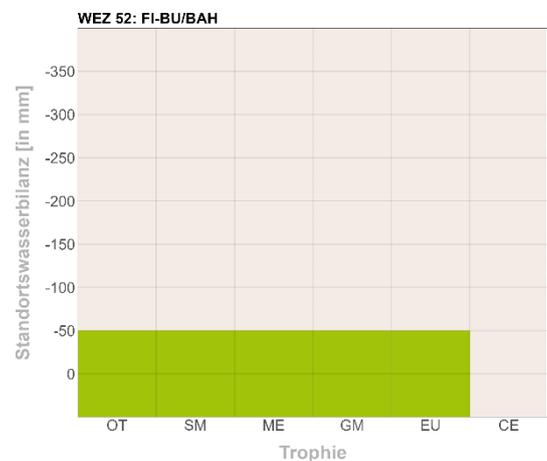
| | |
|------------------|----------|
| Fichte | 50-70 % |
| Buche/Bergahorn | 20-30 % |
| ggf. Weißtanne | bis 20 % |
| Begleitbaumarten | 5 % |

Verjüngungsziel

| | |
|------------------|----------|
| Fichte | 50-70 % |
| Buche/Bergahorn | 20-30 % |
| ggf. Weißtanne | bis 20 % |
| Begleitbaumarten | 10-20 % |

Mischungsform

Gruppen- bis kleinflächenweise aufgebauter Mischwald.



WEZ 53 Küstentanne-Buche

Leitbild

Vertikal und horizontal strukturierte Mischwälder aus produktionsbestimmender Küstentanne und Buche sowie sukzessionalen Begleitbaumarten (Fichte, Eberesche, Birke u.a.); ggf. auch mit Douglasie. Bei hohem Trockenstressrisiko für die Buche können ggf. Hainbuche bzw. Winterlinde die Rolle der Laubmischbaumart übernehmen.

Sukzessionale Stellung/Naturnähe

Entspricht keiner natürlichen Waldgesellschaft Hessens. Die Mischung mit Buche bzw. anderen heimischen Laubbaumarten integriert die Küstentanne in die heimische Flora und Fauna.

Schutz und Erholung

Erhaltung nennenswerter, ökologisch wirksamer Anteile von Buche. Vertikal und horizontal strukturreicher Waldaufbau. Produktive Wälder mit hoher CO₂-Speicherung.

Produktionsziele

| | |
|-------------------------------|---|
| Küstentannensägeholz | Zielstärke BHD 45+ cm in 40- 60 Jahren |
| Küstentanne als Holzwerkstoff | Zielstärke BHD 30+ cm in 20- 30 Jahren |
| Buchensägeholz | Zielstärke BHD 60+ cm in 120-160 Jahren |
| Douglasiensäge- und -wertholz | Zielstärke BHD 70+ cm in 80-120 Jahren |
| Fichtensägeholz | Zielstärke BHD 45+ cm in 80-120 Jahren |

Baumartenanteile und Standortsspektrum

Waldbauliche Zielstellung

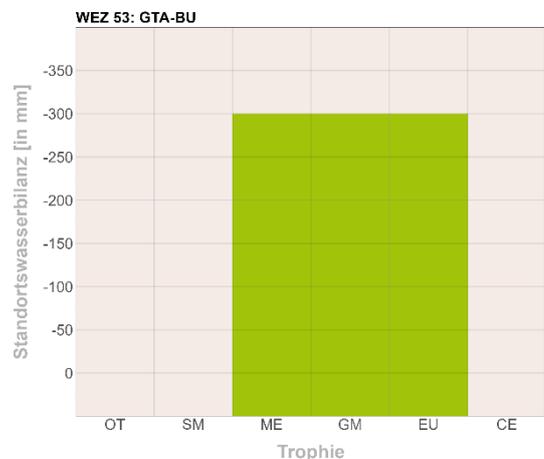
| | |
|------------------|----------|
| Küstentanne | 40-60 % |
| Buche (HBu/WLi) | 20-40 % |
| ggf. Douglasie | bis 20 % |
| ggf. Fichte | bis 20 % |
| Begleitbaumarten | 10 % |

Verjüngungsziel

| | |
|------------------|----------|
| Küstentanne | 40-60 % |
| Buche (HBu/WLi) | 20-40 % |
| ggf. Douglasie | bis 20 % |
| ggf. Fichte | bis 20 % |
| Begleitbaumarten | bis 10 % |

Mischungsform

Mischbaumarten in trupp- bis gruppenweiser Femelstruktur. Buche (Hainbuche/ Winterlinde) aus Naturverjüngung oder Voranbau).



WEZ 54 Fichte-Birke/Eberesche

Leitbild

Femelartig vertikal gegliederter Fichtenmischwald mit Trupps, Gruppen und Horsten unterschiedlich alter Ebereschen und Birken sowie Begleitbaumarten wie Bergahorn (nur bei besserer Nährstoffversorgung), Buche und Salweide.

Sukzessionale Stellung/Naturnähe

Forstliche Ersatzgesellschaft in hohen Mittelgebirgslagen auf potenziellen Buchenwaldstandorten. Auf leicht wechselfeuchten Standorten im montanen Bereich Bestandteil der potenziellen natürlichen Vegetation.

Schutz und Erholung

Erhaltung artenreicher Sukzessionsstadien mit Lebensmöglichkeiten für eine vielfältige Fauna und Flora. Durch Ebereschenbeimischung aufgelockerte Wälder mit besonderem Frühjahrs- und Herbstaspekt (Blüten, Früchte, Herbstlaub), abwechslungsreich durch Femelstruktur.

Produktionsziele

| | |
|----------------------------|--|
| Fichtensägeholz | Zielstärke BHD 45+ cm in 60-100 Jahren |
| Birken-/Ebereschensägeholz | Zielstärke BHD 30+ cm in 60- 80 Jahren |

Baumartenanteile und Standortsspektrum

Entwicklungsziel

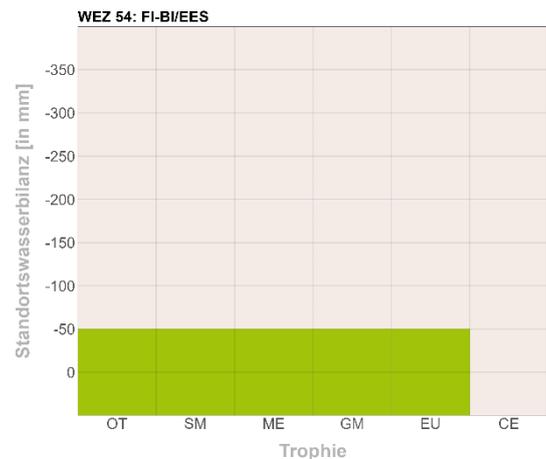
| | |
|------------------|----------|
| Fichte | 50-70 % |
| Eberesche/Birke | 20-40 % |
| Begleitbaumarten | bis 10 % |

Verjüngungsziel

| | |
|------------------|----------|
| Fichte | 50-80 % |
| Eberesche/Birke | 20-40 % |
| Begleitbaumarten | bis 10 % |

Mischungsform

Femelstruktur mit Eberesche und Birke in Trupps und Horsten.



WEZ 55 Weißtanne-Buche

Leitbild

Vertikal und horizontal strukturierte Mischwälder aus Weißtanne und Buche sowie sukzessionalen Begleitbaumarten (Eberesche, Birke u.a.) ggf. auch mit Fichte, Lärche oder Douglasie.

Sukzessionale Stellung/Naturnähe

Artenzusammensetzung natürlicher Bergmischwälder. Besonders auf staunässegeprägten Standorten leistet die Weißtanne einen wichtigen Beitrag zu einer höheren Stabilität.

Schutz und Erholung

Erhaltung nennenswerter, ökologisch wirksamer Anteile von Buche. Vertikal und horizontal strukturreicher Waldaufbau.

Produktionsziele

| | |
|--------------------------|---|
| Weißstannensägeholz | Zielstärke BHD 60+ cm in 80-120 Jahren |
| Buchenwert- und Sägeholz | Zielstärke BHD 60+ cm in 120-160 Jahren |
| Douglasienwertholz | Zielstärke BHD 70+ cm in 80-120 Jahren |
| Douglasiensägeholz | Zielstärke BHD 60+ cm in 60- 80 Jahren |
| Fichtensägeholz | Zielstärke BHD 45+ cm in 80-120 Jahren |

Baumartenanteile und Standortsspektrum

Entwicklungsziel

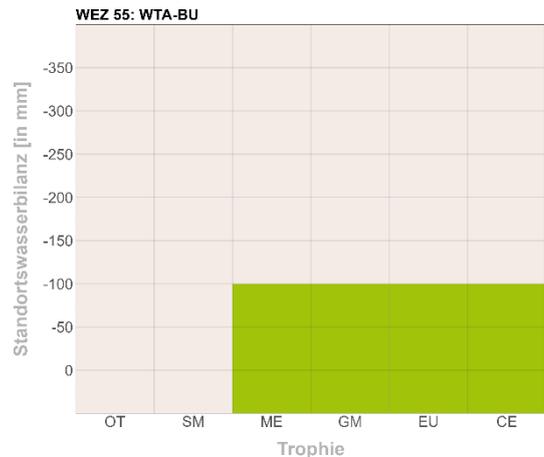
| | |
|------------------|----------|
| Weißtanne | 40-60 % |
| Buche | 10-20 % |
| ggf. Douglasie | bis 20 % |
| ggf. Fichte | bis 20 % |
| Begleitbaumarten | bis 5 % |

Verjüngungsziel

| | |
|------------------|----------|
| Weißtanne | 40-60 % |
| Buche | 20-40 % |
| ggf. Douglasie | bis 20 % |
| ggf. Fichte | bis 20 % |
| Begleitbaumarten | bis 10 % |

Mischungsform

Trupp- bis gruppenweise in Femelstruktur. Buche aus Naturverjüngung oder Voranbau.



WEZ 62 Douglasie-Buche

Leitbild

Femelartig strukturierter Mischwald aus gruppen- bis kleinflächenweiser Mischung von Douglasie und Buche (heimische Laubbaumarten). Begleitbaumarten wie Lärche, Fichte, Eiche, Birke, Eberesche, Weide, Aspe u.a. kommen in unterschiedlichen Anteilen vor.

Sukzessionale Stellung/Naturnähe

Das WEZ hat mit seinen ökologisch wirksamen Buchenanteilen (ggf. Hainbuche oder Winterlinde) Anknüpfungen zu den sukzessionalen Stadien des Hainsimsen-Buchenwaldes.

Schutz und Erholung

Erhaltung und Förderung erheblicher Anteile der einheimischen Baumvegetation mit dazugehöriger Flora und Fauna. Abwechslungsreiches Waldbild mit unterschiedlichen Altersstadien in horizontaler und vertikaler Mischung von Laub- und Nadelbaumarten.

Produktionsziele

| | |
|-------------------------------|---|
| Douglasienwertholz | Zielstärke BHD 70+ cm in 80-120 Jahren |
| Douglasien sägeholz | Zielstärke BHD 50+ cm in 60-100 Jahren |
| Buchensägeholz (HBu oder WLi) | Zielstärke BHD 60+ cm in 100-160 Jahren |

Baumartenanteile und Standortsspektrum

Entwicklungsziel

| | |
|----------------------|---------|
| Douglasie | 60-80 % |
| Buche (HBu oder WLi) | 20-30 % |
| Begleitbaumarten | 10 % |

Verjüngungsziel

| | |
|----------------------|----------|
| Douglasie | 60-80 % |
| Buche (HBu oder WLi) | 20-30 % |
| Begleitbaumarten | bis 10 % |

Mischungsform

Gruppenweise ungleichaltrig, oft mit Vorverjüngung des Ausgangsbestandes; ggf. Buchenvoranbau in Horsten und Kleinflächen bei einsetzender Zielstärkennutzung.



WEZ 65 Douglasie-Fichte-Buche

Leitbild

Femelartig oder in Mosaikstruktur sich verjüngender ehemals mehr oder weniger ausgeprägter reiner Nadelwald, der sich künftig aus gruppen- bis kleinflächenweiser Mischung von Douglasie, Fichte und Buche (ggf. HBu / WLi) zusammensetzt. Begleitbaumarten wie Eiche, Lärche, Birke, Eberesche, Weide, Aspe u.a. kommen in unterschiedlichen Anteilen vor.

Sukzessionale Stellung/Naturnähe

Das WEZ hat mit seinen ökologisch wirksamen Buchenanteilen Anknüpfungen zu den sukzessionalen Stadien des Hainsimsen-Buchenwaldes.

Schutz und Erholung

Erhaltung und Förderung erheblicher Anteile der einheimischen Baumvegetation mit dazugehöriger Flora und Fauna. Abwechslungsreiches Waldbild mit unterschiedlichen Altersstadien in horizontaler und vertikaler Mischung von Laub- und Nadelbaumarten.

Produktionsziele

| | | |
|--|--------------------------|----------------|
| Douglasienwertholz | Zielstärke BHD 70+ cm in | 80-120 Jahren |
| Douglasien sägeholz | Zielstärke BHD 50+ cm in | 60-100 Jahren |
| Fichtensägeholz | Zielstärke BHD 45+ cm in | 60-100 Jahren |
| Buchenwert- und Sägeholz (HBu oder WLi) | Zielstärke BHD 60+ cm in | 100-160 Jahren |

Baumartenanteile und Standortsspektrum

Entwicklungsziel

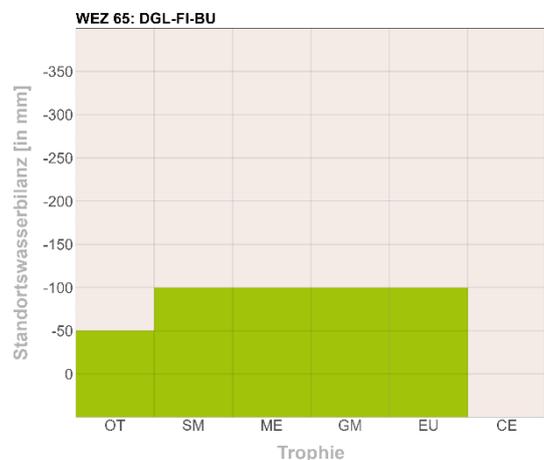
| | |
|----------------------|---------|
| Douglasie | 50-60 % |
| Fichte | 20-30 % |
| Buche (HBu oder WLi) | 10-20 % |
| Begleitbaumarten | 10 % |

Verjüngungsziel

| | |
|----------------------|----------|
| Douglasie | 30-50 % |
| Fichte | 20-40 % |
| Buche (HBu oder WLi) | 10-20 % |
| Begleitbaumarten | bis 10 % |

Mischungsform

Trupp- bis gruppenweise ungleichaltrig, oft mit Vorverjüngung des Ausgangsbestandes (z.B. Fichte); auf trockeneren Standorten ist bei Fichtennaturverjüngungen der Fichtenanteil stark zugunsten der standortgerechten Baumarten zu reduzieren.



WEZ 67 Douglasie/Küstentanne-Kiefer-Buche

Leitbild

Femelartig strukturierter Mischwald aus Douglasie oder Küstentanne mit gruppen-, horst und kleinflächenweise älterer Kiefer aus dem Vorbestand. Buche in Gruppen bis Horsten beige-mischt sowie mit sukzessionalen Begleitbaumarten wie Eiche, Eberesche, Salweide u.a.. Bei hohem Trockenstressrisiko für die Buche können Roteiche, ggf. Hainbuche bzw. Winterlinde die Rolle der Mischbaumart übernehmen.

Sukzessionale Stellung/Naturnähe

Das WEZ hat mit seinen ökologisch wirksamen Buchenanteilen Anknüpfungen zu den sukzessionalen Stadien des Hainsimsen-Buchenwaldes. Die Kiefer und ggf. Begleitbaumarten bringen Vegetationselemente sukzessionaler Frühstadien verschiedener Waldgesellschaften ein.

Schutz und Erholung

Erhaltung der einheimischen Vegetationselemente mit Option einer raschen Einbringung von Buche in Löchern oder unter der lichtdurchlässigen Kiefer. Erhaltung von Höhlenbäumen, Alt- und Totholz besonders bei Kiefer. Abwechslungsreiches Waldbild durch die ausgeprägte horizontale und vertikale Struktur sowie die Baumartenmischung.

Produktionsziele

| | | |
|-------------------------------|--------------------------|----------------|
| Douglasienwertholz | Zielstärke BHD 70+ cm in | 80-120 Jahren |
| Douglasiensägeholz | Zielstärke BHD 50+ cm in | 60-100 Jahren |
| Küstentannensägeholz | Zielstärke BHD 45+ cm in | 40- 60 Jahren |
| Küstentanne als Holzwerkstoff | Zielstärke BHD 30+ cm in | 20- 30 Jahren |
| Kiefernwertholz | Zielstärke BHD 55+ cm in | 120-160 Jahren |
| Kiefern-sägeholz | Zielstärke BHD 45+ cm in | 100-160 Jahren |
| Buchensägeholz (HBu oder WLi) | Zielstärke BHD 50+ cm in | 100-160 Jahren |

Baumartenanteile und Standortsspektrum

Entwicklungsziel

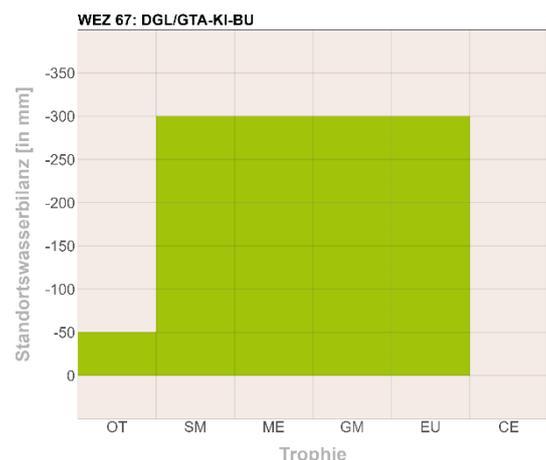
| | |
|------------------------------------|---------|
| Douglasie/Küstentanne | 40-60 % |
| Kiefer | 20-30 % |
| Buche | |
| (Roteiche, Hainbuche, Winterlinde) | 10-30 % |
| Begleitbaumarten | 10 % |

Verjüngungsziel

| | |
|------------------------------------|----------|
| Douglasie/Küstentanne | 30-60 % |
| Kiefer | 20-60 % |
| Buche | |
| (Roteiche, Hainbuche, Winterlinde) | 10-20 % |
| Begleitbaumarten | bis 10 % |

Mischungsform

Horst- bis kleinflächenweise, anfangs nur mit Altersdifferenzierung zwischen den Baumarten, bei späteren Verjüngungsphasen ungleichaltrig, femelartig. Buche i.d.R. aus Nachanbau.



WEZ 71 Kiefer-Eiche

Leitbild

Meist einschichtige, gruppen- bis kleinflächeweise gemischte Wälder aus vorherrschender Kiefer und beigemischter Eiche und ggf. Roteiche. Wechselnde Anteile von Begleitbaumarten wie Birke, Eberesche, Aspe, z.T. auch Buche.

Sukzessionale Stellung/Naturnähe

Entspricht teilweise einer kiefernbetonten Phase der natürlichen Waldgesellschaft trockener Kiefern-Eichen-Mischwälder auf ärmeren Sandstandorten, sonst sukzessionalen Frühstadien verschiedener Waldgesellschaften.

Schutz und Erholung

Erhaltung natürlicher Waldgesellschaften und Sukzessionsstadien mit besonderer Berücksichtigung trockenheitsertragender/ lichtliebender Tier- und Pflanzenarten. Im ganzen Jahr abwechslungsreiche, lichte Wälder.

Produktionsziele

| | |
|------------------------|---|
| Kiefersägeholz | Zielstärke BHD 40+ cm in 100-160 Jahren |
| Eichensägeholz | Zielstärke BHD 50+ cm in 180-240 Jahren |
| Ggf. Roteichensägeholz | Zielstärke BHD 50+ cm in 90-120 Jahren |

Baumartenanteile und Standortsspektrum

Entwicklungsziel

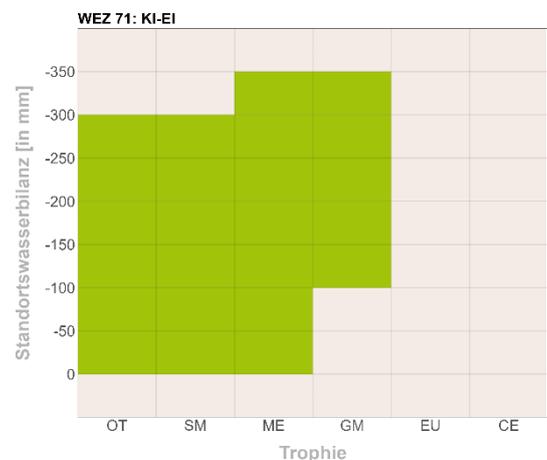
| | |
|------------------|----------|
| Kiefer | 60-70 % |
| Eiche | 20-30 % |
| ggf. Roteiche | bis 30 % |
| Begleitbaumarten | 10-20 % |

Verjüngungsziel

| | |
|------------------|----------|
| Kiefer | 50-70 % |
| Eiche | 20-30 % |
| ggf. Roteiche | 20-30 % |
| Begleitbaumarten | bis 20 % |

Mischungsform

Möglichst natürlich verjüngte Kiefer mit einzeln bis flächenweise beigemischter Eiche (meist aus Häher-saat), ggf. Roteiche aus kleinflächweisem Vorkanbau und Birke aus Naturverjüngung.



WEZ 72 Kiefer-Buche-Lärche

Leitbild

Gruppen- bis horstweise horizontal strukturierter Mischwald aus vorherrschender Kiefer, Buche (HBu oder WLi) und Lärche mit Buche im Zwischen- und Unterstand sowie femelartigen Verjüngungsstrukturen und sukzessionalen Begleitbaumarten, u.a. Fichte, Eiche, Birke, Eberesche oder Aspe. Ausgangsstadien sind mehr oder weniger reine Kiefernwälder des Burgwaldes, des osthessischen Buntsandstein-Bereiches und des Odenwaldes.

Sukzessionale Stellung/Naturnähe

Das WEZ besitzt mit seinen ökologisch wirksamen Buchenanteilen Übergangsphasen zu den sukzessionalen Stadien des Hainsimsen-Buchenwaldes.

Schutz und Erholung

Erhöhung der Wasserspende durch Zurückdrängen der Grasdecken; Schutz und Pflege von Sukzessionsstadien des Hainsimsen-Buchenwaldes. Abwechslungsreiche Waldstrukturen; kulturhistorisch bedeutsam, da dieses WEZ die „Kurhessen-Mischung“ repräsentiert, die sich in der Vergangenheit als risikoarm erwiesen hat.

Produktionsziele

| | |
|------------------|---|
| Kiefernwertholz | Zielstärke BHD 55+ cm in 100-140 Jahren |
| Kiefern sägeholz | Zielstärke BHD 45+ cm in 100-140 Jahren |
| Buchensägeholz | Zielstärke BHD 55+ cm in 100-160 Jahren |
| Lärchenwertholz | Zielstärke BHD 60+ cm in 80-140 Jahren |
| Lärchensägeholz | Zielstärke BHD 50+ cm in 60-100 Jahren |

Baumartenanteile und Standortsspektrum

Entwicklungsziel

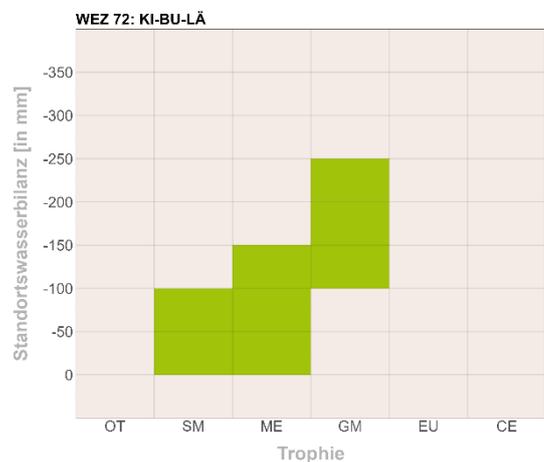
| | |
|----------------------|---------|
| Kiefer | 40-60 % |
| Buche (HBu oder WLi) | 20-30 % |
| Lärche | 20-40 % |
| Begleitbaumarten | 10 % |

Verjüngungsziel

| | |
|----------------------|----------|
| Kiefer | 30-60 % |
| Buche (HBu oder WLi) | 20-60 % |
| Lärche | 20-60 % |
| Begleitbaumarten | bis 20 % |

Mischungsform

Gruppen- bis horstweise.



WEZ 74 Kiefer-Birke

Leitbild

Einschichtig bis mosaikartig nach Trupps, Gruppen und Horsten vertikal gegliederte oder femailartig aufgebaute Mischwälder aus Kiefer und Birke sowie sonstigen Begleitbaumarten wie Stieleiche, Traubeneiche, Eberesche, Aspe, Salweide, Buche u.a. meist auf ärmeren Standorten.

Sukzessionale Stellung/Naturnähe

Es handelt sich um frühe („Pionier“-)Stadien sekundärer Sukzessionen in verschiedenen natürlichen Waldgesellschaften.

Schutz und Erholung

Pflege früher sukzessionaler Entwicklungsstadien und der dazugehörigen, z.T. stärker spezialisierten lichtliebenden, säuretoleranten Fauna und Flora. Lichte Wälder mit schönem Frühjahrs- und Herbstaspekt.

Produktionsziele

Teilweise Extensivierung der Holzproduktion

Kiefersägeholz Zielstärke BHD 40+ cm in 120-160 Jahren

Birkensägeholz Zielstärke BHD 40+ cm in 60- 80 Jahren

Baumartenanteile und Standortsspektrum

Entwicklungsziel

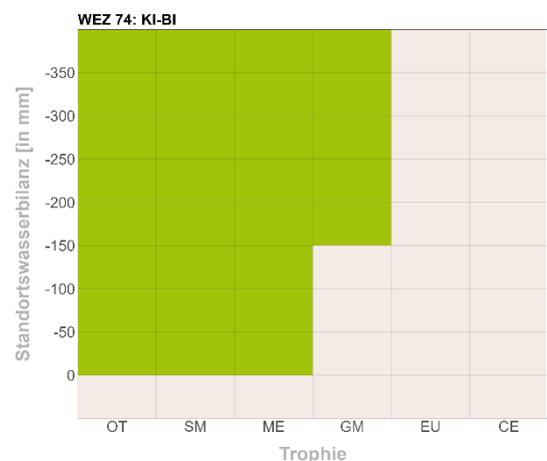
| | |
|------------------|---------|
| Kiefer | 60-70 % |
| Birke | 20-40 % |
| Begleitbaumarten | 10-20 % |

Verjüngungsziel

| | |
|------------------|---------|
| Kiefer | 50-70 % |
| Birke | 20-50 % |
| Begleitbaumarten | 10-30 % |

Mischungsform

Einzel bis horstweise Birke in Femeln, aber auch einschichtiger Wald möglich. Erhalt sukzessionaler Tendenzen zu laubholzreicheren Wäldern.



WEZ 75 Kiefer-Buche-Fichte

Leitbild

Einschichtiger bis stufiger Mischwald aus Kiefer, Fichte, Buche sowie sukzessionalen Begleitbaumarten wie Birke, Eberesche, Stieleiche, Roterle, Aspe u.a.

Sukzessionale Stellung/Naturnähe

Das WEZ hat mit seinen ökologisch wirksamen Anteilen an Buche bzw. heimischen Laubbaumarten (HBu oder WLi) Anknüpfungen zu den sukzessionalen Stadien des Hainsimsen-Buchenwaldes.

Schutz und Erholung

Erhaltung von Birkenanteilen als Bestandteil der natürlichen Waldgesellschaft sowie aller sukzessionalen Begleitbaumarten. Abwechslungs- und strukturreiche Wälder.

Produktionsziele

(Teilweise extensive Holzproduktion in gering nährstoffversorgten Nassbereichen)

Kiefersägeholz Zielstärke BHD 45+ cm in 120-140 Jahren

Buchensägeholz Zielstärke BHD 50+ cm in 120-160 Jahren

Fichtensägeholz Zielstärke BHD 40+ cm in 60-100 Jahren

Baumartenanteile und Standortsspektrum

Entwicklungsziel

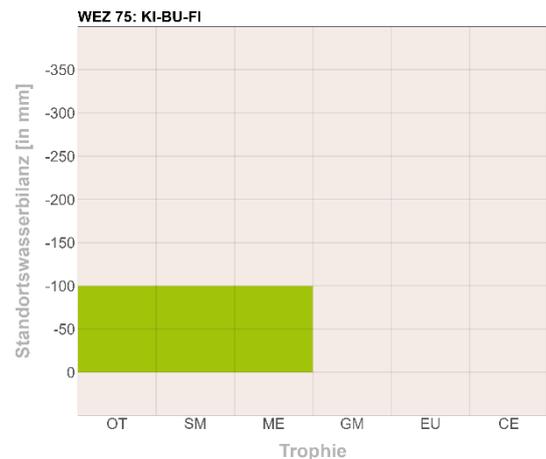
| | |
|----------------------|----------|
| Kiefer | 40-70 % |
| Buche (HBu oder WLi) | 10-30 % |
| Fichte | bis 25 % |
| Begleitbaumarten | 20 % |

Verjüngungsziel

| | |
|----------------------|----------|
| Kiefer | 60-70 % |
| Buche (HBu oder WLi) | 10-20 % |
| Fichte | bis 20 % |
| Begleitbaumarten | bis 20 % |

Mischungsform

Fichte und Buche einzeln bis gruppenweise im Kiefernwald, möglichst alle Baumarten aus Naturverjüngung. Ganz- oder teilflächiger, stufiger Fichtennachwuchs.



WEZ 76 Kiefer-Douglasie-Buche

Leitbild

Zweischichtiger bis stufiger Wald aus Kiefer mit gruppen- bis horstweiser Beimischung von Douglasie sowie einzelner bis truppweiser Buche, auf trockeneren Standorten ggf. Hainbuche/ Winterlinde oder Roteiche, sowie Begleitbaumarten wie Eiche, Birke, Eberesche, Aspe u.a.

Sukzessionale Stellung/Naturnähe

Entspricht im planaren Bereich frühen Sukzessionsstadien nach Großstörungen, die sich später zu Buchenwäldern armer Ausprägungen entwickeln. In standörtlichen Extrembereichen (Trockenheit, Nährstoffarmut) mit intensivem Störungsregime auch wiederkehrende Kiefern Sukzessionen. Veränderung durch die nicht heimische Douglasie.

Schutz und Erholung

Übergang zu Heidelbeer-Traubeneichen-Buchenwäldern oder Hainsimsen-Buchenwäldern jeweils mit der zugehörigen lichtbedürftigen Flora und Fauna.

Produktionsziele

| | |
|--------------------------------|---|
| Kiefernwertholz | Zielstärke BHD 55+ cm in 120-160 Jahren |
| Kiefern sägeholz | Zielstärke BHD 45+ cm in 120-160 Jahren |
| Buchensägeholz | Zielstärke BHD 55+ cm in 100-160 Jahren |
| Douglasienwertholz | Zielstärke BHD 70+ cm in 80-120 Jahren |
| Douglasien sägeholz | Zielstärke BHD 50+ cm in 60-100 Jahren |
| Ggf. Linden-/Roteichensägeholz | Zielstärke BHD 50+ cm in 90-120 Jahren |

Baumartenanteile und Standortsspektrum

Entwicklungsziel

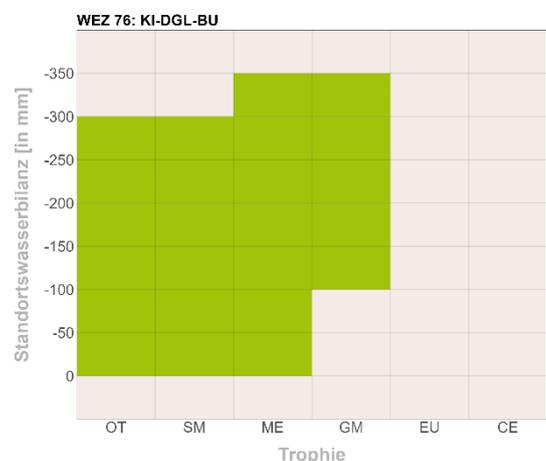
| | |
|---------------------------------|---------|
| Kiefer | 40-70 % |
| Buche (ggf. HBu/ WLi/ Roteiche) | 20-40 % |
| Douglasie | 20-40 % |
| Begleitbaumarten | 10 % |

Verjüngungsziel

| | |
|---------------------------------|----------|
| Kiefer | 40-70 % |
| Buche (ggf. HBu/ WLi, Roteiche) | 20-50 % |
| Douglasie | 10-30 % |
| Begleitbaumarten | bis 20 % |

Mischungsform

Häufig zunächst zweischichtig, später stufig mit gruppen- bis horstweiser Mischung von Kiefer, Douglasie und Laubbäumen. Buche (HBu/ WLi oder Roteiche) aus Naturverjüngung oder Voranbau.



WEZ 82 Lärche-Buche

Leitbild

Langfristig zu entwickelnder Mischwald aus Europäischer Lärche und Buche (auf trockeneren Standorten ggf. Hainbuche, Winterlinde oder Roteiche) nach Freiflächensituationen. Häufig zweischichtig, in späteren Entwicklungsstadien getrennt nach Femeln unterschiedlichen Alters und unterschiedlicher Vertikalstruktur, ganz- bis teilflächig in unterschiedlicher Ausprägung Buchenunterstand. Begleitbaumarten wie Eiche, Eberesche, Salweide, Birke u.a.

Sukzessionale Stellung/Naturnähe

Mischbestandstyp auf besser versorgten, frischen bis mäßig frischen Standorten in der Ebene und an Sonnhängen bzw. auf frischen bis mäßig frischen Plateaus des Berglandes. Enthält ökologisch wirksame Anteile von Buche. In sukzessionaler Entwicklung älteren Sukzessionsstadien von Buchenwaldgesellschaften mit noch nicht verdrängten Mischbaumarten ähnlich, jedoch verändert durch die Lärche.

Schutz und Erholung

Einbringung und Erhaltung ökologisch wirksamer Anteile von Buche mit dem dazugehörigen Artenspektrum von Flora und Fauna.

Produktionsziele

| | |
|-----------------|---|
| Lärchenwertholz | Zielstärke BHD 70+ cm in 100-160 Jahren |
| Lärchensägeholz | Zielstärke BHD 50+ cm in 60-100 Jahren |
| Buchensägeholz | Zielstärke BHD 55+ cm in 100-140 Jahren |

Baumartenanteile und Standortsspektrum

Entwicklungsziel

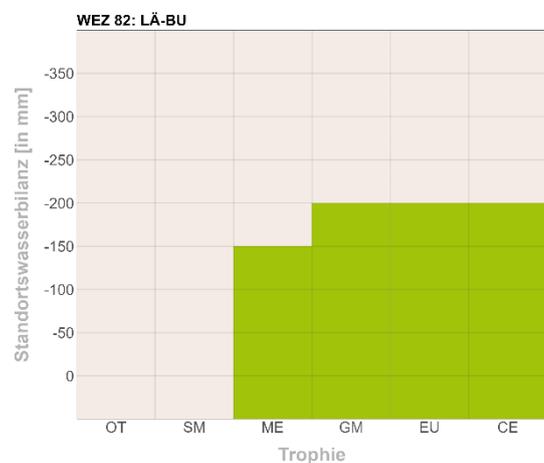
| | |
|------------------------------------|---------|
| Europäische Lärche | 50-80 % |
| Buche (ggf. HBU/ WLi/ Roteiche) | 10-40 % |
| Begleitbaumarten | 10-20 % |
| Auf ganzer Fläche Buchenunterstand | |

Verjüngungsziel

| | |
|---------------------------------|----------|
| Europäische Lärche | 60-80 % |
| Buche (ggf. HBU/ WLi/ Roteiche) | 20-40 % |
| Begleitbaumarten | bis 20 % |

Mischungsform

Durch Nachanbau gruppen- bis horstweise Beimischung der Buche.



Sonder - WEZ 50 R Fichte mit hohem Risiko

Leitbild

Entwicklung von heute oder künftig nicht mehr standortgerechten Fichten-Rein- und Fichten-Mischbeständen im Jungwuchs- bis einschließlich Auslesestadium in standortgerechte Mischbestände unter Einbeziehung vorhandener bzw. im Jungwuchsstadium noch zu ergänzender auch künftig standortgerechter Mischbaumarten.

Sukzessionale Stellung/Naturnähe

Entsprach bislang in den montanen/submontanen Lagen näherungsweise den Waldgesellschaften des Buchenmischwaldes, ansonsten handelt es sich um Ersatzwaldgesellschaften, die in künftig standortgerechte Waldgesellschaften mit ökologisch wirksamen Anteilen heimischer Laubbaumarten entwickelt werden sollen.

Schutz und Erholung

Erhalt früher Waldentwicklungsstadien mit Überführung in strukturreiche, stabile Mischbestände einschließlich der dazugehörigen Fauna und Flora. Mit der Zeit abwechslungsreiche Waldbilder.

Produktionsziele

Fichtensägeholz Zielstärke BHD 35+ cm in 40 - 50 Jahren

Behandlungshinweise:

- Stammzahlreduktion in wenig differenzierter Fichtennaturverjüngung auf ca. 2.500 St./ha
- Förderung vorhandener bzw. Ergänzung standortgerechter, stabilisierender Mischbaumarten
- frühe, starke Eingriffe zur Förderung der vitalsten Bäume
- Absenkung der Zielstärke und verkürzte Produktionszeit

Baumartenanteile und Standortsspektrum

Übergangs-Entwicklungsziel

Fichte < 50-70 %
Standortgerechte Mischbaumarten 10-40 %
Begleitbaumarten 10-20 %

Verjüngungsziel

Ausgangssituation: Ergänzung von flächig aufgelaufener Fichten-Naturverjüngung im Jungwuchsstadium mit Mischbaumarten, die dem künftigen Waldentwicklungsziel entsprechen und/oder Mischwuchsregulierung zugunsten auch künftig standortgerechter Misch- und Begleitbaumarten

Langfristige Waldentwicklungsziele der Überführung bzw. des Umbaus in Abhängigkeit vom Standort:

| SWB (Trophie) | WEZ | Maßnahmen |
|---------------|---|--|
| SWB Kl. 3 | WEZ 50 R → WEZ 23, 25, 26, 28, 29 WEZ 50 R → WEZ 55 WEZ 50 R → WEZ 62, 65 WEZ 50 R → WEZ 71, 72, 74, 75, 76 WEZ 50 R → WEZ 82 | Waldüberführung/ -umbau über VA mit Buche, ggf. WTA, DGL, ELÄ oder KI in Löchern |

| | | |
|-------------------------------|---|--|
| SWB Kl. 4 – 6 | WEZ 50 R → WEZ 62 WEZ 50 R → WEZ 71, 72, 74, 75, 76 WEZ 50 R → WEZ 82 | Waldumbau über VA mit Buche, DGL/ELA/KI in Löchern |
| wechselfeucht | WEZ 50 R → WEZ 10 WEZ 50 R → WEZ 55 | Waldumbau nach flächigen Störungen, ggf. WTA mit Buche bei kleinflächigen Störungen |
| hydromorph; min. mesotroph | WEZ 50 R → WEZ 10 WEZ 50 R → WEZ 31, 39 WEZ 50 R → WEZ 55 | Waldumbau mit ELB oder Weißtanne in Löchern |

Mischungsform

Fichte horst- bis kleinflächenweise, Mischbaumarten einzeln bis horstweise

Sonder - WEZ 20 R Buche mit hohem Risiko

Leitbild

Entwicklung von heute oder künftig nicht mehr standortgerechten Buchen-Rein- und Buchen-Mischbeständen in klimaangepasste, standortgerechte Mischbestände unter Einbeziehung vorhandener bzw. im Jungwuchsstadium noch zu ergänzender auch künftig standortgerechter Mischbaumarten. Dieses WEZ **umfasst alle buchengeführten WEZ** mit hohem Risiko der Buche.

Sukzessionale Stellung/Naturnähe

Entsprach bislang in den kollinen bis submontanen Lagen den natürlichen Waldgesellschaften des Buchen- und Buchenmischwaldes. Diese Wälder sollen langfristig zu klimastabilen, standortgerechten Mischwäldern entwickelt werden.

Schutz und Erholung

Natürliche Waldgesellschaften mit Höhlenbäumen, Alt- und Totholz; schattige Wälder mit wenig Bodenvegetation werden mit der Begünstigung von trockenstresstoleranteren Baumarten lichter und abwechslungsreicher.

Produktionsziele

Buchensägeholz

Zielstärke BHD 50+ cm in 80-100 Jahren

Behandlungshinweise:

- Förderung vorhandener bzw. Ergänzung standortgerechter, stabilisierender Mischbaumarten in für die gewählte Baumart geeigneter Mischungsform
- In reinen Buchenpartien nur mäßig starke, dafür häufigere Eingriffe zur Förderung der vitalsten Bäume und zum Erhalt des Bestandesschlusses
- Absenkung der Zielstärke und verkürzte Produktionszeit

Baumartenanteile und Standortsspektrum

Übergangs-Entwicklungsziel

Die Buche soll nach Möglichkeit als führende Baumart zugunsten standortgerechter Mischbaumarten abgelöst werden.

| | |
|---------------------------------|-----------------------------------|
| Buche | < 50 % |
| Standortgerechte Mischbaumarten | 10-40 % (so viele wie möglich) |
| Begleitbaumarten | 10-20 % (in wechselnden Anteilen) |

Verjüngungsziel

Vorrangiges Ziel ist die Einbringung von zukünftig standortgerechten Misch- und Begleitbaumarten.

Ausgangssituationen:

- teilflächig aufgelaufene Buchen-Naturverjüngung im Jungwuchsstadium:
Ergänzung mit Mischbaumarten, die dem künftigen Waldentwicklungsziel entsprechen und/oder Mischwuchsregulierung zugunsten auch künftig standortgerechter Misch- und Begleitbaumarten
- Nach Ausfall von Fichte/Buche gelichtete Buchenwälder:
Nachanbau mit Küstentanne, bei besseren Lichtverhältnissen auch mit Ahorn, Douglasie oder Roteiche und im eutrophen Bereich mit Edellaubbäumen.

Langfristige Waldentwicklungsziele der Überführung bzw. des Umbaus in Abhängigkeit vom Standort:

| SWB | WEZ | Maßnahmen |
|--|---|---|
| SWB Kl. 4 (BU = M) | WEZ 20 R → WEZ 10, 13, 18 WEZ 20 R → WEZ 33, 39 WEZ 20 R → WEZ 62, 67 | Waldüberführung/Umbau mit EI, REI, ELB, GTA, DGL, KI oder ELA in Löchern; BU bleibt noch führend; wird dann zur Mischbaumart; ab SWB Kl. 5 wird BU langfristig zur Begleitbaumart |
| SWB Kl. 5 – 6 (BU = B) | WEZ 20 R → WEZ 82* WEZ 20 R → WEZ 53 WEZ 20 R → WEZ 72, 76 *WEZ 82 nicht mehr in SWB Kl. 6 (SW: nicht mehr in Kl. 5) | |
| wechselfeucht, tendierend zu wechselltrocken | WEZ 20 R → WEZ 10, 18 WEZ 20 R → WEZ 71, 74 WEZ 20 R → WEZ 13, 31 (EU, CE) | Waldumbau nach Störungen |

Mischungsform

Mischbaumarten horst- bis kleinflächenweise