



ARTENSTECKBRIEFE ERGÄNZENDER BAUMARTEN RHEINLAND-PFALZ

Mitteilungen aus der Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz Nr. 89/22



Französischer Ahorn



Italienischer Ahorn



Flaumeiche



Zerreiche



Edelkastanie



Mannaesche



Baumhasel



Südlicher Zürgelbaum



Bulgarische Tanne



Griechische Tanne



Atlaszeder



Libanonzeder



IMPRESSUM

Herausgeber:

Zentralstelle der Forstverwaltung
Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz (FAWF)
Hauptstr. 16
D-67705 Trippstadt
Telefon 06131 884 268-0, Telefax 06131 884 268-300
zdf.fawf@wald-rlp.de
www.fawf.wald.rlp.de

Verantwortlich:

Der Leiter der Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz

Dokumentation:

Mitteilung FAWF, Trippstadt
Nr. 89/22, 78 Seiten

Gestaltung, Grafik und Satz

Christine Romero, FAWF Rheinland-Pfalz

ISSN 1610-7705 Mitteilungen aus der
Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz, Nr. 89/22

nur als Download

<https://fawf.wald.rlp.de/index.php?id=2601>

Alle Rechte, insbesondere das Recht der Vervielfältigung und Verbreitung sowie der Übersetzung vorbehalten.

Titelbilder (Freigabe durch CC BY-SA 3.0/4.0):

1. Reihe oben (v.l.n.r.): Französischer Ahorn (©Landesforsten RLP/A. Kleber; Italienischer Ahorn (©www.treeebb.de); Flaumeiche (©www.treeebb.de); Zerreiche (©F. Xaver)
2. Reihe mitte (v.l.n.r.): Edelkastanie (©Landesforsten RLP/B. Rose); Mannaesche (©Nedelin); Baumhasel (©Pyxlyst); Südlicher Zürgelbaum (©F. Xaver)
3. Reihe unten (v.l.n.r.): Bulgarische Tanne (©Nedelin); Atlaszeder (©C. Gurk); Libanonzeder (©Wikimedia Commons)

ARTENSTECKBRIEFE ERGÄNZENDER BAUMARTEN RHEINLAND-PFALZ

Klimatische und ökologische Bewertung von Baumarten aus dem europäisch-asiatischen und nordafrikanischen Kontakt- und Übergangsbereich als Entscheidungsgrundlage für die Einbringung ergänzender Baumarten bei der Förderung der Anpassungsfähigkeit unserer Wälder im Klimastress.

ASTRID KLEBER; PHILIPP REITER; ULRICH MATTHES

Rheinland-Pfalz Kompetenzzentrum für Klimawandelfolgen; Landesforsten Rheinland-Pfalz

Zentralstelle der Forstverwaltung

Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz,
Trippstadt 2022

VORWORT

Hochsommer 2022: Im vierten von fünf Jahren seit dem Jahr 2018 haben die Wälder in Rheinland-Pfalz nun bereits eine zu trockene und zu heiße Vegetationsperiode zu bestehen. Zum Zeitpunkt der Publikation dieser Studie hat sich eine erneute Hitzewelle mit Temperaturen von bis zu 40 Grad Celsius über das Land gelegt. Ergiebige Regenfälle sind, wie seit vielen Wochen schon, weiterhin nicht in Sicht. Nur noch sehr realitätsferne Menschen verneinen angesichts dieser Befunde, dass wir hier die Auswirkungen des Klimawandels am Werk sehen - ein Werk, das im Wald zu mitunter katastrophalen Bildern geführt hat. Nicht allein die gegen Windwurf und Borkenkäferbefall besonders anfällige Fichte, sondern überhaupt kaum eine heimische Baumart scheint davor gefeit zu sein, in den sich rapide ändernden Wachstums- und Umweltbedingungen Schaden zu nehmen. Hitze und Trockenheit schwächen die Vitalität der Bäume, Orkane werfen sie zu Boden, alteingesessene oder eingeschleppte Gegenspieler profitieren von alledem und sorgen für eine Ausweitung allfälliger Kalamitätsentwicklungen.

Die Wälder in Rheinland-Pfalz, das bereits heute mit 1,6 Grad Erwärmung in deutschlandweit überdurchschnittlichem Maße vom Klimawandel betroffen ist, ändern stetig ihr vertrautes und landschaftsprägendes Gesicht. Es sind gerade die alten, hohen Bäume, die von Hitzeschäden und Wassermangel besonders gezeichnet sind oder vom Sturm umgeworfen werden. Dies macht die Dramatik der Situation für jedermann besonders anschaulich.

Die Hoffnung für die Zukunft liegt im Baumnachwuchs. Dank drei Jahrzehnten naturnaher Waldbewirtschaftung in unserem Land hat sich vielerorts eine willkommene Naturverjüngung in den Wäldern eingestellt, die - zumindest bei angepassten Wildbeständen - häufig einen noch recht vitalen Eindruck macht. Auch auf entstehenden Kalamitätsflächen findet sich auf den meisten Standorten auf natürlichem Wege oft eine neue Baumgeneration ein, die die Vegetationsform Wald einstweilen zu sichern vermag.

Wo solche Voraussetzungen gegeben sind, werden sie in das Handeln der Forstleute integriert. Das Leitbild von Landesforsten Rheinland-Pfalz zum Umgang mit den Klimawandelfolgen im Wald setzt darauf, Naturverjüngungen ungeachtet ihrer Artenzusammensetzung zu übernehmen und die natürlich ablaufenden Prozesse weitgehend bei der Wiederbewaldung und Waldverjüngung zu nutzen. Dies sichert zugleich eine große genetische Variabilität des Baumnachwuchses, was mit Blick auf die bevorstehende weitere klimatische Entwicklung eine bestmögliche Risikovorsorge darstellt. Etwaige schon zum Zeitpunkt der Waldbegründung definierte "Produktionsziele" stehen demgegenüber im Hintergrund, entscheidend ist vielmehr eine möglichst klimaresiliente Waldentwicklung.

Zu diesem Leitbild der Risikovorsorge und Diversifizierung gehört auch, dass die heimische Baumartenpalette, die auf allen Standorten die Grundmatrix der Waldentwicklung bilden soll, in Abhängigkeit von standörtlichen Ausgangsbedingungen und Entwicklungsszenarien gegebenenfalls mit sogenannten "ergänzenden Baumarten" angereichert wird. Dies soll dabei stets in "wohldosierter" Beimischung und auf der Basis von Eignungsabschätzungen für den jeweiligen Standort geschehen. Voraussetzung dafür ist also zum einen eine dynamische Standortserkundung, wie sie in Rheinland-Pfalz für sämtliche Waldorte waldbesitzartenübergreifend bereits vorliegt bzw. derzeit noch komplettiert wird. Zum anderen bedarf es wissenschaftlicher Erkenntnisse über die Eigenschaften der in den Blick genommenen Baumarten.

Eben diese Erkenntnisse liefert nun die vorliegende FAWF-Mitteilung. Sie wird dem Praktiker helfen, bei Waldverjüngung und Waldumbau die richtigen Entscheidungen bei der Integration auch solcher Baumarten zu treffen, für die bislang - anders als etwa für Douglasie oder Roteiche - noch keine lange zurückreichenden Praxiserfahrungen vorliegen.

Betrachtet man die Auswahl, die notwendigerweise bei dieser Analyse zu treffen war, fällt auf, dass die betreffenden Baumarten oft Artbezeichnungen haben, die auf eine gewissermaßen nachbarschaftliche Provenienz verweisen. Adjektive wie französisch, italienisch, griechisch, bulgarisch, korsisch oder türkisch tauchen hier beispielsweise als Zusatz zu den Gattungsnamen auf. Die Gattungsbezeichnungen selbst hingegen - abies, pinus, acer, quercus u.a. - sind uns aus den heimischen Waldgesellschaften überwiegend bereits geläufig. Dies ist kein Zufall. Die Suche nach potentiell geeigneten ergänzenden Baumarten richtete sich gezielt an solchen Arten aus, die eine gute Integration in die hiesigen Ökosysteme erwarten lassen. Der südlich und südöstlich angrenzende Kontaktbereich an Mitteleuropa, in dem trockenere und heißere klimatische Bedingungen bei gleichzeitig weiterhin möglichen Winterfrostdlagen herrschen, umriss dazu den Suchraum. Der bevorzugte Blick auf hierzulande schon bekannte Gattungen fokussierte das Artenspektrum.

Im Ergebnis liegt nun eine Liste von 16 Baumarten vor, für die eine differenzierte und wissenschaftlich abgesicherte Abschätzung ihrer potentiellen Eignung unter bestimmten Randbedingungen vorgenommen worden ist. Den Waldbesitzenden kann empfohlen werden, die entsprechenden Feststellungen zur Grundlage ihrer Entscheidungen bei der Baumartenwahl zu machen. Damit verbindet sich zugleich ein Baustein bei der Bewältigung der wichtigen Zukunftsaufgabe, die Wälder in Rheinland-Pfalz in einer klimaresilienten Entwicklung zu unterstützen.

Der Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft und dem dort angesiedelten Kompetenzzentrum für Klimawandelfolgen ist für diese Arbeit, die auch zu einer Versachlichung der mitunter eher weltanschaulich geprägten Diskussionen um Gastbaumarten beiträgt, sehr zu danken. Mit der Studie wird einmal mehr die Bedeutung wissenschaftlicher Unterstützung der Waldbesitzenden im Umgang mit den Klimawandelfolgen unterstrichen, zu der sich die Landesregierung in der Mainzer Walderklärung des Jahres 2019 verpflichtet hat.

Mainz, im Juli 2022

Dr. Jens Jacob

INHALTSVERZEICHNIS

Zusammenfassung.....	1
1. Einleitung.....	2
2. Methoden.....	4
2.1 Klimatische Eignungsbewertung.....	4
2.2 Literaturrecherche zur ökologischen und waldwirtschaftlichen Bewertung.....	15
3 Ergebnisse und Diskussion.....	16
3.1 <i>Abies bornmuelleriana</i> – Türkische Tanne.....	16
3.2 <i>Abies borisii-regis</i> – Bulgarische Tanne.....	17
3.3 <i>Abies cephalonica</i> – Griechische Tanne.....	19
3.4 <i>Pinus nigra laricio</i> – Korsische Schwarzkiefer.....	22
3.5 <i>Cedrus atlantica</i> – Atlaszeder.....	23
3.6 <i>Cedrus libani</i> – Libanonzeder.....	26
3.7 <i>Acer monspessulanum</i> – Französischer Ahorn.....	27
3.8 <i>Acer opalus</i> – Italienischer Ahorn.....	29
3.9 <i>Castanea sativa</i> – Edelkastanie.....	30
3.10 <i>Celtis australis</i> – Südlicher Zürgelbaum.....	32
3.11 <i>Corylus colurna</i> – Baumhasel.....	33
3.12 <i>Fraxinus ornus</i> – Mannaesche.....	35
3.13 <i>Juglans regia</i> – Walnussbaum.....	36
3.14 <i>Quercus cerris</i> – Zerreiche.....	38
3.15 <i>Quercus pubescens</i> – Flaumeiche.....	39
3.16 <i>Tilia tomentosa</i> – Silberlinde.....	41
4 Methodendiskussion.....	43
4.1 Begründung der angewandten Methoden.....	43
4.2 Stärken und Schwächen der Methodik.....	44
5 Schlussfolgerungen für die Praxis / Fazit.....	46
Literaturverzeichnis.....	48
Anhang.....	51



Zusammenfassung

Die Waldökosysteme in Rheinland-Pfalz sind zunehmend von den Folgen des Klimawandels betroffen. Vor allem Trocken- und Hitzeperioden haben in den vergangenen Jahren in Verbindung mit dem verstärkten Auftreten von Krankheiten und natürlichen Gegenspielern zu Vitalitätseinbußen und Absterben von Bäumen geführt – und dies nicht nur bei der besonders vom Klimawandel betroffenen Fichte, sondern auch bei mehreren heimischen Laub- und Nadelbaumarten. Der fortschreitende Klimawandel wird den Klimastress weiter verstärken. Es bestehen Zweifel, dass unsere standortheimischen bzw. bislang standortgerechten Baumarten sich ausreichend an den Klimawandel anpassen können. Damit besteht insbesondere auf vulnerablen Standorten die Gefahr, dass der Wald in Rheinland-Pfalz wichtige Ökosystemfunktionen und -leistungen künftig nicht mehr erfüllen kann.

Zur Verbesserung der Resilienz der Wälder im Klimawandel erscheint es daher sinnvoll und geboten, auf wissenschaftlich fundierter Basis zu prüfen, inwieweit das in Rheinland-Pfalz vorhandene Baumartenspektrum durch nicht-heimische, hitze- und trockenresistente Baumarten ergänzt werden kann. Aus mehreren, näher aufgeführten Gründen wurden ausschließlich Baumarten aus dem europäisch-asiatischen und nordafrikanischen Kontakt- und Übergangsbereich betrachtet. Um Risiken bestmöglich abschätzen zu können, wurde eine Bewertung der klimatischen Eignung auf Basis von Klimahüllen erstellt. Weiterhin erfolgte eine ökologische und waldwirtschaftliche Bewertung. Alle Informationen gehen zukünftig in das Standortinformationssystem von Rheinland-Pfalz ein.

Zur Bewertung der klimatischen Eignung wurde für jede Baumart ein Verbreitungsgebiet auf Basis der Datensätze *European Atlas of Forest Tree Species* und *EUFORGEN*, alternativ *EU-Forest*, definiert. Es erfolgte für jede Baumart eine Korrektur auf Kontinentalgrenzen und Höhenlagen. Auf Basis des Datensatzes *WorldClim2.0* wurden 13 klimatische Kenngrößen für das jeweilige Verbreitungsgebiet ermittelt und zu 16 Klimahüllen kombiniert. Die klimatische Eignung wurde in 4 Kategorien anhand der Übereinstimmung mit dem Klima je Rasterzelle in Rheinland-Pfalz bewertet. Für das gegenwärtige Klima wurde dazu der Datensatz *HYRAS* des Deutschen Wetterdienstes verwendet. Für das zukünftige Klima wurde das vom „Bund-Länder-Fachgespräch Klimamodelldaten“ definierte *Referenzensemble für Klimawandelstudien* für das Szenario RCP8.5 verwendet. Die Spezifika und Grenzen der angewandten Methode werden diskutiert.

Im Ergebnis ergab die klimatische Bewertung eine fast flächendeckend sehr gute Eignung für die Baumarten Südlicher Zürgelbaum (*Celtis australis*), Mannaesche (*Fraxinus ornus*), Zerreiche (*Quercus cerris*) und Flaumeiche (*Quercus pubescens*). Auch der heimische, aber seltene Französische Ahorn (*Acer monspessulanum*) und die alteingeführte Edelkastanie (*Castanea sativa*) wurden gut bewertet. Regionale Einschränkungen der Eignung ergaben sich für weitere untersuchte Baumarten wie Bulgarische Tanne (*Abies borisii-regis*) sowie Atlas- und Libanonzedern (*Cedrus atlantica*, *C. libani*).

1. Einleitung

Der Wald erfüllt vielfältige Funktionen, die weit über die Leistung als Lebensraum hinausgehen. So ist das Wachstum von Bäumen elementar mit der Bindung von Kohlenstoffdioxid (CO₂) verknüpft und liefert durch die Langlebigkeit des Holzes einen wichtigen Beitrag zur Reduzierung dieses weiterhin in der Atmosphäre stark steigenden Treibhausgases (CHURKINA *et al.*, 2020). Insofern stellt der Erhalt des Waldes in seiner Fläche und Vitalität eine wichtige Maßnahme zum Klimaschutz dar. Darüber hinaus kommen dem Wald auch wichtige Schutz- und Versorgungsfunktionen zu, beispielsweise Wasserrückhalt, -filterung und -speicherung wie auch Frischluftproduktion. Der Erhalt dieser Funktionen wird durch den fortschreitenden Klimawandel zunehmend wichtiger, denn Hitzewellen, ausgeprägte Dürrephasen in der Vegetationszeit und extreme Starkregenereignisse werden die kommenden Jahrzehnte mit hoher Wahrscheinlichkeit prägen.

An graduelle klimatische Veränderungen können sich Ökosysteme in der Regel gut anpassen. Klimatische Extremereignisse verursachen dagegen oft Störungen, die zumindest vorübergehend auch Funktionsverluste zur Folge haben können (SEIDL & KAUTZ, 2019). Ob und in welchem Maße die Funktionen wiederhergestellt werden können, hängt von der Resilienz des Ökosystems ab. Steigende Temperaturen und extreme Dürrephasen fördern insbesondere die Störungsaktivität einiger Insekten, von Pathogenen und von Feuer (SEIDL & KAUTZ, 2019). Gleichzeitig schränkt Trockenstress die Abwehrmöglichkeiten der Bäume gegenüber Insekten- und Pathogenbefall ein, wodurch sie störungsanfälliger werden.

Die Walddynamik unterliegt zum Teil einer großen Trägheit, so dass die Baumartenzusammensetzung mehrere Jahrhunderte hinter der Klimaentwicklung herhinken kann (SEIDL & KAUTZ, 2019). Klimaprojektionen zeigen klimatische Entwicklungen auf, die mit den Anforderungen unserer heimischen Baumarten zum Teil nicht mehr übereinstimmen (KLIMAWANDELINFORMATIONSSYSTEM RLP, o. J.). Die jüngsten Jahre gelten als Zeiger-

jahre für die zukünftigen klimatischen Bedingungen in Rheinland-Pfalz und haben eindrucksvoll demonstriert, dass unsere heimischen Arten an den Rand ihrer Anpassungsfähigkeit gebracht werden können.

Bei der aktuellen Geschwindigkeit der klimatischen Veränderungen kann eine stark zeitverzögerte Anpassung der Baumartenzusammensetzung zu einem Komplettausfall des Systems Wald führen. Aus diesem Grund scheint es geboten, die Möglichkeiten der unterstützenden Waldentwicklung bestmöglich auszuschöpfen. Dazu zählt auch die gezielte Erweiterung der Baumartenvielfalt, die unter anderem durch Einbringung ergänzender Baumarten mit hoher Trockenheits- und Hitzeresistenz unterstützt werden kann (LANDESFORSTEN RHEINLAND-PFALZ, 2020).

Gegenüber Nordamerika und Ostasien hat Europa gegenwärtig eine sehr geringe Anzahl an Baumarten. Eine Erhöhung der derzeit geringen Vielfalt in Europa kann weitreichende positive Effekte mit sich bringen. Zum Beispiel können die Risiken der Massenvermehrung von Schädlingen minimiert und die Entstehung von Freiflächen bei Ausfall einer Art verhindert werden. Gleichzeitig kann sich eine hohe Artenvielfalt positiv auf die Produktivität des Waldes auswirken (KLEMMT, 2017).

Man geht davon aus, dass viele der Arten des Tertiärs während der letzten Kaltzeit in Nord- und Mitteleuropa nicht überleben konnten. Die im Süden vorgelagerten Meere und die Ost-West-Ausrichtung der süd- bis mitteleuropäischen Gebirge (Pyrenäen, Alpen und Karpaten) könnten eine Ursache dafür sein, dass Arten während der Kaltzeit nicht nach Süden ausweichen bzw. danach ihr Areal nicht ungehindert wieder nach Norden ausdehnen konnten. So wird von einer verzögerten Artverbreitung („postglaziale Migrationsverzögerung“) gesprochen. Demnach haben viele Arten derzeit noch nicht ihr vollständiges, aus klimatischer Sicht geeignetes Areal besiedelt, befinden sich also noch nicht in ihrem „klimatischen Gleichgewicht“ (NORMAND *et al.*, 2011;

SVENNING & SKOV, 2007). Dies legt nahe, dass diese Arten auch nördlich der genannten Gebirge geeignete Klimate vorfinden können. Gleichzeitig zeichnen sich viele der südeuropäischen Arten durch eine hohe Hitze- und Trockenheitstoleranz aus, die in Anbetracht der Ausprägungen des Klimawandels in Rheinland-Pfalz eine Grundvoraussetzung für die Wahl ergänzender Baumarten darstellt. Weiterhin spielt eine möglichst hohe Kompatibilität der einzuführenden Baumarten mit den lokalen Artengemeinschaften eine wichtige Rolle, um die Etablierung zu erleichtern und Risiken (z. B. durch invasives Verhalten) zu vermeiden (LANDESFORSTEN RHEINLAND-PFALZ, 2020; VOR *et al.*, 2015); eine lange Koevolution kann mutmaßlich dazu förderlich sein (LANDESFORSTEN RHEINLAND-PFALZ, 2020).

Die Verbreitung einer Baumart kann einerseits durch klimatische Parameter limitiert sein, andererseits können Boden- und biotische Faktoren die Etablierungsfähigkeit, Vitalität und Konkurrenzfähigkeit einer Baumart beeinflussen. Da aus verschiedenen Gründen eine gemeinsame quantitative Betrachtung aller die Verbreitung beeinflussenden Faktoren nicht möglich ist, haben wir uns im hier dargestellten Projekt auf eine quantitative Bewertung der klimatischen Eignung anhand eines Klimahüllen-Ansatzes konzentriert. Zur Gesamtbewertung der Baumarten wurde die klimatische Eignung um qualitative Aussagen zu Ansprüchen und Risiken der jeweiligen Baumart auf Basis bestehender Literatur ergänzt.

2. Methoden

2.1 Klimatische Eignungsbewertung

2.1.1 Definition des Zielgebietes

Bei der klimatischen Bewertung möglicher ergänzender Baumarten in Rheinland-Pfalz sollten aufgrund der Koevolution mit heimischen Gattungen ausschließlich Baumarten aus dem europäisch-asiatischen und -nordafrikanischen Kontakt- und Übergangsbereich berücksichtigt werden, da diese sich mutmaßlich risikoarm in unsere Ökosysteme integrieren können. Basierend auf Verbreitungsdaten dieser Baumarten aus verschiedenen Datensätzen wurde der räumliche Ausschnitt der Gesamtanalyse bestimmt und festgelegt (Abb. 2.1.1).

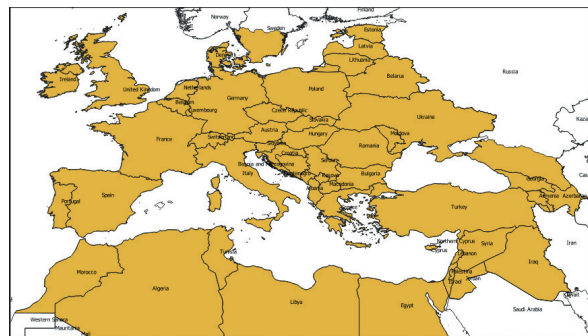


Abbildung 2.1.1: Räumlicher Ausschnitt der Gesamtanalyse

2.1.2 Verbreitungsdatenaufbereitung

Zur Erstellung der Klimahüllen musste für jede Baumart ein für die Analyse zu verwendendes Verbreitungsgebiet definiert werden. Hierzu wurden drei Datensätze herangezogen (Tab. 2.1.2-1).

Die beiden Datensätze European Atlas of Forest Tree Species (EAFTS) und EUFORGEN wurden bevorzugt und kombiniert verwendet, sofern sie beide für eine Baumart vorlagen. Der Datensatz EU-Forest wurde nur herangezogen, wenn aus den

anderen beiden Datensätzen keine Informationen für die Baumart zur Verfügung standen. Für drei Baumarten waren in keinem der drei Verbreitungsdatensätze Informationen verfügbar. Bei diesen Baumarten wurde eine eigene Digitalisierung von Verbreitungsinformationen auf Basis einer Literaturrecherche vorgenommen. Welche Datensätze je Baumart verwendet wurden, ist Tabelle 2.1.2-2 zu entnehmen.

Bei flächenbasierten Verbreitungsinformationen (EAFTS, EUFORGEN) wurde ein Puffer in Höhe der Hälfte der räumlichen Auflösung des Klimadatensatzes WorldClim2.0 (also 15" bzw. 1/240°) um die Polygone gelegt. Bei Punktinformationen (EAFTS, EU-Forest) wurde die 7,5-fache räumliche Auflösung (3' 45" bzw. 1/16°) als Puffer verwendet.

Tabelle 2.1.2-1:

Verwendete Datensätze

Datensatz	Datenart	Datenquelle	Literatur
European Atlas of Forest Tree Species (ohne synanthrope Vorkommen)	Shapefiles (Polygon, Point)	https://forest.jrc.ec.europa.eu/en/european-atlas/atlas-data-and-metadata/	SAN-MIGUEL-AYANZ, J <i>et al.</i> 2016 (European Commission. Joint Research Centre., 2016)
EUFORGEN	Shapefiles Polygon)	http://www.EUFORGEN.org/species/	DE VRIES <i>et al.</i> 2015 (VRIES <i>et al.</i> , 2015)
EU-Forest	Shapefiles (Point)	https://figshare.com/collections/A_high-resolution_pan-European_tree_occurrence_dataset/3288407	MAURI <i>et al.</i> 2017 (STRONA <i>et al.</i> , 2016)

Tabelle 2.1.2-2:

Verwendete Verbreitungsdatensätze je Baumart

Baumart	EAFTS	EUFORGEN	EU-Forest	verwendete Literatur
<i>Abies borisii-regis</i>	+	+		
<i>Abies bornmuelleriana</i>		+		
<i>Abies cephalonica</i>	+	+		
<i>Acer monspessulanum</i>			+	
<i>Acer opalus</i>			+	
<i>Castanea sativa</i>	+	+		
<i>Cedrus atlantica</i>				COURBET <i>et al.</i> 2012 (Polygone) (LAGACHERIE <i>et al.</i> , 2012)
<i>Cedrus libani</i>				HAJAR <i>et al.</i> 2010 (Polygone) (HAJAR <i>et al.</i> , 2010)
<i>Celtis australis</i>	+			
<i>Corylus colurna</i>				ALEXANDROV <i>et al.</i> 1995 (Punktdate, ohne Iran, Afghanistan) (ALEXANDROV, 2014)
<i>Fraxinus ornus</i>	+			
<i>Juglans regia</i>			+	
<i>Pinus nigra laricio</i>	+			
<i>Quercus cerris</i>	+	+		
<i>Quercus pubescens</i>	+			
<i>Tilia tomentosa</i>	+			

Die Verbreitungsinformationen in den Datensätzen waren zum Teil sehr generalisiert. So gingen Verbreitungsangaben über Kontinentalränder hinweg oder umfassten vegetationslose Höhenlagen. Zur Identifikation und Eliminierung solcher unplausiblen Verbreitungsangaben wurde daher eine algorithmusbasierte Nachbereitung der Datensätze durchgeführt.

Bei allen Baumarten wurden die Verbreitungsinformationen mit dem Zielgebiet verschnitten (Kap. 2.1.1), wodurch eine Eingrenzung auf kontinentale Flächen erreicht wurde.

Hierzu wurde das vorläufige Verbreitungsgebiet mit einem globalen Höhenmodell der NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration,

räumliche Auflösung 1/120°) verschnitten, um die von den Verbreitungsinformationen abgedeckte Spannweite der Höhen zu bestimmen und mit Literaturangaben abzugleichen. Bei deutlicher Über- oder Unterschreitung der Literaturangaben wurde das Verbreitungsgebiet auf die Bereiche eingegrenzt, die innerhalb der Literaturangaben liegen. Dieses Vorgehen betraf insgesamt 8 Baumarten (Tab. 2.1.2-3).

Abbildung 2.1.2-1 zeigt beispielhaft einen Ausschnitt des Verbreitungsgebietes der Griechischen Tanne (*Abies cephalonica*) basierend auf den Angaben der EAFTS- und EUFORGEN-Datensätze. Es deckt Höhenlagen zwischen 0 und 2100 m über NN ab. Laut Literaturangaben ist die Baum-

Tabelle 2.1.2-3:

Höhenverbreitung von 8 Baumarten nach Literaturangaben

Baumart	Höhen über NN
<i>Abies borisii regis</i>	400 – 2000 m (European Commission. Joint Research Centre., 2016; VRIES <i>et al.</i> , 2015)
<i>Abies bornmuelleriana</i>	400 – 2000 m (European Commission. Joint Research Centre., 2016; VRIES <i>et al.</i> , 2015)
<i>Abies cephalonica</i>	400 – 2100 m (European Commission. Joint Research Centre., 2016)
<i>Cedrus atlantica</i>	900 - 2500 m (BELOULA, 2010)
<i>Cedrus libani</i>	500 – 2500 m (COBANOGLU & SEVGI, 2009)
<i>Corylus colurna</i>	100 – 2000 m (ALEXANDROV, 2014; RICHTER, 2021)
<i>Castanea sativa</i>	0 – 1800 m (European Commission. Joint Research Centre., 2016)
<i>Pinus nigra laricio</i>	800 – 1500 m (EARLE, 2021)

art jedoch lediglich in Höhenbereichen ab 400 m über NN vorzufinden. Aus diesem Grund wurde das Verbreitungsgebiet auf Regionen mit Höhen innerhalb des in der Literatur angegebenen Höhenbereiches eingegrenzt. Die rot schraffierten Flächen stellen das Verbreitungsgebiet nach dieser Nachbereitung dar und veranschaulichen, dass alle unplausiblen Regionen, hier tiefgelegene Küstenbereiche, eliminiert wurden.

Zeigten sich beim Abgleich mit den Höhenangaben aus der Literatur keine deutlichen Abweichungen, so wurde dennoch eine Filterung über die temperaturbezogenen Klimakenngrößen (avg_* und $DD5_*$, Tab. 2.1.4) vorgenommen. Dies ist darin begründet, dass eine stichprobenhafte Überprüfung bei allen Baumarten Unplausibilitäten in den Verbreitungsangaben (bspw. vegetationslose Regionen) identifizierte und somit eine Nachbereitung nötig war. Dies geschah durch eine Eliminierung von Verbreitungsangaben in Regionen mit für den Rest des Verbreitungsgebietes ungewöhnlichen Temperaturangaben. Für jede temperaturbezogene Klimakenngröße wurden die Häufigkeitsverteilung im vorläufigen Verbreitungsgebiet bestimmt und Klassen mit einem Anteil von weniger als 0,5 % an der Gesamtverteilung eliminiert. Hieraus ergab sich jeweils ein kenngrößenspezifisches Verbreitungsgebiet,

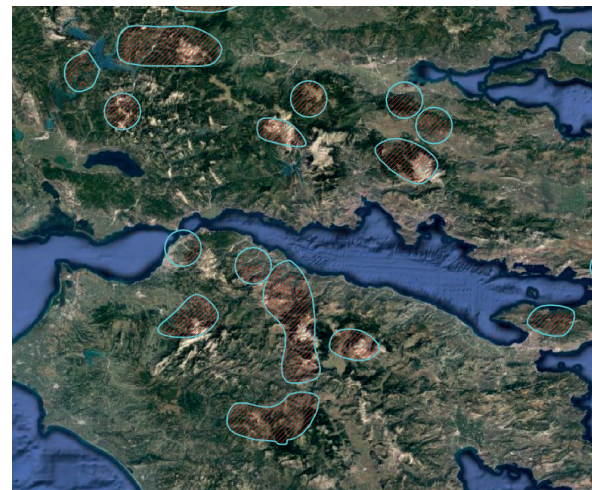


Abbildung 2.1.2-1: Ausschnitt des Verbreitungsgebietes der Griechischen Tanne (*Abies cephalonica*) nach Begrenzung auf die in der Literatur angegebenen Höhen.
Türkisfarbener Rahmen: Verbreitungsangaben auf Grundlage der verwendeten Datensätze.
Rote Schraffur: Verbreitungsgebiet der Baumart nach Eingrenzung auf Höhenbereiche aus Literaturangaben.

das mit der Häufigkeit der Verwendung dieser Klimakenngrößen in den 16 Klimakombinationen gewichtet wurde (beispielsweise avg_fvz : Wichtung 6, $DD5_kaljahr$: Wichtung 2). Die so erhaltenen Raster wurden summiert, wobei sich ein maximaler Rasterzellenwert von 19 (= Anzahl der Verwendung der zur Filterung herangezogenen

Klimakenngrößen in den 16 Klimakombinationen) ergeben konnte. Auf Grundlage eines verwendeten Schwellenwertes von 75 % gemessen am Maximalwert (also ≥ 15) wurde das Verbreitungsgebiet korrigiert.

Abbildung 2.1.2-2 zeigt beispielhaft die Verbreitung der Flaumeiche (*Quercus pubescens*) in den Westalpen. Die Verbreitungsdatensätze deklarieren die gesamte hellblau eingerahmte Fläche als Verbreitungsgebiet. Die hochalpinen Lagen sind jedoch unrealistisch. Die Nachbereitung durch Filterung der temperaturbezogenen Klimakenngrößen hat zu äußerst plausiblen Ergebnissen geführt. Die Hochlagen der Westalpen sind nicht mehr als Verbreitungsgebiet ausgewiesen und es verblieben in den betroffenen Regionen lediglich noch die Tallagen als Verbreitungsgebiet von *Quercus pubescens*.

Eine weitere Nachbereitung und Konzentration auf Kernbereiche der Verbreitung erfolgte im Zuge der Aufbereitung der Klimahüllen (Kap. 2.1.6).



Abbildung 2.1.2-2: Beispiel für eine plausiblere Verbreitung nach Korrektur der Verbreitungsdaten (hier Flaumeiche, *Quercus pubescens*, in den Westalpen) durch Filterung über die temperaturbezogenen Klimakenngrößen. Die hochalpinen Lagen sind nun ausgenommen.
Türkisfarbener Rahmen: Verbreitungsangaben auf Grundlage der verwendeten Datensätze.
Rote Schraffur: Verbreitungsgebiet nach Filterung.

2.1.3 Aufbereitung der Klimadaten

Insgesamt wurden im Projekt drei Klimadaten-sätze genutzt (Tab. 2.1.3-1). Für die Erstellung der Klimahüllen einer Baumart wurde der Datensatz WorldClim2.0 verwendet. Dieser war zum Zeitpunkt der Analysen der einzige verfügbare Datensatz, der für das gesamte unter 2.1.1 definierte Zielgebiet Klimadaten bereitstellte. Als Referenzprodukt für gegenwärtige Klimadaten für Rheinland-Pfalz wurde der Datensatz HYRAS des DWD verwendet. Mit ihm wurden die Daten des WorldClim2.0-Datensatzes im überlappenden Gebiet (Deutschland) abgeglichen, um deren Güte zu beurteilen. Weiterhin wurde mit Hilfe des HYRAS-Datensatzes die vergangene (Zeitraum 1971-2000) und gegenwärtige (Zeitraum 1986-2015) Eignung der Baumarten für Rheinland-Pfalz bewertet. Für die Bewertung der klimatischen Eignung der Baumarten in der Zukunft wurden Klimaprojektionen aus den beiden Projekten CORDEX und ReKliesDE verwendet, die durch den DWD im Rahmen des Projektes „BMVI-Expertenetzwerk“ weiter aufbereitet (bias-adjustiert und auf 5 km interpoliert) wurden. Für diese Aufbereitung war der HYRAS-Datensatz die Datengrundlage. Vom „Bund-Länder-Fachgespräch Klimamodell-daten“ wurden zehn dieser Klimaprojektionen für das Szenario RCP8.5 als Referenz-Ensemble für Klimawandelstudien definiert (BLFG-Referenzensemble, Tab. 2.1.3-2). Für die vorliegende Studie wurden ausschließlich diese zehn Projektionen verwendet.

Tabelle 2.1.3-1:

Übersicht über die verwendeten Klimadatenätze

	WorldClim2.0	HYRAS	BLFG-Referenzensemble
Datenart	Beobachtungsdaten	Beobachtungsdaten	bias-adjustierte Klimaprojektionen
Datenquelle	www.worldclim.org	DWD	BMVI-Expertennetzwerk
Literatur	FICK, S.E. and R.J. HIJMANS, 2017 (FICK & HIJMANS, 2017)	RAUTHE, M. <i>et al.</i> , 2013 FRICK, C. <i>et al.</i> , 2014 (FRICK <i>et al.</i> , 2014; RAUTHE <i>et al.</i> , 2013)	BRIENEN, S. <i>et al.</i> , 2020 (DEUTSCHER WETTERDIENST <i>et al.</i> , 2020)
räumliche Abdeckung	Welt	hydrologisches Deutschland	hydrologisches Deutschland
räumliche Auflösung	30'' (= 1/120° ; ~900 m in vertikaler Richtung in unseren Breiten und ~ 600 m in horizontaler Richtung)	5 km	5 km
Koordinatensystem	WGS84	EPSG3034	EPSG3034
zeitliche Auflösung	langjährige Monatsmittelwerte	Tagesdaten	Tagesdaten
Datenzeitraum	1970-2000	1951-2015	1951/71-2099/2100
betrachtete 30-Jahreszeiträume	1970-2000	1971-2000 1986-2015	1971-2000 2021-2050 2071-2100
Szenarien	-	-	RCP8.5
Verwendung	Ableitung Klimahüllen	Eignungsbewertung	Eignungsbewertung

Tabelle 2.1.3-2

Klimaprojektionen des BLFG-Referenzensembles.

Lfd.	Globales Klimamodell (GCM)	Lauf GCM	Regionales Klimamodell
1	ICHEC-EC-EARTH	r1i1p1	KNMI-RACMO22E
2	ICHEC-EC-EARTH	r12i1p1	UHOH-WRF361H
3	ICHEC-EC-EARTH	r12i1p1	CLMcom-CCLM4-8-17
4	ICHEC-EC-EARTH	r12i1p1	SMHI-RCA4
5	ICHEC-EC-EARTH	r12i1p1	KNMI-RACMO22E
6	MIROC-MIROC5	r1i1p1	CLMcom-CCLM4-8-17
7	MOHC-HadGEM2-ES	r1i1p1	UHOH-WRF361H
8	MPI-M-MPI-ESM-LR	r1i1p1	CLMcom-CCLM4-8-17
9	MPI-M-MPI-ESM-LR	r1i1p1	SMHI-RCA4
10	MPI-M-MPI-ESM-LR	r1i1p1	UHOH-WRF361H

2.1.4 Klimatische Kenngrößen

Da der WorldClim2.0-Datensatz lediglich langjährige Monatsmittelwerte bereitstellt, konnten klimatische Kenngrößen, die zeitlich höher aufgelöste Klimadaten voraussetzen, nicht für die Bewertung der Baumarteneignung herangezogen werden (beispielsweise Spätfrostgefährdung, Anzahl klimatologischer Kenntage, Dauer Vegetationsperiode etc.). Des Weiteren wiesen die Werte

der beiden Klimaparameter Minimum- und Maximumtemperatur signifikante Abweichungen vom Referenzdatensatz HYRAS auf und wurden daher nicht verwendet. Diese signifikanten Abweichungen sind darauf zurückzuführen, dass die Werte dieser beiden Klimaparameter im WorldClim2.0-Datensatz berechnet wurden und nicht auf konkreten Messwerten beruhen (pers. Mitteilung S. Fick, 2019). Insgesamt wurden 13 verschiedene Klimakenngrößen verwendet (Tab. 2.1.4).

Tabelle 2.1.4

Klimatische Kenngrößen, die zur Erstellung der Klimahüllen verwendet wurden.

Kenngröße	Parameter	Beschreibung
prec_kalJahr	Niederschlag	langjähriges Mittel des Jahresniederschlags
prec_fVZ	Niederschlag	langjähriges Mittel der Niederschlagssumme in der forstlichen Vegetationszeit
prec_NDJFM	Niederschlag	langjähriges Mittel der Niederschlagssumme in der Periode November bis März
prec_seasonality	Niederschlag	Quotient aus Standardabweichung langjähriger Monatsniederschlagssummen und Mittel der langjährigen mittleren Monatsniederschläge, multipliziert mit 100
tavg_kalJahr	Temperatur	langjährige Jahresmitteltemperatur
tavg_fVZ	Temperatur	langjährige Mitteltemperatur in der forstlichen Vegetationszeit Mai bis September
tavg_warmest	Temperatur	langjährige Mitteltemperatur des wärmsten Monats
tavg_coldest	Temperatur	langjährige Mitteltemperatur des kältesten Monats
tavg_range	Temperatur	Differenz zwischen langjähriger Mitteltemperatur des wärmsten und langjähriger Mitteltemperatur des kältesten Monats
tavg_vz_range	Temperatur	Differenz zwischen langjährigem Mittelwert des wärmsten Monats in der forstlichen Vegetationszeit und langjährigem Mittelwert des kältesten Monats in der forstlichen Vegetationszeit
tavg_seasonality	Temperatur	Quotient aus Standardabweichung langjähriger Monatsmitteltemperaturen und langjähriger Jahresmitteltemperatur, multipliziert mit 100
DD5_kalJahr	Temperatur	langjähriges Mittel der Wärmesumme im Kalenderjahr: Summe der langjährigen mittleren Monatsmitteltemperaturen minus 5 °C (multipliziert mit Anzahl Tage des Monats, Monatsmittelwerte < 5 °C wurden ignoriert)
vdi	Temperatur, Niederschlag	Trockenheitsindex forstliche Vegetationszeit: Quadratwurzel aus Quotient langjähriges Mittel der Wärmesumme in der forstlichen Vegetationszeit geteilt durch langjähriges Mittel der Niederschlagssumme in der forstlichen Vegetationszeit

2.1.5 Klimakombinationen

Zur Bewertung der klimatischen Eignung der Baumarten wurden die 13 Klimakenngrößen (Kap. 2.1.4) zu 16 zweidimensionalen Klimakombinationen kombiniert.

2.1.6 Ableitung der Klimahüllen für die Klimakombinationen

Zur Bestimmung der Klimahülle einer Klimakombination wurde zunächst eine leere „Eignungsmatrix“ mit Nullen angelegt. Dabei deckt die Eignungsmatrix jeweils den gesamten Wertebereich der beiden relevanten Klimakenngrößen im Zielgebiet in äquidistanten Schritten ab. So reicht beispielsweise die Spannweite der Jahres-

mitteltemperatur (tavg_kalJahr) von 20 °C bis +29 °C, der Niederschlag in der Vegetationszeit (prec_fVZ) von 0 bis 1200 mm.

Anschließend wurden für jede Gitterzelle des WorldClim2.0-Datensatzes, welche innerhalb des aufbereiteten Verbreitungsgebietes (Kap. 2.1.2) liegt, die Werte der beiden Klimakenngrößen abgefragt und in der jeweiligen Zelle der Eignungsmatrix der Wert um 1 erhöht. So wurde beispielsweise für eine Gitterzelle mit den Kennwerten tavg_kalJahr = 10,3 °C und prec_fVZ = 283 mm der Wert in der Matrix in der Zeile tavg_kalJahr „10_11“ und Spalte „250_300“ um 1 erhöht. Abb. 2.1.6-1 zeigt eine solche fertige Häufigkeitsmatrix.

Tabelle 2.1.5

Verwendete Klimakombinationen

Lfd.	Thematik	Klimakombination
1	Temperatur	DD5_kalJahr / tavg_coldest
2	Temperatur	tavg_coldest / tavg_fVZ
3	Temperatur	tavg_fVZ / tavg_kalJahr
4	Temperatur	tavg_range / tavg_fVZ
5	Temperatur	tavg_seasonality / tavg_kalJahr
6	Niederschlag	prec_fVZ / prec_kalJahr
7	Niederschlag	prec_seasonality / prec_kalJahr
8	Kombination Temperatur/Niederschlag	DD5_kalJahr / prec_kalJahr
9	Kombination Temperatur/Niederschlag	prec_NDJFM / tavg_fVZ
10	Kombination Temperatur/Niederschlag	tavg_fVZ / prec_kalJahr
11	Kombination Temperatur/Niederschlag	tavg_kalJahr / prec_fVZ
12	Kombination Temperatur/Niederschlag	tavg_kalJahr / prec_kalJahr
13	Kombination Temperatur/Niederschlag	tavg_range / prec_kalJahr
14	Kombination Temperatur/Niederschlag	tavg_vzrange / prec_fVZ
15	Kombination Temperatur/Niederschlag	tavg_warmest / prec_fVZ
16	Kombination Temperatur/Niederschlag	vdi / tavg_coldest

		prec_fvZ																						
tavg_kalJahr	0_50	50_100	100_150	150_200	200_250	250_300	300_350	350_400	400_450	450_500	500_550	550_600	600_650	650_700	700_750	750_800	800_850	850_900	900_950	950_1000	1000_1050	1050_1100	1100_1150	1150_1200
28_29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27_28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26_27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25_26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24_25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23_24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22_23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21_22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20_21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19_20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18_19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17_18	926	12016	80	110	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16_17	2695	30696	7319	5466	2105	773	250	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15_16	541	29010	23178	19253	14875	5059	2397	2144	126	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14_15	247	20932	41562	31597	26018	19278	7802	1939	659	74	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13_14	64	11232	48500	54710	30113	31738	25046	9107	4685	3644	414	103	72	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12_13	161	6683	48924	41385	53451	50295	60742	36646	10207	5224	658	382	568	509	282	103	30	8	0	0	0	0	0	0
11_12	88	37721	76600	35381	59277	177710	56732	42532	26233	4898	1197	929	751	929	528	301	165	85	46	18	0	0	0	0
10_11	0	13076	73240	27207	46662	169075	111591	70165	41189	21357	7617	1784	447	442	354	296	107	78	96	111	63	12	2	0
9_10	0	4620	44270	27317	20442	59205	111418	68562	29365	20699	13229	7998	5254	2608	1183	374	125	129	123	139	140	87	35	9
8_9	0	869	21920	15919	15261	16305	63231	56951	22437	13269	10057	5926	4938	2812	1133	797	277	248	205	211	136	33	0	0
7_8	0	9	13682	8407	9982	13413	13808	24657	21461	11945	6581	3273	2964	2081	1145	871	274	190	135	108	15	0	0	0
6_7	0	0	10095	5694	6697	7274	7908	10114	15753	10359	3366	3620	1738	1482	535	706	432	129	50	2	0	0	0	0
5_6	0	0	4185	2983	4153	2233	5001	4370	8631	6176	2724	2050	660	1016	585	340	346	332	10	0	0	0	0	0
4_5	0	0	1501	1376	1199	999	2164	2314	4920	2994	1464	1019	369	481	475	226	165	158	129	0	0	0	0	0
3_4	0	0	390	189	142	163	405	407	1053	586	128	127	41	25	77	16	5	6	0	0	0	0	0	0
2_3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1_2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0_1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Abbildung 2.1.6-1: Beispiel für eine Häufigkeitsmatrix anhand der Klimakenngrößen tavg_kalJahr und prec_fvZ für die Baumart Flaumeiche (*Quercus pubescens*).

Bei Übertragung der Werte in ein Diagramm ergibt sich die in Abb. 2.1.6-2 dargestellte Fläche als Klimahülle.

Die Klimahüllen wurden über die folgenden Schritte reduziert und plausibilisiert:

A) Reduzierung auf Kernhäufigkeitsmatrix: Wertekombinationen, die in der Häufigkeitsmatrix nur sehr gering besetzt, also im Verbreitungsgebiet sehr selten sind, wurden als nicht bedeutende bzw. unplausible Verbreitungsangaben interpretiert und die Matrix entsprechend reduziert. Um dies zu erreichen, wurde die Häufigkeitsmatrix durch die Gesamtsumme der Häufigkeitsmatrix geteilt, so dass man die relativen Anteile einer Wertekombination an der Gesamtverteilung der Wertekombinationen erhielt. Die Gesamtsumme dieser relativen Matrix belief sich somit auf 1. Anschließend wurde so lange die Wertekombination mit dem geringsten Anteil auf 0 bzw. Fehlwert gesetzt, bis die Gesamtsumme der Anteile kleiner/gleich 0.95 betrug. Die 100 %-Matrix wurde also auf eine 95 %-Matrix reduziert (Abb. 2.1.6-5b).

B) Sofern die 95 %-Hülle der betrachteten Klimakombination eine ausreichende Größe (Dimension von mindestens 3 x 3) aufwies, wurde ein „Formfitting“ in drei Schritten vorgenommen:

1. Eliminierung einzelner, aus einem „Kernbereich“ herausragender Zellen
2. Auffüllen von Lücken in ansonsten geschlossenen Bereichen

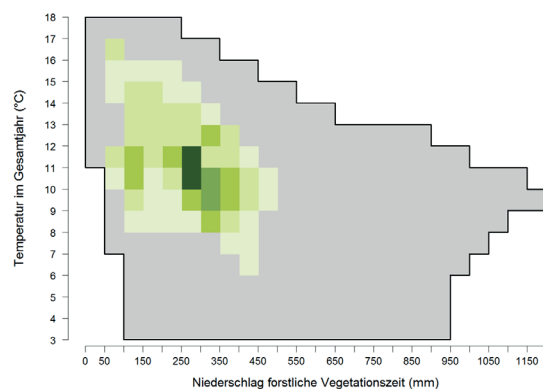
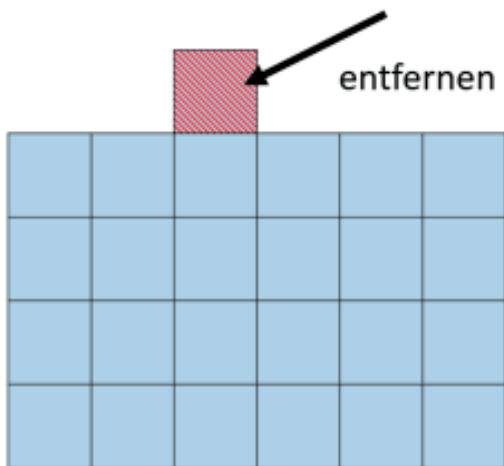


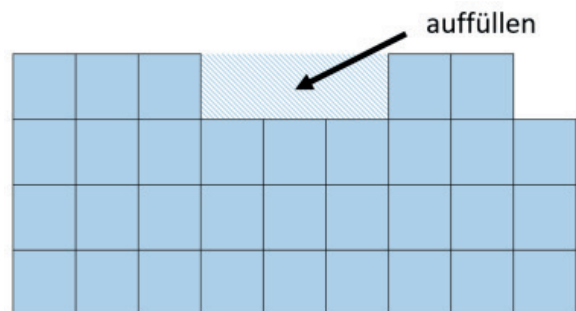
Abbildung 2.1.6-2: Beispiel für eine 100 %-Hülle der Klimakennwerte Temperatur im Gesamtjahr und Niederschlag in der forstlichen Vegetationszeit für die Baumart Flaumeiche (*Quercus pubescens*). Schwarze Umrandung: 100 %-Hülle. Grün: Kernbereich gemäß der Häufigkeit.

Die nach diesen Schritten erhaltene Klimahülle der betreffenden Klimakombination bezeichnen wir als 95g (geglättete)-Klimahülle (Abb. 2.1.6-5c).

Um die Gefahr einer zu starken Reduzierung durch die Glättung zu vermeiden, wurde überprüft, wie das Verhältnis der Anzahl der besetzten Rasterzellen in der 95g-Klimahülle gegenüber der Anzahl in der 95 %-Klimahülle ist. Lag der Anteil der 95g-Hülle unter 70 % (Abb. 2.1.6-4), so wurde die 95g-Klimahülle verworfen und eine neue Version der 95g-Klimahülle aus der 95 %-Klimahülle erstellt, wobei nur der 2. Schritt des Formfittings (Lückenfüllung) durchgeführt wurde.



Eliminierung einzelner, aus einem "Kernbereich" herausragender Zellen

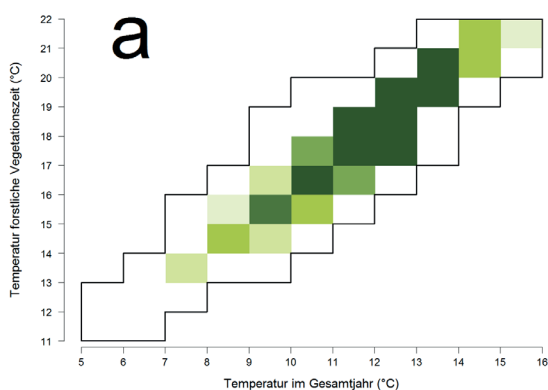


Auffüllen von Lücken in ansonsten geschlossenen Bereichen

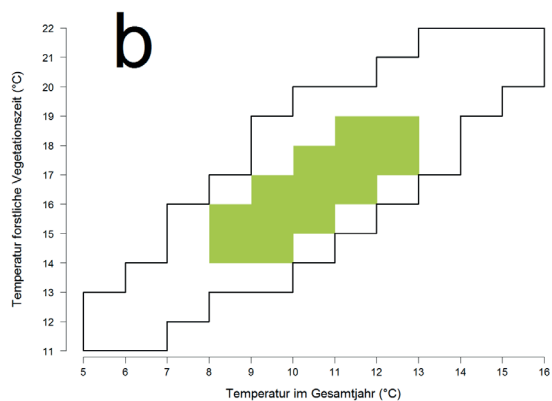
Abbildung 2.1.6-3: „Formfitting“ der Klimahüllen zur Eliminierung unplausibler Lücken und herausragender Zellen.

C) Die Klimahüllen bestimmter Klimakombinationen wurden in eine oder teilweise auch zwei Richtungen aufgefüllt, da diese Bereiche der Klimahülle als klimatisch geeignet angesehen wurden, auch wenn keine Vorkommen der Baumart in diesen Wertebereichen der Klimakombination existieren. So wurden beispielsweise Klimahüllen mit der Klimakenngröße *prec_kalJahr* immer der-

art aufgefüllt, dass höhere Jahresniederschläge auch als geeignet angesehen wurden. Dies erfolgte unter der Annahme, dass höhere Niederschläge sich nicht negativ auf die klimatische Eignung der Baumart auswirken. Alle aufgefüllten Klimakenngrößen sind in Tabelle 2.1.6 aufgeführt. (Abb. 2.1.6-5)



95 %-Hülle



Reduzierte 95 %-Hülle (95g) nach "Formfitting"

Abbildung 2.1.6-4: Beispiel für ein „Formfitting“, bei dem die Anzahl der Zellen zu stark reduziert wurde am Beispiel der Baumart Französischer Ahorn (*Acer monspessulanum*). Schwarze Umrandungen: 100 %-Hüllen. Grün: Kernbereiche.

Tabelle 2.1.6

Kenngrößen, die in eine unkritische Richtung aufgefüllt wurden.

Richtung des Auffüllens	Kenngrößen
größer	prec_kalJahr, prec_fVZ, prec_NDJFM, tavg_coldest,
kleiner	prec_seasonality, tavg_warmest, tavg_vzrange, tavg_range, tavg_seasonality, vdi

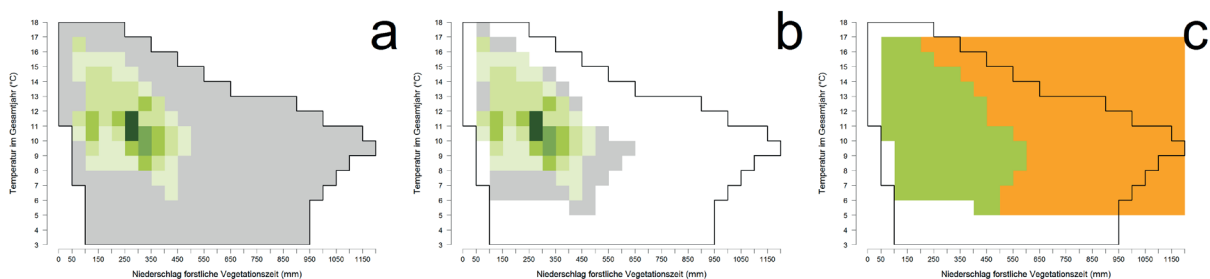


Abbildung 2.1.6-5: Übersicht über die Erstellung der zur Bewertung der klimatischen Eignung verwendeten Klimahüllen. a: Beispiel einer 100 %-Hülle der Klimakennwerte Temperatur im Gesamtjahr und Niederschlag in der forstlichen Vegetationszeit für die Baumart Flaumeiche (*Quercus pubescens*). b: Beispiel der Reduzierung von a) auf Kernhäufigkeitsmatrix (95 %); große Bereiche der 100 %-Hülle sind weggefallen, die aber zusammen lediglich 5 % der Häufigkeit an Wertekombinationen im Verbreitungsgebiet abdeckten. c: Beispiel der endgültigen „geglätteten“ 95 %-Hülle der Verbreitung (a & b) nach „Formfitting“ und manueller Kontrolle. Schwarze Umrandungen: 100 %-Hüllen. Grün: Kernbereiche der Verbreitung (a & b: Farbunterschiede gemäß der Häufigkeit). Orange (c): Auffüllung einer Kenngröße in unkritische Wertebereiche.

D) Abschließend wurde eine manuelle Kontrolle aller Hüllen durchgeführt, um das Ergebnis der vorhergehenden algorithmusbasierten Prozessierungsschritte zu überprüfen. In Einzelfällen mussten einzelne Zellen der 95g-Hülle nachbearbeitet werden. Probleme traten vor allem dann auf, wenn es Vorkommen der Baumart mit deutlich unterschiedlichen Klimaeigenschaften gab, aufgrund einer zu starken Reduktion der Rasterzellenzahl beim Formfitting die 95 %-Hülle anstelle der 95g-Hülle verwendet wurde oder die Klimahülle nur eine geringe Ausdehnung (mindestens 1 Dimension ≤ 3) aufwies, so dass kein Formfitting durchgeführt wurde.

2.1.7 Bestimmung eines finalen Kernverbreitungsgebietes zur Visualisierung und Bestimmung der klimatischen Kennwerte

Auf Grundlage der plausibilisierten Klimahüllen für alle Klimakombinationen wurde für jede Baumart ein finales Kernverbreitungsgebiet bestimmt. Dazu wurde für alle Gitterzellen innerhalb des Verbreitungsgebietes betrachtet, für wie viele der 16 Klimakombinationen die Klimakenngrößen der Gitterzelle innerhalb der jeweiligen 95g-Klimahülle lagen. War dies in mindestens 75 % der Fälle, also für mindestens 12 Klimakombinationen, gegeben, so wurde die Rasterzelle dem Kernverbreitungsgebiet zu gewiesen.

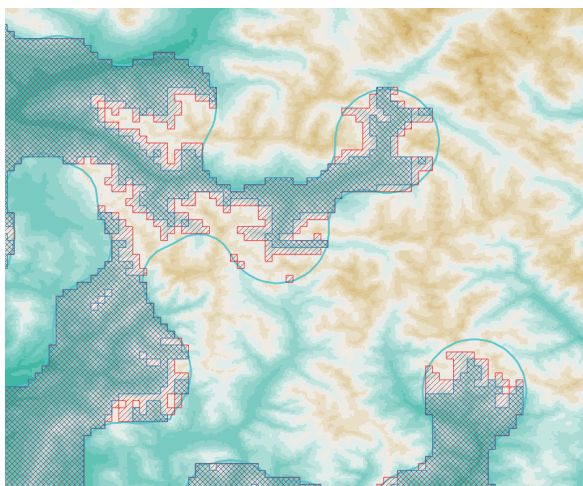


Abbildung 2.1.7-1: Beispiel zur Bestimmung des Kernverbreitungsgebietes (hier Italienischer Ahorn, *Acer opalus*) in den Westalpen.
Cyan: Ursprüngliche Verbreitungsangaben. Rot schraffiert: Gebiet nach Reduktion der Höhenlagen. Blau schraffiert: Kernverbreitungsgebiet.

2.1.8 Klimatische Eignungsbewertung

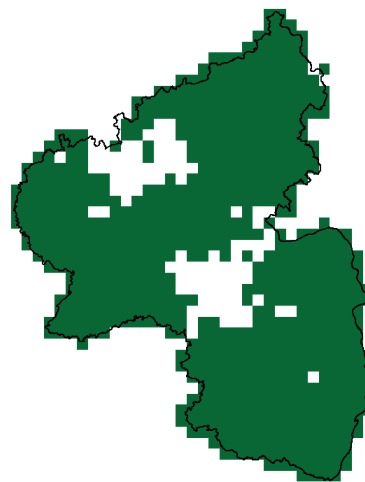
Zur klimatischen Eignungsbewertung wurden die Klimadaten des vergangenen und gegenwärtigen Klimas (Beobachtungsdaten, 1971-2000 und 1986-2015) wie auch des möglichen zukünftigen Klimas (Klimaprojektionen, 2021-2050 und 2070-2099) in Rheinland-Pfalz mit den Klimahüllen der Baumarten gemäß ihres Kernverbreitungsgebietes abgeglichen.

Für die Berechnungen im Zeitraum 1971 bis 2000 in Rheinland-Pfalz wurden sowohl der WorldClim2.0-Datensatz als auch der HYRAS-Datensatz verwendet. Auf diese Weise konnte die Übereinstimmung und Eignung der beiden Datensätze überprüft werden.

Pro Klimahülle wurden die Rasterdatensätze der beiden für die Klimakombination relevanten Klimakenngrößen herangezogen und ein neuer Rasterdatensatz für diese Eignungsbewertung erzeugt. Für jede Gitterzelle wurde der Gitterwert der beiden Rasterdatensätze extrahiert und in der 95g-Klimahülle überprüft, ob die jeweilige Wertekombination innerhalb des bestimmten Eignungsbereichs lag. Sofern zutreffend wurde der Gitterwert im Rasterdatensatz zur Eignungs-

abschätzung der Wert 1, andernfalls der Wert 0 zugewiesen. Auf diese Weise erhielt man eine flächendeckende Eignungsbewertung für die jeweilige Baumart und Klimakombination beruhend auf der zugehörigen 95g-Klimahülle. Ein Beispiel zeigt Abbildung 2.1.8.

Französischer Ahorn
Temperatur im Gesamtjahr (°C)
Niederschlag forstliche Vegetationszeit (mm)



HYRAS 1971_2000

Abbildung 2.1.8: Beispiel-Darstellung anhand der Baumart Französischer Ahorn (*Acer monspessulanum*) der Einzeleignungsbewertung zur Klimahülle $t_{avg-kal} / prec-fVZ$. Dargestellt ist in grün, welche Rasterzellen in Rheinland-Pfalz eine Wertekombination aufweisen, die innerhalb der Klimahülle liegt. Datensatz für Rheinland-Pfalz: HYRAS, 1971 bis 2000.

2.1.9 Zusammenführung der Übereinstimmung der Klimahüllen zu einer Gesamt-Eignungsbewertung

Nachdem die klimatische Eignungsbewertung für alle 16 Klimakombinationen einer Baumart vorgenommen wurde, konnten die einzelnen Eignungsrasterdatensätze zu einer Gesamtbewertung der klimatischen Eignung zusammengeführt werden. Hierzu wurden die Rasterdatensätze addiert und der resultierende Datensatz klassifiziert. Dies wurde separat für jeden Klimadatensatz und jeden Zeitraum durchgeführt. Im Fall der zu-

künftigen Eignungsbewertung auf Grundlage der Klimaprojektionen wurden dabei pro Zeitraum die Einzelbewertungen aller zehn Member des BLFG-Referenzensembles zusammengeführt, also die Summe von 160 Einzeleignungsbewertungen gebildet. Bei den Beobachtungsdatensätzen HYRAS und WorldClim wurden jeweils pro Zeitraum 16 Einzelbewertungen zur klimatischen Gesamteignung addiert.

Die Klassifizierung der klimatischen Gesamteignung erfolgte in vier Stufen: gering, mäßig, gut und sehr gut (Tab. 2.1.9).

2.1.10 Werkzeuge

Der Großteil der Prozessierungen und Aufbereitungen wurde mit Hilfe der Software „R“ (Version 4.0.1) durchgeführt. Als zusätzliche Werkzeuge wurden die Geoinformationssysteme „QGIS“ (Version 3.14.16-Pi) und „SAGA GIS“ (Version 7.7.0) verwendet.

2.2 Literaturrecherche zur ökologischen und waldwirtschaftlichen Bewertung

Zur Berücksichtigung und Bewertung der ökologischen Ansprüche, der waldwirtschaftlichen Hinweise sowie der biotischen Risiken wurde eine Literaturrecherche auf Basis vornehmlich englisch-, deutsch- und französischsprachiger Veröffentlichungen vorgenommen. Es wurden Berichte nationaler und internationaler Fachzeit-

schriften und Internet-Plattformen berücksichtigt. Die Informationen wurden in Form von Steckbriefen zusammengestellt und der Praxis über das ForstNET (https://forstnet.wald-rlp.de/intranet/arbeitsplatz_2/Biologische%20Produktion/Steuerung%20der%20Waldentwicklung/Standort%20und%20Baumartenwahl) und der Öffentlichkeit über das Klimawandelinformationssystem (<https://www.kwis-rlp.de/klimawandelfolgen/wald/ergaenzende-baumarten>) zur Verfügung gestellt. Gegensätzliche Aussagen wurden in den Steckbriefen dargestellt, solange sich daraus Konsequenzen für die Anbaueignung in Rheinland-Pfalz ergeben könnten.

Identifizierung von Standortansprüchen

Zur Identifizierung von Standortansprüchen wurden die Klimakennwerte Jahresmitteltemperatur, Mitteltemperatur im wärmsten und kältesten Monat, mittlere Jahresniederschläge sowie Niederschläge in der forstlichen Vegetationszeit aus den Klimadaten des Kernverbreitungsgebietes abgeleitet (Anhang A2). Lichtbedarf, Bodenreaktion, Staunäsetoleranz und Trophiestufen wurden weitgehend qualitativ auf Basis der recherchierten Literatur dargestellt.

Tabelle 2.1.9

Klassifizierungsstufen der Gesamteignung für die Beobachtungsdatensätze und Klimaprojektionen.

Klasse	Beobachtungsdatensätze		Klimaprojektionen	
	von	bis	von	bis
gering	0	8	0	89
mäßig	9	11	90	119
gut	12	15	120	150
sehr gut	16	16	151	160

3 Ergebnisse und Diskussion

3.1 *Abies bornmuelleriana* – Türkische Tanne

Im gegenwärtigen Klima stimmt das Temperatur-Niederschlags-Verhältnis in Rheinland-Pfalz bei einigen Hüllen sehr gut mit dem Klima im Kernverbreitungsgebiet der Baumart überein, wie beispielsweise bei der Hülle Temperatur in der forstlichen Vegetationszeit / Niederschlag im Gesamtjahr zu sehen ist (Abb. 3.1-1 B). Im zukünftigen Klima überschreiten die Temperaturen in der forstlichen Vegetationszeit jedoch deutlich den Wertebereich des Kernverbreitungsgebietes (ähnliche Situation für die Mitteltemperatur im wärmsten Monat und die Temperaturspanne in der Vegetationszeit, S1). An einigen sehr warmen Standorten in Rheinland-Pfalz (im Wertebereich 16-18 °C in der forstlichen Vegetationszeit) unterschreiten die Winterniederschläge im gegenwärtigen Klima (150-200 mm, 1986-2015) den Wertebereich der entsprechenden Klimahülle im Kernverbreitungsgebiet (200-250 mm, Abb. 3.1-1 A).

Im zukünftigen Klima indizieren die Projektionen zwar eine Zunahme der Winterniederschläge, jedoch führen die stark ansteigenden Temperaturen

zu einer deutlichen Überschreitung des Wertebereichs der Mitteltemperaturen in der forstlichen Vegetationszeit, während an einigen Standorten die Winterniederschläge weiterhin an der Untergrenze der Werte des Kernverbreitungsgebietes liegen. Dies betrifft insbesondere den Oberrheingraben, je nach Modell aber auch das Moseltal, das Mittelrheingebiet und weite Bereiche der Pfalz (S1, S4). Im zukünftigen Klima verdeutlicht die Hülle Temperatur in der forstlichen Vegetationszeit / Temperatur im Gesamtjahr die teilweise deutliche Überschreitung der zukünftigen thermischen Verhältnisse in RLP gegenüber den Werten des Kernverbreitungsgebietes der Baumart (Abb. 3.1-2).

Im gegenwärtigen Klima ergibt die Bewertung für die Türkische Tanne eine fast flächendeckend sehr gute Eignung, nur im Oberrheingebiet ist die klimatische Eignung heute aus den o. g. Gründen (bspw. Winterniederschläge) leicht eingeschränkt (Abb. 3.1-3 A). Steigende Temperaturen und möglicherweise rückläufige Niederschläge in der forstlichen Vegetationszeit bzw. im Gesamtjahr verschlechtern die Bedingungen für die Türkische Tanne bei starkem Klimawandel. Lediglich die Mittelgebirgslagen erhalten in der Bewertung zum Ende des 21. Jahrhunderts die Bewertungen *gut*

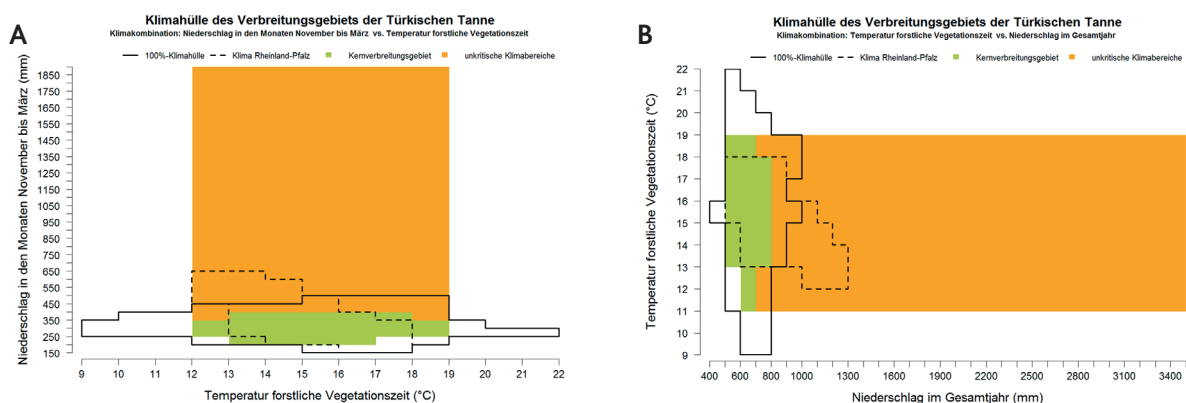


Abbildung 3.1-1: Klimahüllen Temperatur in der forstlichen Vegetationszeit vs. Niederschlag in den Monaten November bis März (A) und vs. Niederschlag im Gesamtjahr (B) zur Türkischen Tanne (*Abies bornmuelleriana*). Schwarze Umrandung: 100 %-Hülle. Schwarz gestrichelte Umrandung: Klima in Rheinland-Pfalz im Zeitraum 1971-2000 auf Grundlage des WorldClim2.0-Datensatzes. Grün: Kernbereiche der Verbreitung. Orange: Auffüllung einer Kenngröße in unkritische Wertebereiche.

bis *sehr gut*, die überwiegende Fläche von Rheinland-Pfalz wird dagegen mit *mäßig* bis *gering geeignet* bewertet (Abb. 3.1-3 B, C).

Für die Türkische Tanne sind hydromorphe Böden ungeeignet, sie wächst überwiegend in Hanglagen. Zu den natürlich vergesellschafteten Baumarten zählen *Fagus orientalis*, *Pinus sylvestris*, *Pinus nigra*, *Acer trautvetteri*, *Carpinus caucasica*, *Ulmus elliptica*, *Acer pseudoplatanus*, *Tilia caucasica* und *Taxus baccata*. (vgl. Steckbrief zu *A. bornmuelleriana*, <https://www.kwis-rlp.de/klimawandelfolgen/wald/ergaenzende-baumarten>)

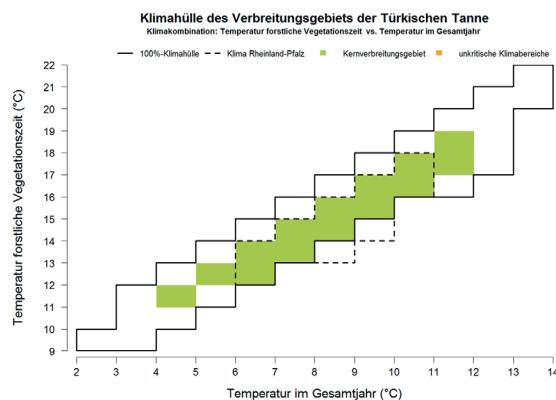


Abbildung 3.1-2: Klimahülle Temperatur in der forstlichen Vegetationszeit vs. Temperatur im Gesamtjahr zur Türkischen Tanne (*Abies bornmuelleriana*). Schwarze Umrandung: 100 %-Hülle. Schwarz gestrichelte Umrandung: Klima in Rheinland-Pfalz im Zeitraum 1971-2000 auf Grundlage des WorldClim2.0-Datensatzes. Grün: Kernbereiche der Verbreitung.

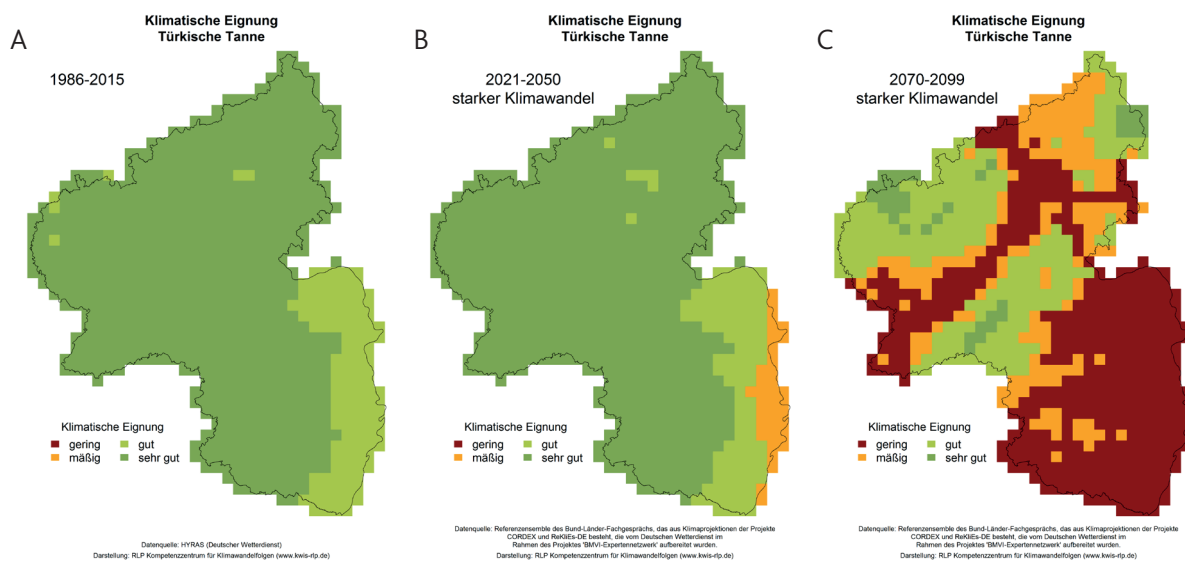


Abbildung 3.1-3: Eignungskarten zur Türkischen Tanne (*Abies bornmuelleriana*). A: HYRAS Gegenwart (1986-2015), B/C: BMVI Expertennetzwerk nahe und ferne Zukunft (2021-2050 und 2070-2099) nach RCP8.5.

3.2 *Abies borisii-regis* – Bulgarische Tanne

Die Klimahüllen der Bulgarischen Tanne im Kernverbreitungsgebiet überlappen weitgehend mit dem gegenwärtigen Klima (1986-2015) in Rheinland-Pfalz. Bei moderaten Schwankungen konzentriert sich das Kernverbreitungsgebiet in Regionen

mit Jahrestemperaturen von 6-14 °C. Dies überlappt vollständig mit den gegenwärtigen klimatischen Bedingungen in Rheinland-Pfalz (Abb. 3.2-1 A). Die Gesamtjahres-Niederschlagsmengen in Rheinland-Pfalz entsprechen dem Wertebereich des Kernverbreitungsgebietes der Art. Auch bzgl. der Niederschlagsseasonalität eignet sich das

Klima in Rheinland-Pfalz. Zwar ist die Saisonalität im Kernverbreitungsgebiet der Bulgarischen Tanne deutlich größer, jedoch sind durch eine geringere Saisonalität keine Einschränkungen zu erwarten (Abb. 3.2-1 B).

Die Bulgarische Tanne kommt in ihrem Kernverbreitungsgebiet bei Jahrestemperaturen zwischen 5 und 14 °C in Kombination mit Niederschlägen

zwischen 100 und 350 mm in der forstlichen Vegetationszeit vor. Mitteltemperaturen im wärmsten Monat reichen im Kernverbreitungsgebiet bis 24 °C. Bezüglich der Temperaturspanne befindet sich das Klima in Rheinland-Pfalz in einem guten Mittelfeld mit größtenteils mehr Niederschlägen (S1). Eine Ausnahme bildet die Region Rheinhessisches Tafel- und Hügelland, in der die Winterniederschläge den Wertebereich

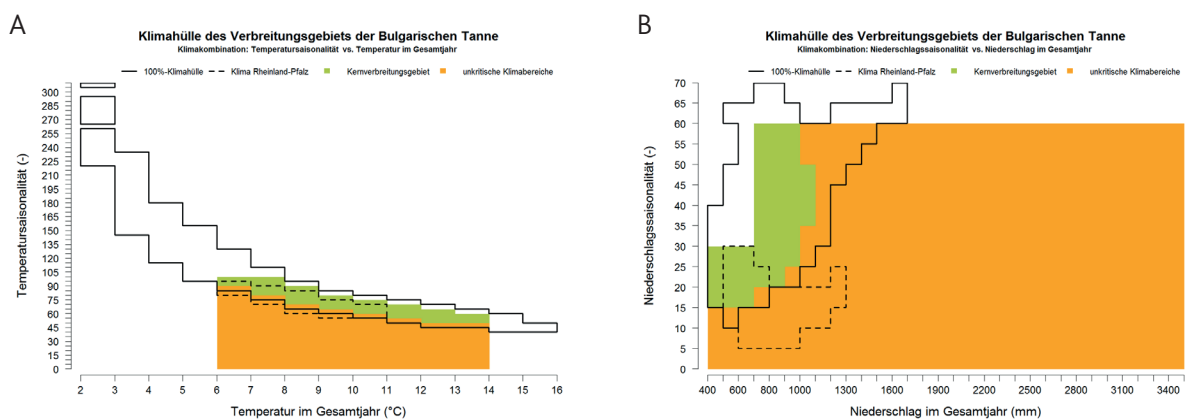


Abbildung 3.2-1: Klimahülle Temperatur im Gesamtjahr vs. Temperatursaisonalität (A) und Niederschlag im Gesamtjahr vs. Niederschlagsaisonalität (B) zur Bulgarischen Tanne (*Abies borisii-regis*). Schwarze Umrandung: 100 %-Hülle. Schwarz gestrichelte Umrandung: Klima in Rheinland-Pfalz im Zeitraum 1971-2000 auf Grundlage des WorldClim2.0-Datensatzes. Grün: Kernbereiche der Verbreitung. Orange: Auffüllung einer Kenngröße in unkritische Wertebereiche.

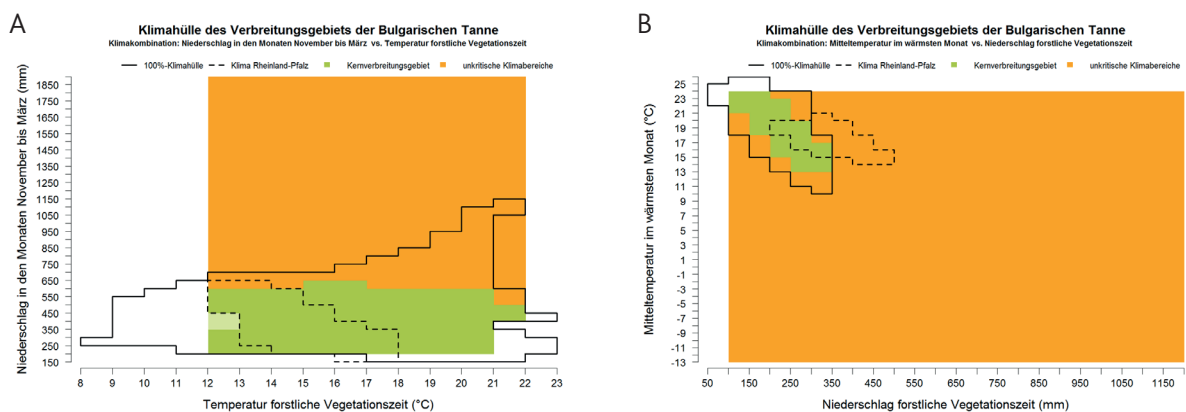


Abbildung 3.2-2: Klimahüllen Niederschlag in den Wintermonaten vs. Temperatur in der forstlichen Vegetationszeit (A) und Mitteltemperatur im wärmsten Monat vs. Niederschlag in der forstlichen Vegetation (B) zur Bulgarischen Tanne (*Abies borisii-regis*). Schwarze Umrandung: 100 %-Hülle. Schwarz gestrichelte Umrandung: Klima in Rheinland-Pfalz im Zeitraum 1971-2000 auf Grundlage des WorldClim2.0-Datensatzes. Grün: Kernbereiche der Verbreitung. Orange: Auffüllung einer Kenngröße in unkritische Wertebereiche.

des Kernverbreitungsgebietes unterschreiten (Abb. 3.2-2 A, S2). Dies bildet sich jedoch nicht in den Gesamtjahresniederschlägen ab, so dass möglicherweise keine Niederschlagsdefizite zu erwarten sind. In Abhängigkeit des Modells führt im zukünftigen Klima eine Zunahme der Winterniederschläge zu geringeren Einschränkungen. Eine starke Verschiebung hin zu wärmeren Temperaturen in der Vegetationszeit führt jedoch im Oberrheingraben zukünftig zu einem Überschreiten des Wertebereichs des Kernverbreitungsgebietes. Dies ist an verschiedenen Hüllen (aber zum Teil nicht bei allen Modellen) zu erkennen. Beispiele für Überschreitungen der Temperaturparameter im Oberrheingebiet sind bei den Hüllen Temperatur in der forstlichen Vegetationszeit / Niederschlag im Winter, Temperatur im wärmsten Monat / Niederschlag in der forstlichen Vegetationszeit und Temperatur im Gesamtjahr / Niederschlag in der forstlichen Vegetationszeit zu finden (S1, S4).

Der Vergleich der Klimahüllen der Bulgarischen Tanne mit dem gegenwärtigen Klima in Rheinland-Pfalz weist auf eine gute bis sehr gute Eignung im ganzen Land hin (Abb. 3.2-3 A). Bei starkem Klimawandel verschlechtern sich jedoch die Bedingungen im Oberrheingraben bis zu stellenweise mäßiger Eignung (Abb. 3.2-3 C). Wie die

Auswertungen zeigen, ist dies vor allem auf eine ungünstige Entwicklung zu höheren Temperaturen bei geringeren Niederschlägen zurückzuführen. Auf der übrigen Fläche von Rheinland-Pfalz wird die Eignung weiterhin mit *sehr gut* bewertet.

Stark vernässte Standorte sind für die Bulgarische Tanne ungeeignet. Sie wächst vor allem an sonnigen Hängen mit moderater Neigung. Zu den natürlich vergesellschafteten Baumarten zählen *Aesculus hippocastanum*, *Ostrya carpinifolia*, *Carpinus orientalis*, *Acer obtusatum*, *Castanea sativa*, *Quercus frainetto*, *Abies cephalonica*, *Picea abies*, *Fagus sylvatica* und verschiedene Kiefernarten. (vgl. Steckbrief zu *A. borisii-regis*, <https://www.kwis-rlp.de/klimawandelfolgen/wald/ergaenzende-baumarten>)

3.3 *Abies cephalonica* – Griechische Tanne

Die Temperaturen im Kernverbreitungsgebiet der Griechischen Tanne umfassen einen größeren Wertebereich als das gegenwärtige Klima in Rheinland-Pfalz. Dies ist an allen temperaturbezogenen Kennwerten zu erkennen (Anhang A1). Die Gesamtjahresniederschlagsmenge entspricht sich im Wesentlichen, jedoch sind die Niederschlagsmengen im Kernverbreitungsgebiet stärker auf die

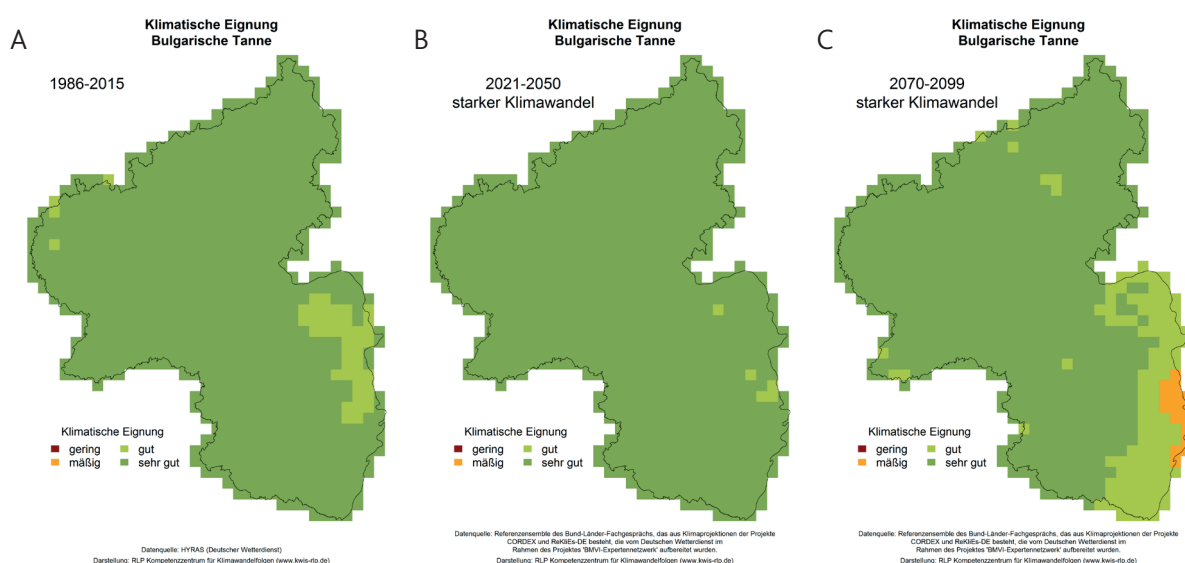


Abbildung 3.2-3: Eignungskarten zur Bulgarischen Tanne (*Abies borisii-regis*). A: HYRAS Gegenwart (1986-2015), B/C: BMVI Expertennetzwerk nahe und ferne Zukunft (2021-2050 und 2070-2099) nach RCP8.5

Wintermonate konzentriert und entsprechend in der forstlichen Vegetationszeit geringer. Die Abweichung hinsichtlich der Winterniederschläge ist deutlich an der nahezu flächendeckenden Nicht-Übereinstimmung der Hülle Niederschlag im Winter / Temperatur in der forstlichen Vegetationszeit mit dem Klima in Rheinland-Pfalz zu erkennen (Abb. 3.3-1 A). Darüber hinaus weicht das gegenwärtige Klima insbesondere im Mosel- und Mittelrheintal von drei Hüllen ab, deren Kennwerte mit dem Niederschlag im Gesamtjahr kombiniert sind; diese sind Temperatur in der forstlichen Vegetationszeit, Temperatur im Gesamtjahr und Wachstumsgradtage (Abb. 3.3-1 B). Umgekehrt kommt die Baumart im Kernverbreitungsgebiet mit geringeren Niederschlägen in der forstlichen Vegetationszeit zurecht, als sie im gegenwärtigen Klima in Rheinland-Pfalz vorherrschen (Anhang A1).

Trotz der erwarteten Zunahme der Winterniederschläge bleibt die Nicht-Übereinstimmung der Hülle Niederschlag im Winter / Temperatur in der forstlichen Vegetationszeit für die überwiegende Fläche von Rheinland-Pfalz im zukünftigen Klima bestehen. Die gegenüber dem Kernverbreitungsgebiet deutlich höheren Niederschläge in der forstlichen Vegetationszeit bleiben jedoch auch,

so dass insgesamt nicht mit Niederschlagsdefiziten zu rechnen ist. Eine geringe Überschreitung des Wertebereichs ist im zukünftigen Klima hinsichtlich des Gangs der Monatsmitteltemperaturen in der forstlichen Vegetationszeit mit Ausnahme der nördlichsten Regionen auf der ganzen Fläche von Rheinland-Pfalz zu erkennen. Ein Modell zeigt auch hinsichtlich der Kombination Temperatur im wärmsten Monat / Niederschlag in der forstlichen Vegetationszeit eine Abweichung durch zu hohe Temperaturen im Oberrheingebiet an. (S1, S3, S4)

An den kältesten und feuchtesten Standorten von Westerwald, Eifel und Hunsrück unterschreiten die Wintertemperaturen im gegenwärtigen Klima den Wertebereich des Kernverbreitungsgebietes der Griechischen Tanne. Dies wird anhand der Hülle Temperatur im kältesten Monat / Trockenheitsindex in der forstlichen Vegetationszeit abgebildet (Abb. 3.3-2). Im zukünftigen Klima spielt dies nur noch eine untergeordnete Rolle. Die Hülle wird sich entsprechend der Projektionen in Richtung höherer Werte des Trockenheitsindex in der forstlichen Vegetationszeit und milderer Wintertemperaturen verschieben und insofern eine stärkere Überlappung mit dem Kernverbreitungsgebiet erhalten (S1).

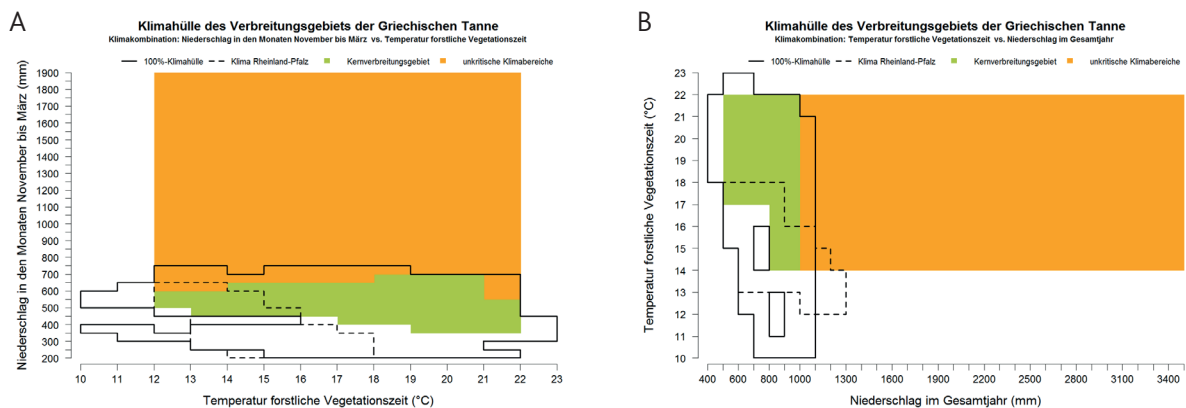


Abbildung 3.3-1: Klimahüllen Niederschlag in den Wintermonaten vs. Temperatur in der forstlichen Vegetationszeit (A) und Temperatur in der forstlichen Vegetationszeit vs. Niederschlag im Gesamtjahr (B) zur Griechischen Tanne (*Abies cephalonica*). Schwarze Umrandung: 100 %-Hülle. Schwarz gestrichelte Umrandung: Klima in Rheinland-Pfalz im Zeitraum 1971-2000 auf Grundlage des WorldClim2.0-Datensatzes. Grün: Kernbereiche der Verbreitung. Orange: Auffüllung einer Kenngröße in unkritische Wertebereiche.

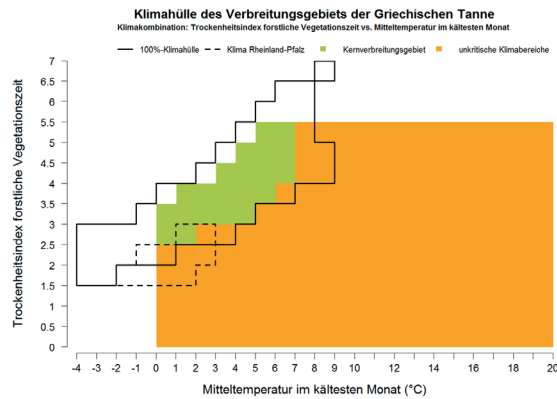


Abbildung 3.3-2: Klimahülle Temperatur im kältesten Monat vs. Trockenheitsindex in der forstlichen Vegetationszeit (A) zur Griechischen Tanne (*Abies cephalonica*). Schwarze Umrandung: 100 %-Hülle. Schwarz gestrichelte Umrandung: Klima in Rheinland-Pfalz im Zeitraum 1971-2000 auf Grundlage des WorldClim2.0-Datensatzes. Grün: Kernbereiche der Verbreitung. Orange: Auffüllung einer Kenngröße in unkritische Wertebereiche.

Durch die Abweichungen der Temperatur und Niederschlagsverteilung resultiert bei der Gesamtbewertung für das gegenwärtige Klima eine fast flächendeckend gute, in den regenreichsten Gebieten eine sehr gute Eignung. Der Flächenanteil mit Bewertung sehr gut nimmt im Klimawandel zu, eine Verschlechterung gibt es an keinem Standort. (Abb. 3.3-3)

Stark vernässte Standorte sind für die Griechische Tanne ungeeignet. Zu den natürlich vergesellschafteten Baumarten zählen verschiedene Eichen-, Ahorn- und Kiefernarten sowie *Fraxinus ornus*, *Ostrya carpinifolia*, *Fagus orientalis*, *Castanea sativa*, *Cedrus spp.* und *Juniperus hemisphaerica*. (vgl. Steckbrief zu *A. cephalonica*, <https://www.kwis-rlp.de/klimawandelfolgen/wald/ergaenzende-baumarten>)

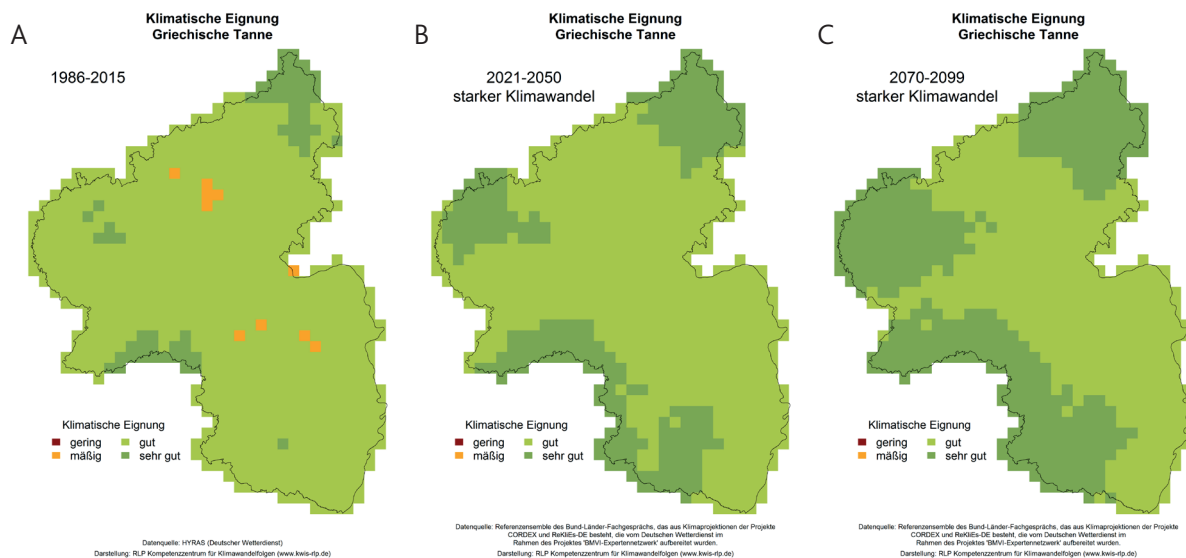


Abbildung 3.3-3: Eignungskarten zur Griechischen Tanne (*Abies cephalonica*). A: HYRAS Gegenwart (1986-2015), B/C: BMVI Expertennetzwerk nahe und ferne Zukunft (2021-2050 und 2070-2099) nach RCP8.5.

3.4 *Pinus nigra laricio* – Korsische Schwarzkiefer

Bei der Korsischen Schwarzkiefer sind gegenwärtig wie auch im zukünftigen Klima deutliche Abweichungen zu den Hüllen des Kernverbreitungsgebietes vorhanden. Abweichungen im gegenwärtigen Klima ergeben sich vor allem aus dem Niederschlagsgeschehen, welches im Kernverbreitungsgebiet von größerer Variabilität und vor allem deutlicher auf die Wintermonate konzentriert ist. So gibt es beispielsweise in der Klimahülle Niederschlag im Winter / Temperatur in der forstlichen Vegetationszeit nahezu keine Überlappungen mit Ausnahme weniger Standorte in Westerwald, Eifel, Hunsrück und Westpfalz (Abb. 3.4-1 A und S2). Jedoch kommen in der Hülle auch Abweichungen durch eine zu geringe Temperatur in der forstlichen Vegetationszeit bei ausreichenden Winterniederschlägen vor.

In den kühlen Mittelgebirgslagen von Westerwald, Eifel und Hunsrück gibt es aber auch Standorte, deren Mitteltemperatur im kältesten Monat im gegenwärtigen Klima den Wertebereich der Korsischen Schwarzkiefer unterschreitet. Zu erkennen ist dies beispielsweise an der Klimahülle Wachs-

tumsgradtage im Gesamtjahr / Temperatur im kältesten Monat (Abb. 3.4-1 B). Die gleiche Hülle zeigt auch Abweichungen hinsichtlich zu geringer Wachstumsgradtage an, auch in Kombination mit zu geringen Temperaturen im kältesten Monat. Unter den gegenwärtigen klimatischen Bedingungen sollte die Winterkälte hinsichtlich des Auftretens von Frostschäden berücksichtigt werden. Im zukünftigen Klima spielt dies eine untergeordnete Rolle.

Insgesamt sind die Abweichungen der Klimahüllen der Korsischen Schwarzkiefer vom gegenwärtigen Klima in Rheinland-Pfalz sehr divers. Zumeist ist für beide Parameter eine Überschreitung des Wertebereichs kennzeichnend.

Im zukünftigen Klima ist die Interpretation eindeutiger: In den großen Flusstälern von Mosel und Rhein kommen Überschreitungen der Temperaturparameter und Unterschreitungen der Niederschläge zum Tragen. Zu erkennen ist eine Temperaturüberschreitung beispielsweise an der Klimahülle Temperatur im wärmsten Monat / Niederschlag in der forstlichen Vegetationszeit (S1, S4). Unterschreitungen der Winterniederschläge und Überschreitungen der Temperaturen in der

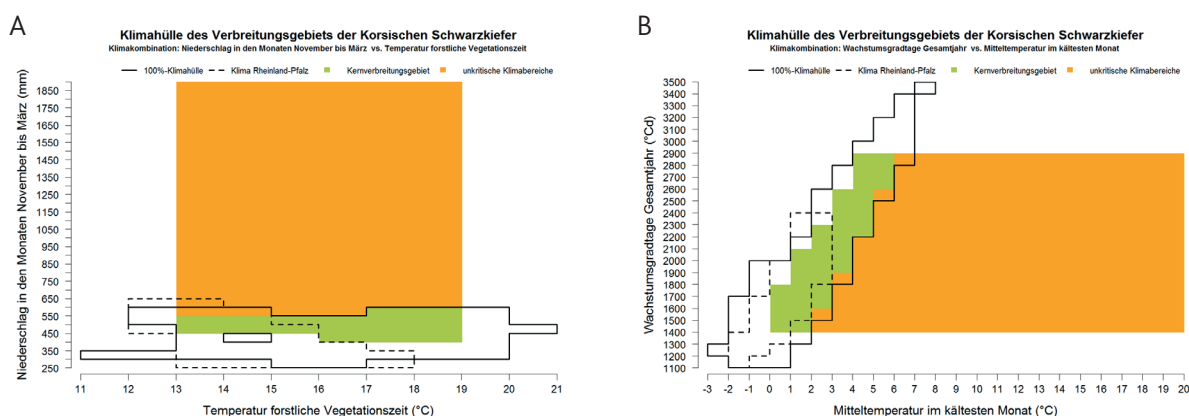


Abbildung 3.4-1: Klimahülle Niederschlag in den Wintermonaten vs. Temperatur in der forstlichen Vegetationszeit (A) und Wachstumsgradtage im Gesamtjahr vs. Mitteltemperatur im kältesten Monat (B) zur Korsischen Schwarzkiefer (*Pinus nigra laricio*). Schwarze Umrandung: 100 %-Hülle. Schwarz gestrichelte Umrandung: Klima in Rheinland-Pfalz im Zeitraum 1971-2000 auf Grundlage des WorldClim2.0-Datensatzes. Grün: Kernbereiche der Verbreitung. Orange: Auffüllung einer Kenngröße in unkritische Wertebereiche.

forstlichen Vegetationszeit werden im zukünftigen Klima auch anhand der Hülle Niederschlag im Winter / Temperatur in der forstlichen Vegetationszeit deutlich (S1, S4), und bilden die Regionen mit schlechtester Eignung Ende des Jahrhunderts ab (Abb. 3.4-2).

Dagegen verbessert sich die Frostsituation an den kühlest Standorten – Unterschreitungen der Temperaturen im kältesten Monat sind dann nicht mehr zu erwarten, wie beispielsweise an der Hülle Temperatur im kältesten Monat / Temperatur in der forstlichen Vegetationszeit und der Kennwertetabelle zu erkennen ist (S1, Anhang A1).

Im gegenwärtigen Klima (1986-2015) wurden weite Teile der Oberrheinregion, nördliche Teile des Saar-Nahe-Hügellandes bis hin zum Soonwald sowie das Mittelrheinische Becken als nur mäßig bis gering geeignet bewertet. Für die ferne Zukunft (2070-2099, Abb. 3.4-2 C) weitet sich die geringe bis mäßige Eignung über den gesamten Süden von Rheinland-Pfalz und die großen Flusstäler von Mosel und Mittelrhein aus. In der Zukunft sind weiterhin Abweichungen zur Klimahülle beim Gesamtjahres- und Winterniederschlag zu erwarten, aber insbesondere die veränderten

Temperaturen führen zu Diskrepanzen und verschlechtern dadurch die Eignung in weiten Teilen des Landes.

Standorte mit hoch anstehendem Wasser sind für die Korsische Schwarzkiefer ungeeignet. Weitere Ausschlusskriterien sind freier Kalk und volle Beschattung in der Jugendphase. Zu den natürlich vergesellschafteten Baumarten zählen diverse Kiefern- und Eichenarten sowie *Fagus sylvatica*, *Ilex aquifolium*, *Taxus baccata* und *Abies spec.* (vgl. Steckbrief zu *P. nigra-laricio*, <https://www.kwis-rlp.de/klimawandelfolgen/wald/ergaenzende-baumarten>)

3.5 *Cedrus atlantica* – Atlaszeder

Die wärme- und trockenheitsbezogenen Kennwerte Wachstumsgradtage, Temperatur in der forstlichen Vegetationszeit, Temperatur im Gesamtjahr und Temperatur im kältesten Monat sind in den Mittelgebirgsregionen von Rheinland-Pfalz im gegenwärtigen Klima noch geringer als im Kernverbreitungsgebiet der Atlaszeder (Anhang A1, S1, S4). Dies ist beispielsweise an der Klimahülle Temperatur in der forstlichen Vegetationszeit / Niederschlag im Gesamtjahr zu erkennen (Abb. 3.4-1 A und S2). In diesen Regionen unter-



Abbildung 3.4-2: Eignungskarten zur Korsischen Schwarzkiefer (*Pinus nigra laricio*). A: HYRAS Gegenwart (1986-2015), B/C: BMVI Expertennetzwerk nahe und ferne Zukunft (2021-2050 und 2070-2099) nach RCP8.5.

schreiten die Temperaturen im kältesten Monat auch den Wertebereich des Kernverbreitungsgebietes, so dass es dort im gegenwärtigen Klima zu Frostschäden kommen kann (Hüllen Temperatur im kältesten Monat / Temperatur in der forstlichen Vegetationszeit und Wachstumsgradtage, Abb. 3.5-1 B und S1). Im zukünftigen Klima sind keine Unterschreitungen der Wertebereiche des

Kernverbreitungsgebietes der genannten Kennwerte mehr zu erwarten. Dagegen ergeben die Projektionen im Oberrheingebiet eine Überschreitung mancher temperaturbezogenen Kennwerte. Dies zeigen verschiedene Hüllen auf, die mit den Kennwerten Wachstumsgradtage, Temperatur in der forstlichen Vegetationszeit und Temperatur im Gesamtjahr kombiniert sind (S1, S4).

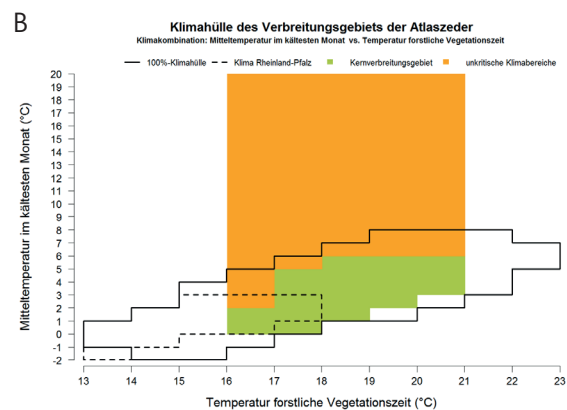
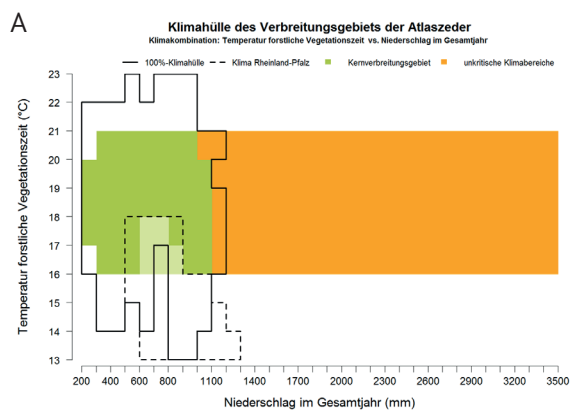


Abbildung 3.5-1: Klimahülle Temperatur in der forstlichen Vegetationszeit vs. Niederschlag im Gesamtjahr (A) und Mitteltemperatur im kältesten Monat vs. Temperatur in der forstlichen Vegetationszeit (B) zur Atlaszeder (*Cedrus atlantica*). Schwarze Umrandung: 100 %-Hülle. Schwarz gestrichelte Umrandung: Klima in Rheinland-Pfalz im Zeitraum 1971-2000 auf Grundlage des WorldClim2.0-Datensatzes. Grün: Kernbereiche der Verbreitung. Orange: Auffüllung einer Kenngröße in unkritische Wertebereiche.

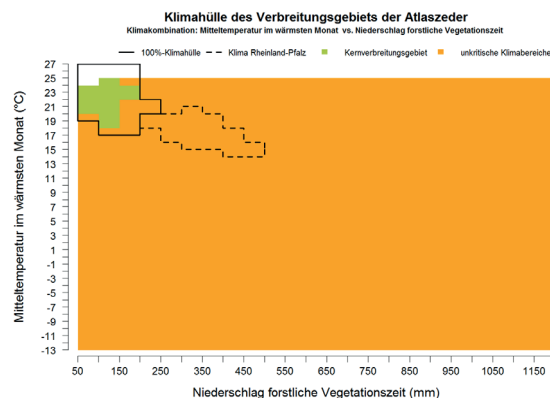


Abbildung 3.5-2: Klimahülle Mitteltemperatur im wärmsten Monat vs. Niederschlag in der forstlichen Vegetationszeit zur Atlaszeder (*Cedrus atlantica*). Schwarze Umrandung: 100 %-Hülle. Schwarz gestrichelte Umrandung: Klima in Rheinland-Pfalz im Zeitraum 1971-2000 auf Grundlage des WorldClim2.0-Datensatzes. Grün: Kernbereiche der Verbreitung. Orange: Auffüllung einer Kenngröße in unkritische Wertebereiche.

Die Niederschlagsseasonalität ist im Kernverbreitungsgebiet der Atlaszeder sehr groß. Bezüglich der Niederschläge im Winter und im Gesamtjahr befindet sich das gegenwärtige Klima in Rheinland-Pfalz im Mittelfeld. In der forstlichen Vegetationszeit und den Sommermonaten (JJA) liegen die Niederschlagsmengen in Rheinland-Pfalz durchgängig auf einem höheren Niveau als im Kernverbreitungsgebiet. Dies ist beispielsweise an der Hülle Temperatur im wärmsten Monat / Niederschlag in der forstlichen Vegetationszeit und an der Kennwertetabelle zu erkennen (Abb. Abb. 3.5-2 und Anhang A1). Im zukünftigen Klima sind gegenüber den Aussagen zum gegenwärtigen Klima keine maßgeblichen Veränderungen zu erwarten (Anhang A1).

Durch die temperaturbedingten Abweichungen ergibt sich für die kühlen Mittelgebirgslagen Westerwald, Eifel und Hunsrück derzeit nur eine geringe Eignung, die sich mit fortschreitendem Klimawandel verbessert und Ende des Jahrhunderts mit *sehr gut* bewertet wird, da in allen Hüllen eine Verschiebung hin zu höheren Temperaturwerten und damit eine größere Überlappung mit dem Klima im Kernverbreitungsgebiet erwart-

et wird (Abb. 3.5-3). In allen übrigen Regionen (Mosel- und Rheintäler, Pfalz) ergibt die Bewertung im gegenwärtigen Klima eine sehr gute bis gute Eignung. Im Oberrheingebiet verschlechtert sich die Eignung jedoch mit fortschreitendem Klimawandel durch Überschreitungen des Wertebereichs der Temperaturen in der forstlichen Vegetationszeit. Die Niederschlagsparameter und Wintertemperaturen erscheinen nicht limitierend.

Standorte mit verhärteten Horizonten oder Materialien (z. B. Ortstein, Kalkausfällung) sowie mit tonhaltigen, kompakten, verschlammten oder hydromorphen Böden sind für die Atlaszeder ungeeignet. Weiterhin sind ausgesprochene Frostlagen ungünstig. Zu den natürlich vergesellschafteten Baumarten zählen diverse Kiefern-, Eichen-, Wacholder-, Tannen-, Ahornarten, *Ilex aquifolium*, *Populus tremula*, *Taxus baccata* und *Fraxinus dimorpha*. (vgl. Steckbrief zu *C. atlantica*, <https://www.kwis-rlp.de/klimawandelfolgen/wald/ergaenzende-baumarten>)

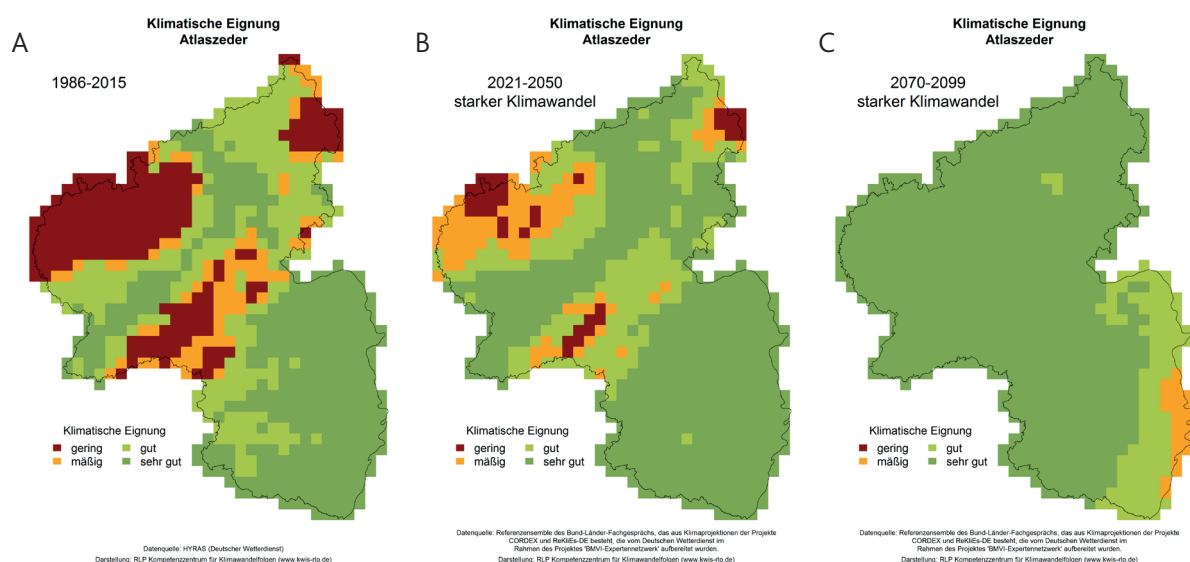


Abbildung 3.5-3: Eignungskarten zur Atlaszeder (*Cedrus atlantica*). A: HYRAS Gegenwart (1986-2015), B/C: BMVI Expertennetzwerk nahe und ferne Zukunft (2021-2050 und 2070-2099) nach RCP8.5.

3.6 *Cedrus libani* – Libanonzeder

Das Klima im Kernverbreitungsgebiet der Libanonzeder ist durch höhere sommerliche Maximaltemperaturen und geringere Niederschläge im Vergleich zum gegenwärtigen Klima in Rheinland-Pfalz gekennzeichnet. Dies zeigt sich beispielsweise an der Klimahülle Temperaturspanne in der forstlichen Vegetationszeit vs. Niederschlag in der forstlichen Vegetationszeit (Abb. 3.6-1 A). Die Libanonzeder kommt mit sommerlichen Spitzenwerten (Temperatur im wärmsten Monat) bis zu 26 °C zurecht, in Rheinland-Pfalz werden im gegenwärtigen Klima dagegen maximal 19 °C erreicht. Deutlich höhere Werte kennt die Libanonzeder auch beim Trockenheitsindex in der Vegetationszeit (2,5 – 7 gegenüber 1,9 – 2,5), (Anhang A1). Die Temperaturen im kältesten Monat liegen in Rheinland-Pfalz deutlich oberhalb der geringsten Werte, die im Kernverbreitungsgebiet vorkommen können (-6 °C gegenüber 0 °C, Anhang A1). Die Niederschläge sind in Rheinland-Pfalz gleichmäßiger (geringere Saisonalität, Anhang A1). Insgesamt sind durch die dargestellten klimatischen Unterschiede zum jetzigen Zeitpunkt (1986–2015) keine besonderen Nachteile für die Etablierung und die Vitalität der Libanonzeder zu erwarten.

Durch höhere Niederschläge ist in Rheinland-Pfalz im gegenwärtigen Klima nicht mit Trockenstress zu rechnen. Es gibt jedoch Standorte, deren Klimakombination Temperatur in der forstlichen Vegetationszeit / Temperatur im Gesamtjahr nicht mit dem Wertebereich im Kernverbreitungsgebiet übereinstimmt (durch geringere Temperaturen in der Vegetationszeit, Abb. 3.6-1 B). Diese sind im Mosel- und Rheintal sowie im Rheinhessisch-Pfälzischen Tafel- und Hügelland zu finden (S2). Im zukünftigen Klima verschiebt sich die Hülle in Richtung höherer Temperaturen, es verbleiben aber weiterhin Standorte mit vom Kernverbreitungsgebiet abweichenden Kombinationen, teilweise sogar mit Überschreitungen des Wertebereichs der Temperaturen im Kalenderjahr (S1). Einige Modelle geben auch eine Überschreitung der Temperaturen im wärmsten Monat bezogen auf die Klimahülle Temperatur im wärmsten Monat / Niederschlag in der forstlichen Vegetationszeit an, wobei die Niederschlagsmengen größer sind als im Kernverbreitungsgebiet der Baumart. Umgekehrt zeigen die Projektionen einheitlich für die Hülle Niederschlag im Winter / Temperatur in der forstlichen Vegetationszeit, dass im Oberrheingebiet zu geringe Winterniederschläge auftreten können. (S1, S4)

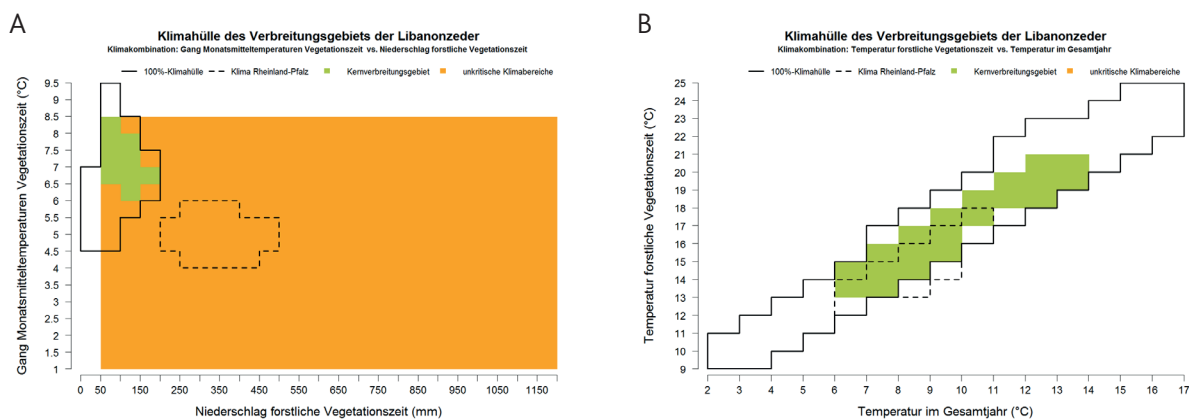


Abbildung 3.6-1: Klimahüllen Gang der Monatsmitteltemperaturen in der Vegetationszeit vs. Niederschlag in der forstlichen Vegetationszeit (A) und Temperatur in der forstlichen Vegetationszeit vs. Temperatur im Gesamtjahr (B) zur Libanonzeder (*Cedrus libani*). Schwarze Umrandung: 100 %-Hülle. Schwarz gestrichelte Umrandung: Klima in Rheinland-Pfalz im Zeitraum 1971–2000 auf Grundlage des WorldClim2.0-Datensatzes. Grün: Kernbereiche der Verbreitung. Orange: Auffüllung einer Kenngröße in unkritische Wertebereiche.

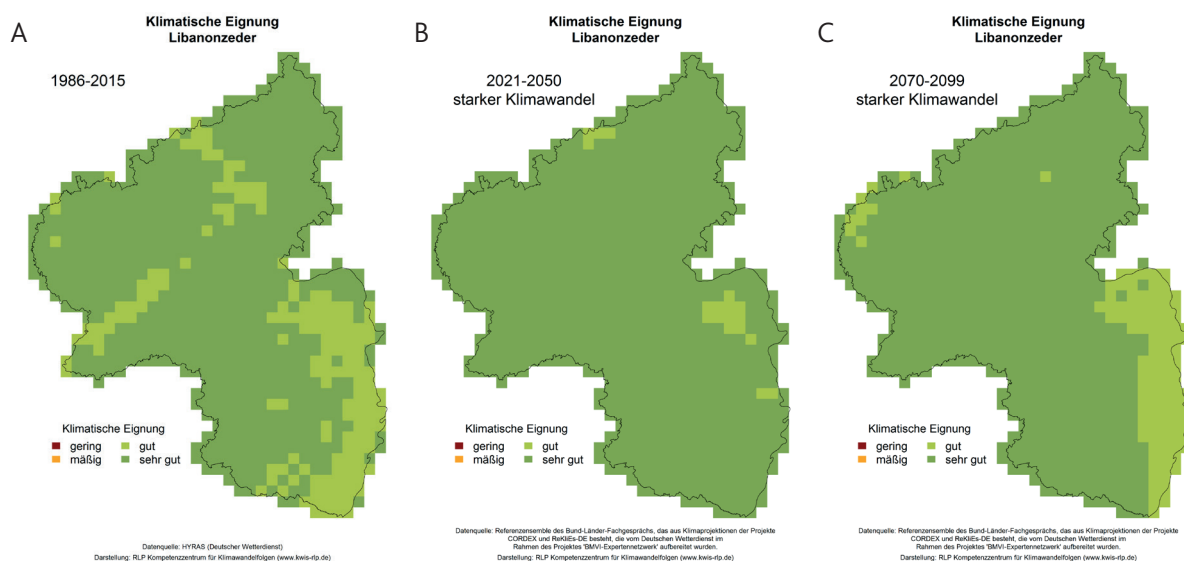


Abbildung 3.6-2: Eignungskarten zur Libanonzedder (*Cedrus libani*). A: HYRAS Gegenwart (1986-2015), B/C: BMVI Expertennetzwerk nahe und ferne Zukunft (2021-2050 und 2070-2099) nach RCP8.5.

Die Bewertung weist für das gegenwärtige Klima auf eine flächendeckend gute bis sehr gute Eignung der Libanonzedder hin. Auch im zukünftigen Klima ist mit einer flächendeckend sehr guten Eignung zu rechnen, wobei bei starkem Klimawandel in der Oberrheinebene eine leichte Abwertung zu erkennen ist (Abb. 3.6-2 C), was teilweise in der Überschreitung der Temperaturen im Kalenderjahr, in der forstlichen Vegetationszeit oder im wärmsten Monat, teilweise aber auch in zu geringen Winterniederschlägen begründet ist. Die Libanonzedder benötigt in der Adultphase Sonnenstandorte. Zu den natürlich vergesellschafteten Baumarten zählen verschiedene Wacholder-, Eichen-, Kiefern- und Ahornarten sowie *Abies cilicica*, *Sorbus umbellata*, *Amelanchier ovalis*, *Lonicera etrusca*, *Populus tremula*, *Ulmus glabra*, *Carpinus orientalis* und *Ostrya carpinifolia*. (vgl. Steckbrief zu *C. libani*, <https://www.kwis-rlp.de/klimawandelfolgen/wald/ergaenzende-baumarten/>)

3.7 *Acer monspessulanum* – Französischer Ahorn

Abweichungen zum Kernverbreitungsgebiet des Französischen Ahorns ergeben sich im gegenwärtigen Klima in Rheinland-Pfalz vor allem an

den kühlen Standorten hinsichtlich temperaturbezogener Kennwerte. In einigen Naturräumen (Hunsrück, Pfälzerwald, Westerwald, Eifel) gibt es beispielsweise Standorte mit geringeren Wachstumsgradtagen in Kombination mit geringeren Temperaturen im kältesten Monat (Abb. 3.7-1 A). Abweichungen zeigen sich auch in der Hülle Temperaturspanne im Gesamtjahr / Temperatur in der forstlichen Vegetationszeit (geringere Temperaturen in der Vegetationszeit) und durch zu geringe Werte beider Parameter der Hülle Temperatursaisonalität und Temperatur im Gesamtjahr (S1, S2).

Die Niederschlagsseasonalität ist im Kernverbreitungsgebiet des Französischen Ahorns größer, die Niederschlagsmengen befinden sich im gegenwärtigen Klima in Rheinland-Pfalz im Mittelfeld (Anhang A1). Dies ist beispielsweise auch an der Hülle Temperatur im Gesamtjahr / Niederschlag im Gesamtjahr zu erkennen, bei der Abweichungen lediglich hinsichtlich kühlerer Temperaturen aufgezeigt werden (Abb. 3.7-1 B). Im zukünftigen Klima verschiebt sich der Wertebereich in Rheinland-Pfalz in Richtung höherer Temperaturen, wogegen die Niederschläge auf dem gleichen Niveau verbleiben. Daraus resultiert dann eine vollständige Überlappung der Kombination mit dem Kernverbreitungsgebiet der Baumart. (S1)

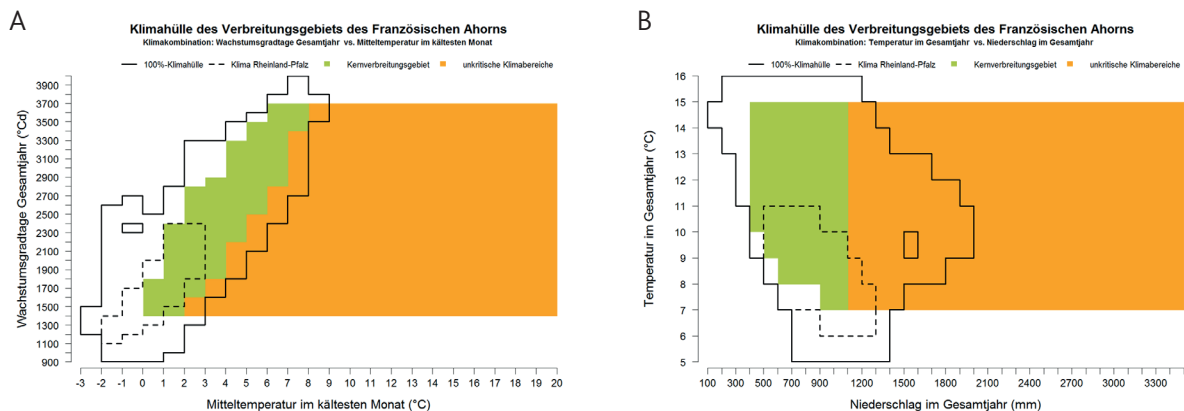


Abbildung 3.7-1: Klimahüllen Mitteltemperatur im kältesten Monat vs. Wachstumsgradtage im Gesamtjahr (A) und Niederschlag vs. Temperatur im Gesamtjahr (B) zum Französischen Ahorn (*Acer monspessulanum*). Schwarze Umrandung: 100 %-Hülle. Schwarz gestrichelte Umrandung: Klima in Rheinland-Pfalz im Zeitraum 1971-2000 auf Grundlage des WorldClim2.0-Datensatzes. Grün: Kernbereiche der Verbreitung. Orange: Auffüllung einer Kenngröße in unkritische Wertebereiche.

Das gegenwärtige Klima in Rheinland-Pfalz ist weitgehend gut bis sehr gut für den Französischen Ahorn geeignet, mit Ausnahme einiger zu kühler Standorte im westlichen Hunsrück, der Eifel, dem Westerwald und dem Pfälzerwald. Auch wenn sich sein Hauptverbreitungsgebiet im mediterranen Raum von Portugal bis Syrien erstreckt, sind in Deutschland Reliktvorkommen an wärmebegünstigten Standorten am Mittelrhein, im Nahe-,

Mosel-, Main-, Saaletal und Nordpfälzer Bergland bekannt. Bei starkem Klimawandel wird die Eignung des Französischen Ahorns flächendeckend mit *sehr gut* bewertet. Ein leichter Rückgang der Eignung ist Ende des Jahrhunderts im Oberrheingebiet zu erkennen. Vereinzelt Modelle geben eine mögliche Überschreitung der Temperatur im wärmsten Monat bzw. in der Vegetationszeit an.

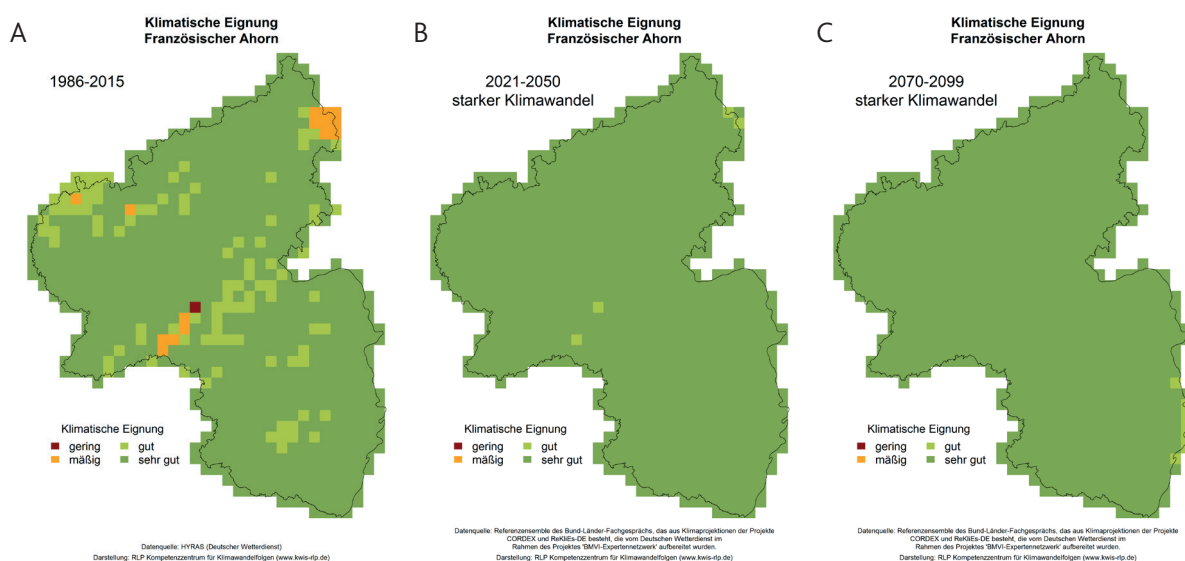


Abbildung 3.7-2: Eignungskarten zum Französischen Ahorn (*Acer monspessulanum*). A: HYRAS Gegenwart (1986-2015), B/C: BMVI Expertennetzwerk nahe und ferne Zukunft (2021-2050 und 2070-2099) nach RCP8.5.

Nasse Standorte sind für den Französischen Ahorn ungeeignet. Meist kommt er an Südhängen vor. Zu den natürlich vergesellschafteten Baumarten zählen verschiedene Eichen-, *Sorbus*- und *Prunus*-Arten, *Phillyrea latifolia*, *Arbutus unedo*, *Erica arborea*, *Juniperus oxycedrus*, *Cistus albidus*, *Fraxinus ornus* und *Ostrya carpinifolia*. (vgl. Steckbrief zu *A. monspessulanum*, <https://www.kwis-rlp.de/klimawandelfolgen/wald/ergaenzende-baumarten>)

3.8 *Acer opalus* – Italienischer Ahorn

Das Klima in Rheinland-Pfalz stimmt sehr gut mit dem Klima im Kernverbreitungsgebiet des Italienischen Ahorns überein. Leichte Abweichungen sind beispielsweise bei der Hülle Temperaturspanne im Gesamtjahr vs. Niederschlag in der forstlichen Vegetationszeit zu sehen (geringerer Gang der Mitteltemperaturen in der Vegetationszeit, Abb. 3.8-1 A). Eine geringere Temperaturspanne wird jedoch als unkritisch für eine erfolgreiche Etablierung der Art angesehen.

Weiterhin kommen in der Region Rheinhessisch-Pfälzisches Tafel- und Hügelland Kombinationen zu geringer Winterniederschläge bei mittlerer Temperatur in der forstlichen Vegetationszeit vor (Abb. 3.8-1 B, S2). An diesen Standorten könnte

daher derzeit noch ein Defizit in der Wasserverfügbarkeit vorliegen. Nach den aktuellen Klimaprojektionen ist eine Zunahme der Winterniederschläge bis Ende des Jahrhunderts um 5-25 % möglich, so dass sich die Bedingungen für das Wachstum des Italienischen Ahorns diesbezüglich verbessern könnten. Dies bildet sich auch bei einigen, aber nicht allen Modellen ab. Gleichzeitig zeigen manche Modelle aber eine Überschreitung der Temperatur in der forstlichen Vegetationszeit in Kombination mit geringen Winterniederschlägen auf, weshalb an den Standorten (Oberrheingebiet) weiterhin Hitze-Trockenheitsprobleme auftreten können. (S1, S4)

Das Niederschlagsdefizit in den Wintermonaten wie auch im Gesamtjahr führt in der Region Rheinhessisch-Pfälzisches Tafel- und Hügelland im gegenwärtigen Klima zu einer leichten Abwertung der Eignung auf *gut*, auf der übrigen Fläche von Rheinland-Pfalz wird die Eignung mit *sehr gut* bewertet (Abb. 3.8-2 A). Mitte des Jahrhunderts verbessert sich die Eignung an diesen Standorten unter Annahme zunehmender Winterniederschläge bei starkem Klimawandel (Abb. 3.8-2 B). Gegen Ende des Jahrhunderts ist dagegen im gesamten Oberrheingebiet eine leichte Abwertung auf gute Eignung zu erkennen (Abb. 3.8-2 C), was

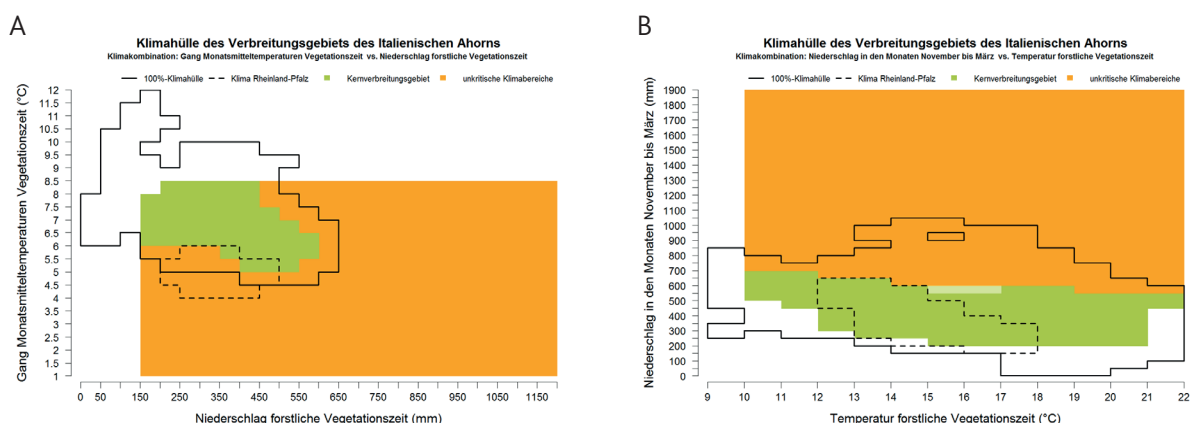


Abbildung 3.8-1: Klimahüllen Niederschlag in der forstlichen Vegetationszeit vs. Gang der Monatsmitteltemperaturen in der Vegetationszeit (A) und Temperatur in der forstlichen Vegetationszeit vs. Niederschlag in den Wintermonaten (B) zum Italienischen Ahorn (*Acer opalus*). Schwarze Umrandung: 100 %-Hülle. Schwarz gestrichelte Umrandung: Klima in Rheinland-Pfalz im Zeitraum 1971-2000 auf Grundlage des WorldClim2.0-Datensatzes. Grün: Kernbereiche der Verbreitung. Orange: Auffüllung einer Kenngröße in unkritische Wertebereiche.

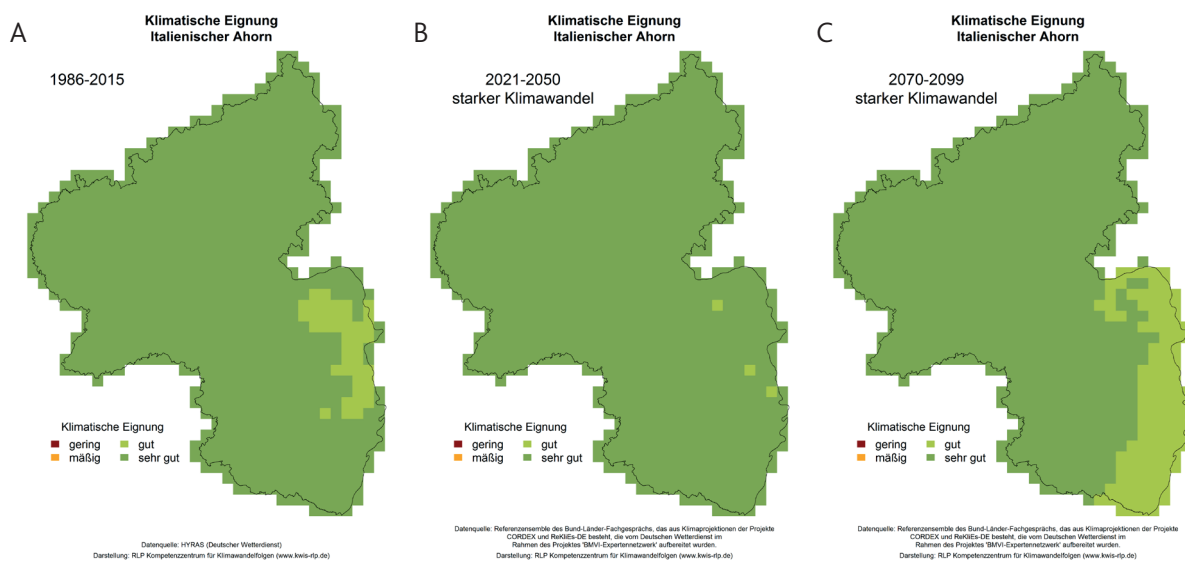


Abbildung 3.8-2: Eignungskarten zum Italienischen Ahorn (*Acer opalus*). A: HYRAS Gegenwart (1986-2015), B/C: BMVI Expertennetzwerk nahe und ferne Zukunft (2021-2050 und 2070-2099) nach RCP8.5.

durch mögliche Überschreitungen der Temperaturen in der forstlichen Vegetationszeit und im wärmsten Monat verursacht wird. Insofern ist der Anbau des Italienischen Ahorns in den heißesten Regionen von Rheinland-Pfalz nur eingeschränkt zu empfehlen.

Kalkfreie Standorte sind für den Italienischen Ahorn ungeeignet. Zu den natürlich vergesellschafteten Baumarten zählen verschiedene Eichen- und Lindenarten sowie *Taxus baccata*, *Sorbus aria*, *Pinus nigra*, *Fagus sylvatica*, *Acer spec.*, *Carpinus betulus* und *Castanea sativa*. (vgl. Steckbrief zu *A. opalus*, <https://www.kwis-rlp.de/klimawandelfolgen/wald/ergaenzende-baumarten>)

3.9 *Castanea sativa* – Edelkastanie

Das gegenwärtige Klima in Rheinland-Pfalz stimmt größtenteils mit den Wertebereichen des Kernverbreitungsgebietes der Edelkastanie überein. Abweichungen sind in den kühleren Regionen bei der Hülle Temperatur in der forstlichen Vegetationszeit vs. Temperatur im Gesamtjahr vorhanden (Abb. 3.9-1 A). Mit fortschreitendem Klimawandel verschieben sich die Temperaturbedingungen in Rheinland-Pfalz bis hin zu einer vollständigen Überlappung mit den Wertebereichen des Kernverbreitungsgebietes. Einzelne Modelle

zeigen in dieser Hülle bei starkem Klimawandel zum Ende des Jahrhunderts eine mögliche Überschreitung der Temperatur in der forstlichen Vegetationszeit an (S1). Die temperaturbezogenen Kennwerte Wachstumsgradtage und Temperatur im wärmsten Monat liegen in Rheinland-Pfalz derzeit ebenfalls in der unteren Hälfte des Wertebereichs des Kernverbreitungsgebietes der Edelkastanie. Die Klimaprojektionen indizieren jedoch auch bei diesen Hüllen eine Verschiebung an den oberen Rand der jeweiligen Hüllen (S1), was sich positiv auf die Wuchsleistung auswirken kann.

Die Niederschlagsseasonalität ist in Rheinland-Pfalz im gegenwärtigen Klima deutlich geringer als im Kernverbreitungsgebiet der Edelkastanie. Die Niederschlagssummen der einzelnen Kennwerte liegen vollständig innerhalb der Wertebereiche der Klimate im Kernverbreitungsgebiet. Dies ist beispielsweise anhand der Hülle Temperatur in der forstlichen Vegetationszeit / Niederschlag im Gesamtjahr und anhand der Kennwertetabelle zu erkennen (Abb. 3.9-1 B, Anhang A1). Im zukünftigen Klima verschieben sich die Temperaturwerte deutlich an die Obergrenze der Hülle, wobei einzelne Modelle sogar eine Überschreitung der Temperatur in der forstlichen Vegetationszeit anzeigen (S1). Unterschreitungen der Wertebereiche der Niederschlagsmengen sind im zukünftigen Klima aber nicht zu erwarten (S1, S4).

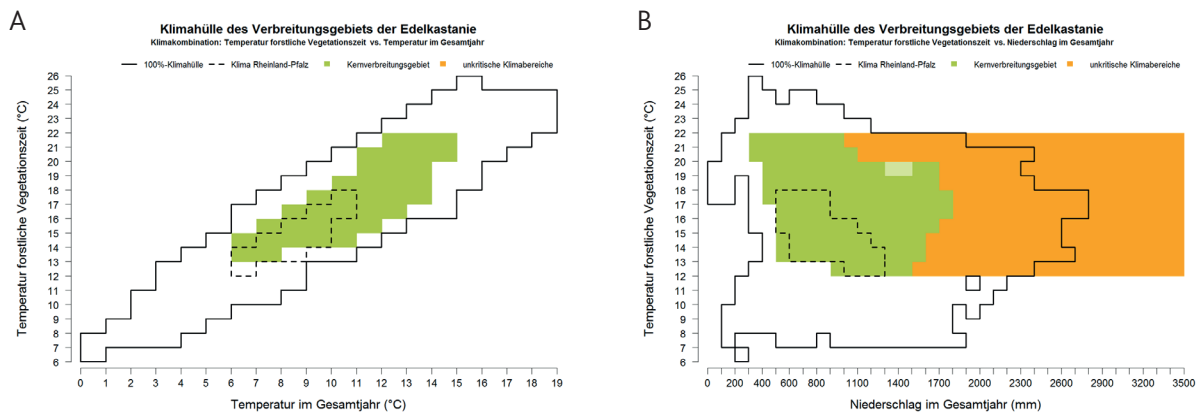


Abbildung 3.9-1: Klimahüllen Temperatur im Gesamtjahr vs. Temperatur in der forstliche Vegetationszeit (A) und Niederschlag im Gesamtjahr vs. Temperatur in der forstliche Vegetationszeit (B) zur Edelkastanie (*Castanea sativa*). Schwarze gestrichelte Umrandung: Klima in Rheinland-Pfalz im Zeitraum 1971-2000 auf Grundlage des WorldClim2.0-Datensatzes. Grün: Kernbereiche der Verbreitung. Orange: Auffüllung einer Kenngröße in unkritische Wertebereiche.

Bereits im gegenwärtigen Klima unterschreiten die Temperaturen im kältesten Monat nicht die Wertebereiche des Kernverbreitungsgebietes der Edelkastanie (S1).

Die Eignung der Edelkastanie wird auf Basis der Klimahüllen-Übereinstimmung fast vollständig mit *sehr gut* bewertet. Die sehr gute Bewertung bleibt bei starkem Klimawandel sowohl in naher Zukunft als auch Ende des Jahrhunderts bestehen.

Staanasse Standorte sind für die Edelkastanie ungeeignet. Weitere Ausschlusskriterien sind reine Podsole und freier Kalk im Oberboden. Auch Niederschlagsdefizite in der Vegetationszeit und Lichtmangel im Alter wirken sich negativ aus. Zu den natürlich vergesellschafteten Baumarten zählen verschiedene Eichenarten sowie *Betula pendula*, *Carpinus betulus*, *Fraxinus excelsior*, *Abies alba*, *Prunus avium*, *Fagus orientalis*, *Alnus glutinosa*, *Ulmus minor*, *Acer cappadocicum*, *Zelkova*

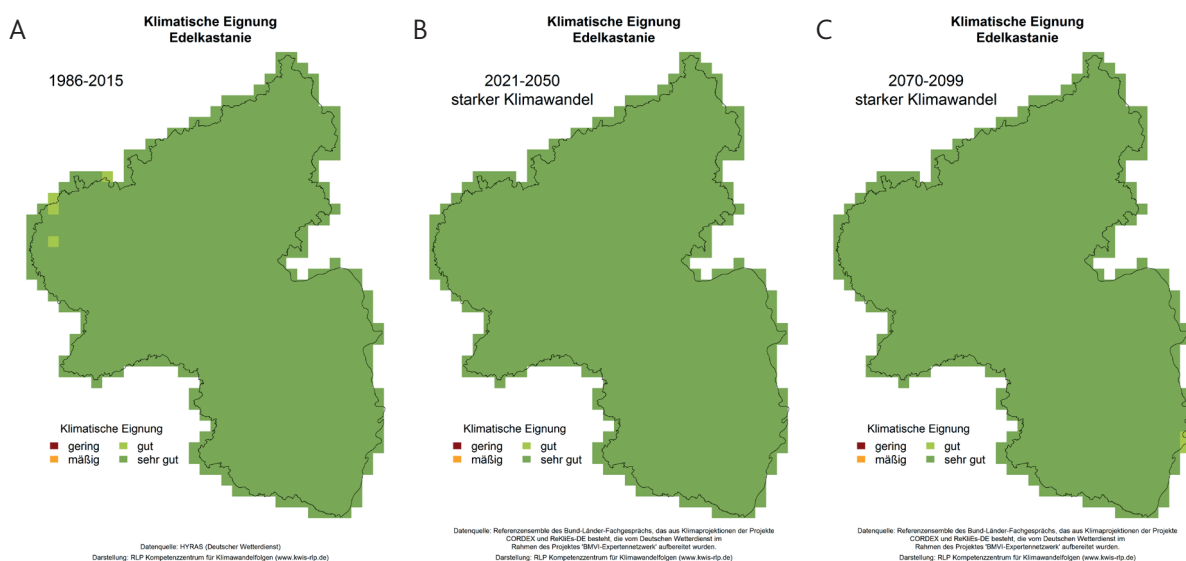


Abbildung 3.9-2: Eignungskarten zur Edelkastanie (*Castanea sativa*). A: HYRAS Gegenwart (1986-2015), B/C: BMVI Expertennetzwerk nahe und ferne Zukunft (2021-2050 und 2070-2099) nach RCP8.5.

carpinifolia, *Tilia rubra* und *Taxus baccata*. (vgl. Steckbrief zu *C. sativa*, <https://www.kwis-rlp.de/klimawandelfolgen/wald/ergaenzende-baum-arten>)

3.10 *Celtis australis* – Südlicher Zürgelbaum

Der Südliche Zürgelbaum ist von seinem Kernverbreitungsgebiet höhere Temperaturen gewöhnt, als sie gegenwärtig in den kühleren Mittelgebirgs-lagen in Rheinland-Pfalz vorherrschen. Besonders deutlich wird dies an der Klimahülle Temperatur in der forstlichen Vegetationszeit vs. Temperatur im Gesamtjahr (Abb. 3.10-1 A). In den wärmebegünstigten Flusstälern der Mosel, des Mittelrheins sowie in der Südost-Hälfte der Pfalz entspricht das gegenwärtige Klima der genannten Klimahülle, wenn auch im unteren Wertebereich des Kernverbreitungsgebietes.

Die Niederschlagsseasonalität ist in Rheinland-Pfalz geringer oder im unteren Wertebereich des Kernverbreitungsgebietes (Anhang A1). Dies wird auch durch die Klimahülle Niederschlagsseasonalität / Niederschlag im Gesamtjahr abgebildet (S1). Insgesamt liegen alle niederschlagsbezogenen Kennwerte innerhalb der Wertebereiche des Kernverbreitungsgebietes und über- bzw. unterschrei-

ten in keiner Kombination die Wertebereiche der jeweiligen Klimahülle (Anhang A1, S1).

Die Januar-Temperaturen in Rheinland-Pfalz liegen alle im unteren Drittel des Wertebereichs der entsprechenden Klimahüllen im Kernverbreitungsgebiet des Südlichen Zürgelbaums (beispielsweise Abb. 3.10-1 B). Die Projektionen zeigen an, dass sich bei starkem Klimawandel sowohl die Januar-Temperaturen als auch die temperaturbezogenen Parameter in mittlere Wertebereiche verschieben, was sich positiv auf die Etablierungsfähigkeit dieser Baumart auswirken könnte (S1).

Unter Berücksichtigung des Standortes scheint eine Etablierung der Art in Rheinland-Pfalz möglich, wenn auch möglicherweise im gegenwärtigen Klima noch mit reduzierter Wuchsleistung oder Vitalität. Die Baumart wird in Süddeutschland bereits häufiger in Städten gepflanzt und hat sich als hitzeresistente Alternative zu den heimischen Arten bewährt, wobei auf die Gefährdung durch Spätfrost und auf eine schlechte Eignung an sehr kalten Standorten (z. B. Münchberg in Oberfranken) hingewiesen wird (GALK *Straßenbaumliste*, 2021; Stadtgrün 2021, 2021).

Im gegenwärtigen Klima weist die Bewertung in den kühleren Regionen Hunsrück, Eifel und

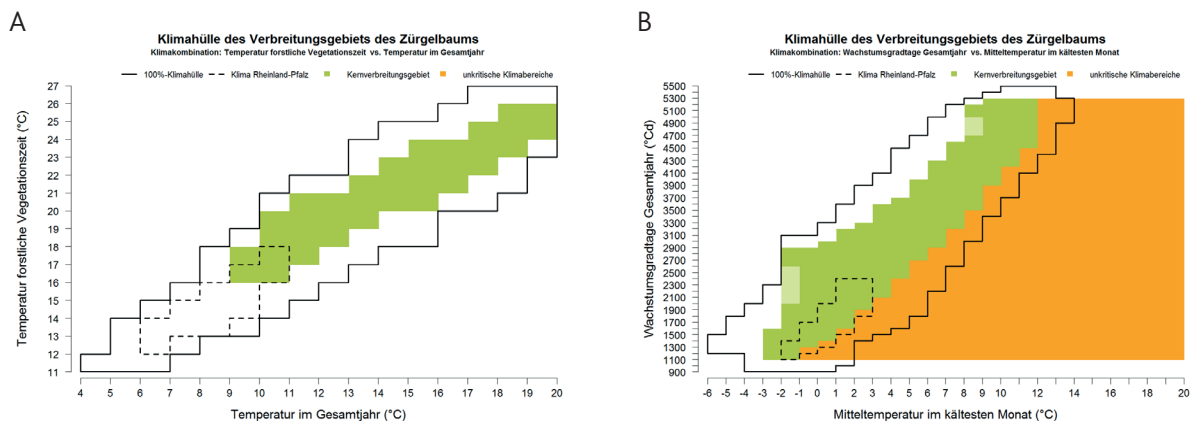


Abbildung 3.10-1: Klimahüllen Temperatur im Gesamtjahr vs. Temperatur in der forstlichen Vegetationszeit (A) und Mitteltemperatur im kältesten Monat vs. Wachstumsgradtage im Gesamtjahr (B) zum Südlichen Zürgelbaum (*Celtis australis*). Schwarze Umrandung: 100 %-Hülle. Schwarz gestrichelte Umrandung: Klima in Rheinland-Pfalz im Zeitraum 1971-2000 auf Grundlage des WorldClim2.0-Datensatzes. Grün: Kernbereiche der Verbreitung. Orange: Auffüllung einer Kenngröße in unkritische Wertebereiche.

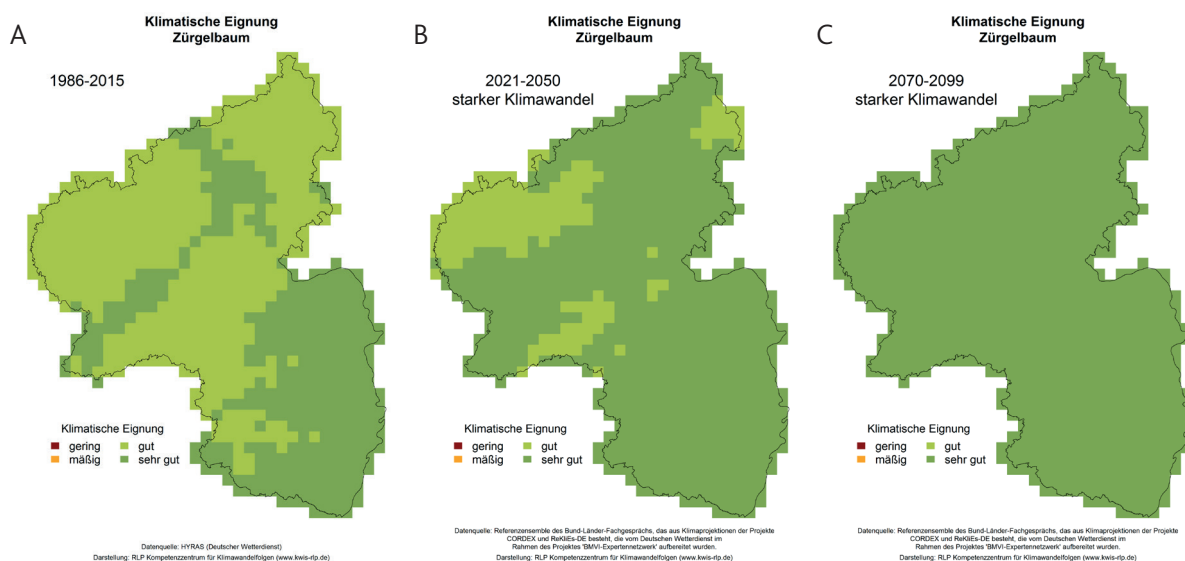


Abbildung 3.10-2: Eignungskarten zum Südlichen Zürgelbaum (*Celtis australis*). A: HYRAS Gegenwart (1986-2015), B/C: BMVI Expertennetzwerk nahe und ferne Zukunft (2021-2050 und 2070-2099) nach RCP8.5.

Westerwald auf eine gute Eignung des Südlichen Zürgelbaums hin. In den wärmebegünstigten Regionen Mosel- und Mittelrheintal, in der Oberrheinebene und im Nordpfälzer-Bergland ergibt die Bewertung gegenwärtig schon eine sehr gute Eignung. Bereits Mitte des Jahrhunderts nimmt die Zahl der Standorte mit reduzierter Eignung ab, gegen Ende des Jahrhunderts ist bei starkem Klimawandel flächendeckend eine sehr gute Eignung zu erwarten.

Der Südliche Zürgelbaum ist sehr anspruchslos, standörtliche Ausschlusskriterien sind den Autoren keine bekannt. Zu den natürlich vergesellschafteten Baumarten zählen *Quercus pubescens*, *Ostrya carpinifolia*, *Fraxinus ornus*, *Corylus avellana*, *Acer spp.*, *Salix spp.*, *Populus spp.* und *Ulmus spp.* (vgl. Steckbrief zu *C. australis*, <https://www.kwis-rlp.de/klimawandelfolgen/wald/ergaenzende-baumarten>)

3.11 *Corylus colurna* – Baumhasel

Das gegenwärtige Klima in Rheinland-Pfalz stimmt weitgehend mit den Wertebereichen des Kernverbreitungsgebietes der Baumhasel überein. Der Jahresgang der Monatsmitteltemperaturen liegt zum Teil unterhalb des Wertebereiches des

Kernverbreitungsgebietes. Dies führt auch zu Abweichungen in der Hülle Temperatur in der forstlichen Vegetationszeit / Temperatur im Gesamtjahr, dabei haben die wärmeren Regionen in Rheinland-Pfalz im Verhältnis zum Gesamtjahr zu geringe Temperaturen in der forstlichen Vegetationszeit (Abb. 3.11-1 A). Bereits im gegenwärtigen Klima unterschreiten die Temperaturen im kältesten Monat nicht die Wertebereiche des Kernverbreitungsgebietes der Baumhasel (S1).

Auf Niederschläge bezogen sind im gegenwärtigen Klima in Rheinland-Pfalz keine maßgeblichen Abweichungen zu den untersuchten Klimahüllen im Kernverbreitungsgebiet der Baumhasel zu erkennen. Lediglich die regenreichsten Standorte in Rheinland-Pfalz sind gegenwärtig noch kühler, als die Regionen im Kernverbreitungsgebiet mit vergleichbaren Niederschlagsmengen, was beispielsweise an den Hüllen Niederschlag im Gesamtjahr vs. Temperatur im Gesamtjahr, Temperatur in der forstlichen Vegetationszeit und Wachstumsgradtage im Gesamtjahr zu erkennen ist (Abb. 3.11-1 B und S1).

Die genannten Abweichungen könnten derzeit noch zu einer reduzierten Wuchsleistung oder Vitalität führen. Das zukünftige Klima in Rheinland-Pfalz verschiebt sich jedoch hin zu höheren

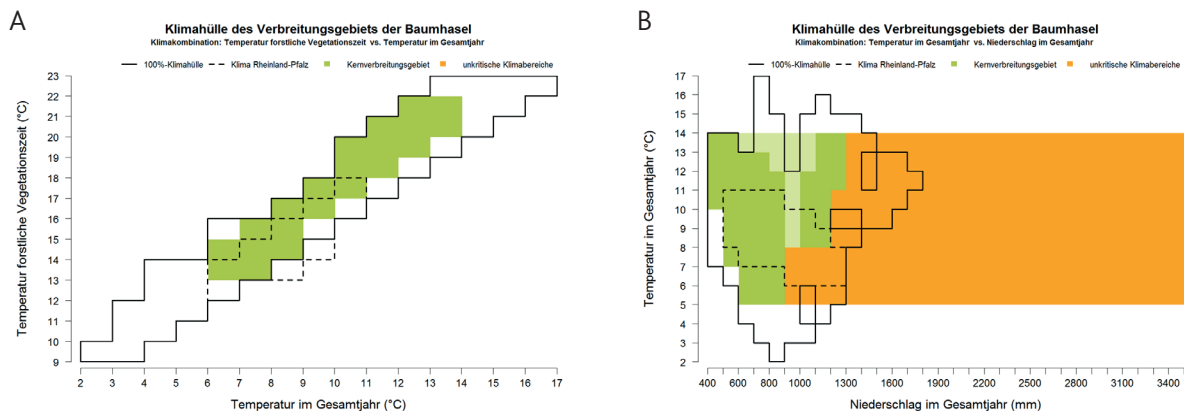


Abbildung 3.11-1: Klimahülle Temperatur im Gesamtjahr vs. Temperatur in der forstlichen Vegetationszeit (A) und Niederschlag im Gesamtjahr vs. Temperatur im Gesamtjahr (B) zur Baumhasel (*Corylus colurna*). Schwarze Umrandung: 100 %-Hülle. Schwarz gestrichelte Umrandung: Klima in Rheinland-Pfalz im Zeitraum 1971-2000 auf Grundlage des WorldClim2.0-Datensatzes. Grün: Kernbereiche der Verbreitung. Orange: Auffüllung einer Kenngröße in unkritische Wertebereiche.

Temperaturwerten, wodurch die mögliche Einschränkung dann nicht mehr besteht (S1). Für das Oberrheingebiet zeigen die meisten Modelle im zukünftigen Klima eine Überschreitung der Wertebereiche der Temperatur im Gesamtjahr und der Wachstumsgradtage an (beispielsweise Temperatur im Gesamtjahr / Niederschlag im Gesamtjahr, S1, S4). Dies ist jedoch nicht der Fall für die Klimahüllen, die Temperatur im wärmsten Monat

und Temperatur in der forstlichen Vegetationszeit (somit die möglichen Temperaturextrema) berücksichtigen.

Die Eignung der Baumhasel wird aufgrund der Analyse im gegenwärtigen Klima in Rheinland-Pfalz flächendeckend in die Kategorien *gut* und *sehr gut* bewertet, wobei die Bewertung *sehr gut* vor allem auf die kühleren Regionen westlicher

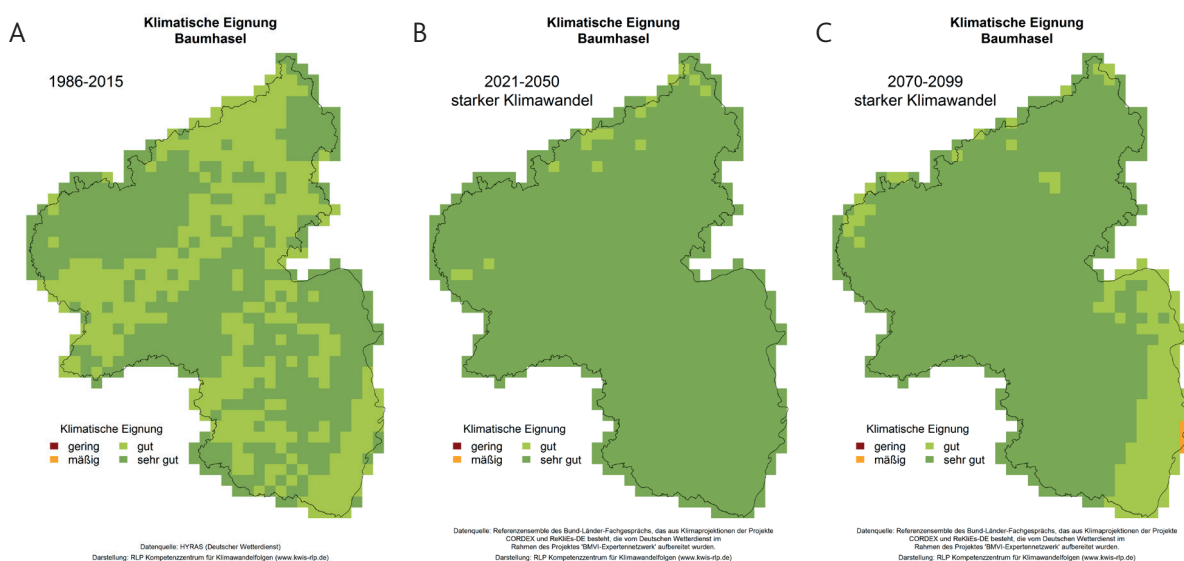


Abbildung 3.11-2: Eignungskarten zur Baumhasel (*Corylus colurna*). A: HYRAS Gegenwart (1986-2015), B/C: BMVI Expertenetzwerk nahe und ferne Zukunft (2021-2050 und 2070-2099) nach RCP8.5.

Hunsrück, Eifel, Westerwald sowie Rhein-Main-Tiefland über das Rheinhessisch-Pfälzische Tafel- und Hügelland bis in den Pfälzerwald zutrifft. Die Eignung in den Regionen mit Bewertung *gut* verbessert sich bei starkem Klimawandel in der nahen Zukunft fast flächendeckend. Ende des Jahrhunderts ist eine rückläufige Eignung im Oberrheingebiet zu erkennen, was auf den Temperaturanstieg im Kalenderjahr und höhere Wachstumsgradtage zurückzuführen ist.

Ganzjährig nasse und wechselfeuchte sowie extrem trockene Standorte und Lagen in Kaltluftbecken sind für die Baumhasel ungeeignet. Zu den natürlich vergesellschafteten Baumarten zählen verschiedene Buchen-, Hainbuchen-, Eichen-, Eschen- und Ahornarten sowie *Tilia tomentosa*, *Prunus avium*, *Sorbus torminalis* und *Castanea sativa*. (vgl. Steckbrief zu *C. colurna*, <https://www.kwis-rlp.de/klimawandelfolgen/wald/ergaenzende-baumarten>)

3.12 *Fraxinus ornus* – Mannaesche

Die kühleren Regionen in Rheinland-Pfalz in Eifel, Westerwald und Hunsrück weisen im gegenwärtigen Klima im Vergleich zum Kernverbreitungsgebiet der Mannaesche geringere Temperaturen auf. Dies bildet sich vor allem bei der Klimahülle

Temperatur im Gesamtjahr vs. Temperatur in der forstlichen Vegetationszeit ab (Abb. 3.12-1 A, S2). Insgesamt liegen alle Temperaturwert-Kombinationen in der unteren Hälfte der jeweiligen Klimahüllen der Baumart. Die kühleren Temperaturen im Januar unterschreiten aber an keinem Standort den Wertebereich des Kernverbreitungsgebietes der Mannaesche. Die Niederschläge stimmen im gegenwärtigen Klima sehr gut mit den Wertebereichen überein, wenn auch die Niederschlags-saisonalität in Rheinland-Pfalz unterhalb oder im unteren Wertebereich des Kernverbreitungsgebietes liegt (Abb. 3.12-1 B).

Für die Etablierung und Wuchsleistung der Baumart ist eine geringere Saisonalität des Niederschlags als unkritisch zu werten, eine gleichmäßigere Verteilung über das Jahr könnte bei ausreichender Gesamtniederschlagsmenge sogar förderlich sein und die Gefahr von Trockenstress reduzieren. Im zukünftigen Klima zeigen die Projektionen eine höhere Niederschlags-saisonalität auf, wodurch dann eine größere Übereinstimmung mit dem Wertebereich der genannten Klimahülle zu erwarten ist. Eine Überschreitung der Wertebereiche der hitze- und trockenheitsbezogenen Kenngrößen ist dagegen bis Ende des Jahrhunderts nicht angezeigt (Anhang A1, S1).

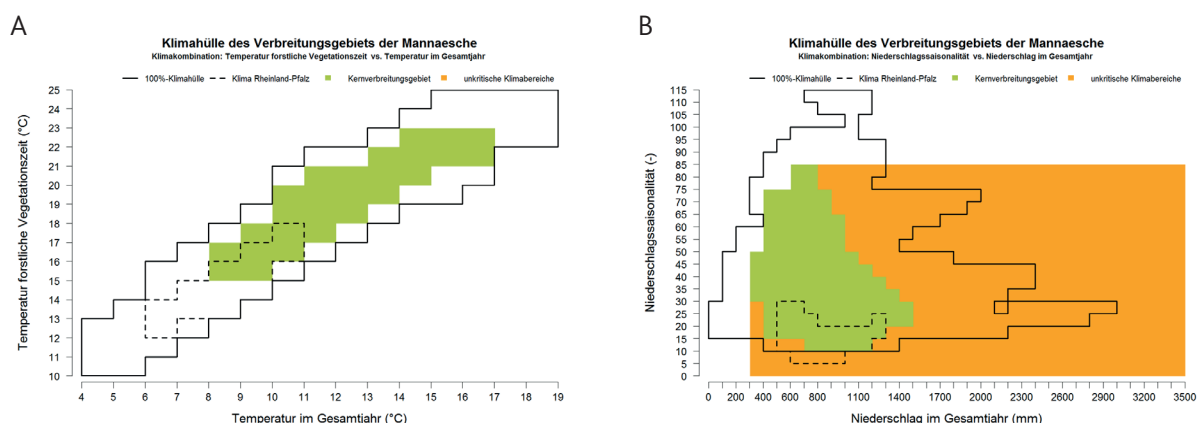


Abbildung 3.12-1: Klimahüllen Temperatur im Gesamtjahr vs. Temperatur in der forstlichen Vegetationszeit (A) und Niederschlag im Gesamtjahr vs. Niederschlags-saisonalität (B) zur Mannaesche (*Fraxinus ornus*). Schwarze Umrandung: 100 %-Hülle. Schwarz gestrichelte Umrandung: Klima in Rheinland-Pfalz im Zeitraum 1971-2000 auf Grundlage des WorldClim2.0-Datensatzes. Grün: Kernbereiche der Verbreitung. Orange: Auffüllung einer Kenngröße in unkritische Wertebereiche.

Die Eignung der Mannaesche für Rheinland-Pfalz wird bereits im gegenwärtigen Klima überwiegend als *sehr gut* bewertet. Eine leichte Abwertung auf *gut* ist lediglich in den kühleren Mittelgebirgsregionen westlicher Hunsrück, Eifel und Westerwald zu sehen. Diese Einschränkungen verschwinden bereits Mitte des Jahrhunderts fast vollständig, im Zeitraum 2070-2099 wird die Eignung flächendeckend mit *sehr gut* bewertet.

Auf nährstoffreichen Böden hat die Mannaesche Konkurrenz Nachteile. Sie bevorzugt sonnige Standorte, Staunässe wird nur kurzfristig toleriert. Zu den natürlich vergesellschafteten Baumarten zählen verschiedene Eichenarten sowie *Castanea sativa*, *Carpinus spec.*, *Ostrya carpinifolia*, *Acer spec.*, *Cedrus libani*, *Pinus nigra* und *Abies spec.* (vgl. Steckbrief zu *F. ornus*, <https://www.kwis-rlp.de/klimawandelfolgen/wald/ergaenzende-baumarten>)

3.13 *Juglans regia* – Walnussbaum

Im gegenwärtigen Klima sind die Temperaturen in der forstlichen Vegetationszeit und die Wachstumsgradtage in den kühleren Regionen von Rheinland-Pfalz noch geringer als im Kernverbreitungsgebiet des Walnussbaums (Abb. 3.13-1 A und S1). Dies betrifft Standorte der Westeifel, des Hunsrücks und des Westerwaldes (S2).

Wenige Standorte in Rheinland-Pfalz (Osteifel, Hunsrück) zeigen in der forstlichen Vegetationszeit geringere Niederschläge als im Kernverbreitungsgebiet in Kombination mit mittleren Gesamtjahrestemperaturen (Abb. 3.13-1 B). An diesen Standorten ist Trockenstress in der forstlichen Vegetationszeit nicht ausgeschlossen, obwohl die Temperaturen dort nicht in für die Walnuss extremen Bereichen liegen. Bei starkem Klimawandel kann sich die Situation durch den Anstieg der Temperaturen im Gesamtjahr verschärfen. Die Mehrheit der Projektionen bildet diese Entwicklung für das zukünftige Klima, insbesondere im Rheinhessischen Tafel- und Hügelland, ab (S1, S4).

Die Eignung des Walnussbaums wird im gegenwärtigen Klima in Rheinland-Pfalz zu großen Teilen als *sehr gut* eingestuft (Abb. 3.13-2 A). In den kühleren Regionen des westlichen Hunsrücks, der Eifel und des Westerwaldes ergibt die Bewertung jedoch zum Teil eine nur mäßige Eignung, was durch derzeit noch zu geringere Temperaturen in der Vegetationszeit hervorgerufen wird. Diese Einschränkung reduziert sich durch den Klimawandel in der nahen Zukunft, woraus eine fast flächendeckende sehr gute Eignung resultiert (Abb. 3.13-2 B).

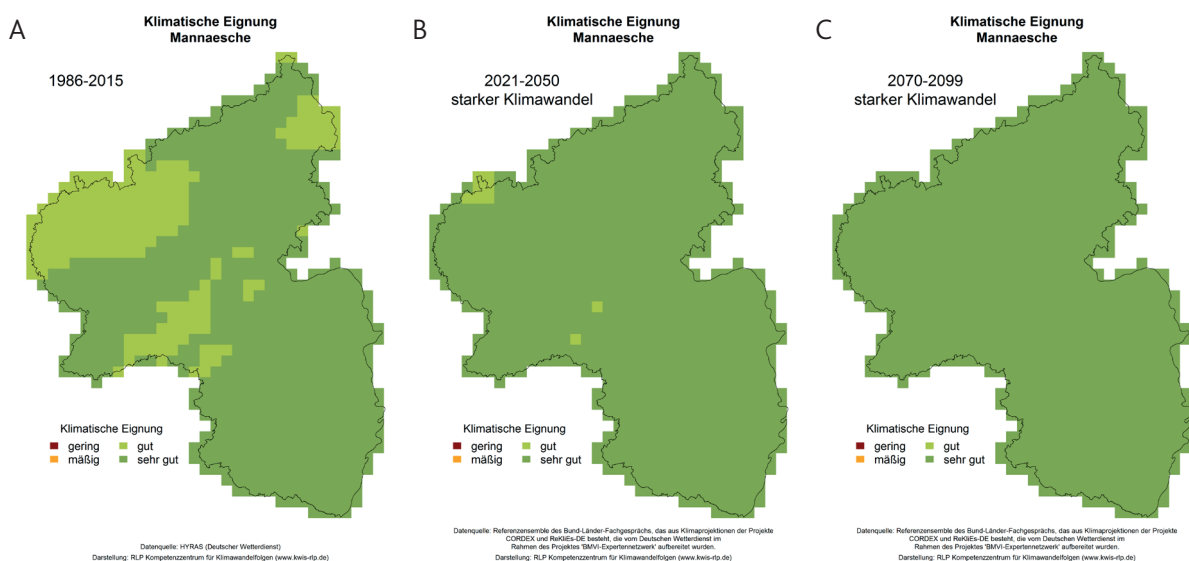


Abbildung 3.12-2: Eignungskarten zur Mannaesche (*Fraxinus ornus*). A: HYRAS Gegenwart (1986-2015), B/C: BMVI Expertenetzwerk nahe und ferne Zukunft (2021-2050 und 2070-2099) nach RCP8.5.

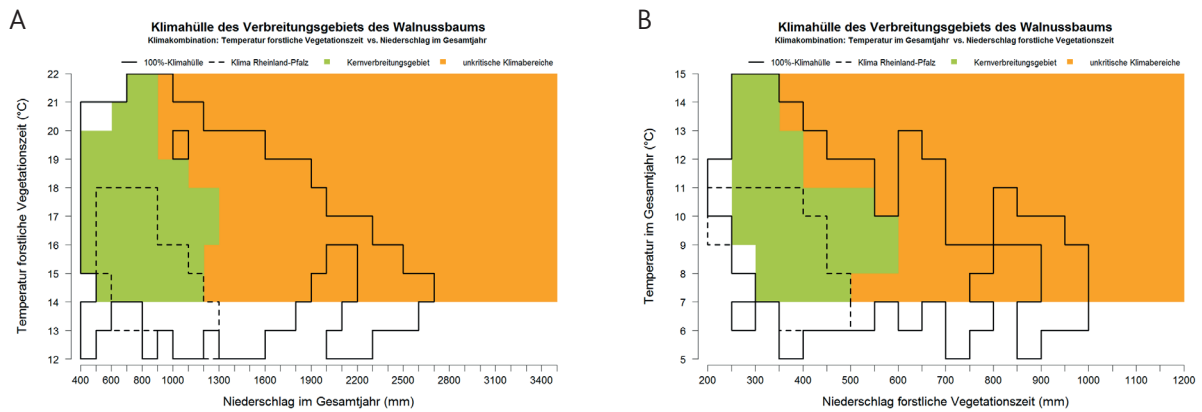


Abbildung 3.13-1: Klimahüllen Niederschlag im Gesamtjahr vs. Temperatur in der forstlichen Vegetationszeit (A) und Niederschlag in der forstlichen Vegetationszeit vs. Temperatur im Gesamtjahr (B) zum Walnussbaum (*Juglans regia*). Schwarze Umrandung: 100 %-Hülle. Schwarz gestrichelte Umrandung: Klima in Rheinland-Pfalz im Zeitraum 1971-2000 auf Grundlage des WorldClim2.0-Datensatzes. Grün: Kernbereiche der Verbreitung. Orange: Auffüllung einer Kenngröße in unkritische Wertebereiche.

Ende des Jahrhunderts wird die Eignung jedoch deutlich schlechter bewertet. Umgekehrt zur Gegenwart sind dann lediglich die kühlen Mittelgebirgsregionen Westerwald, Eifel und Hunsrück noch sehr gut geeignet. Das Oberrheingebiet wird vollständig mit *mäßig* und *gering geeignet* bewertet (Abb. 3.13-2 C). Insbesondere die Temperaturparameter fallen im zukünftigen Klima aus den Bereichen des Kernverbreitungsgebietes der Walnuss heraus. Besonders starke Abweichungen ergeben sich für die Wachstumsgradtage und für die Temperaturen in der Vegetationszeit bzw. im wärmsten Monat (S1).

Für die Walnuss ungeeignet sind leichte sandige und sehr schwere Böden, schattige Standorte auf kalkigen Böden, torfige Böden sowie Standorte mit hoher Luftfeuchtigkeit. Sie bevorzugt sommerwarme, nicht zu niederschlagsarme Lagen, gelegentlich auch in Auewäldern. Zu den natürlich vergesellschafteten Baumarten zählen *Tilia platyphyllos*, *Acer platanoides*, *Ulmus glabra*, *Aesculus hippocastanum*, *Quercus spec.*, *Fraxinus spec.*, *Alnus spec.* und *Carpinus spec.* (vgl. Steckbrief zu *J. regia*, <https://www.kwis-rlp.de/klimawandelfolgen/wald/ergaenzende-baumarten>)

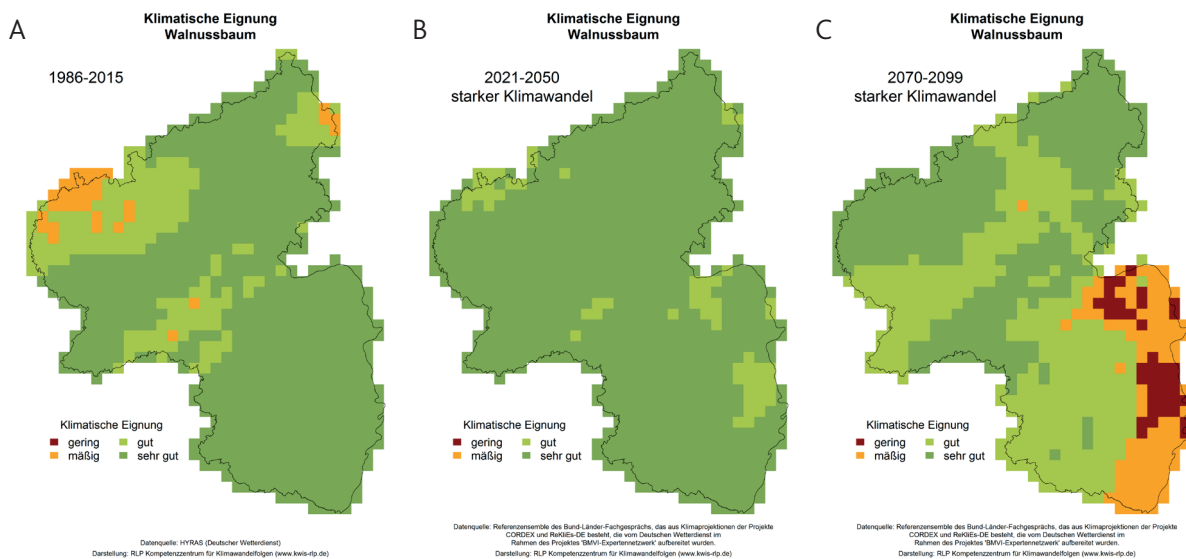


Abbildung 3.13-2: Eignungskarten zum Walnussbaum (*Juglans regia*). A: HYRAS Gegenwart (1986-2015), B/C: BMVI Expertennetzwerk nahe und ferne Zukunft (2021-2050 und 2070-2099) nach RCP8.5.

3.14 *Quercus cerris* – Zerreiche

Das Klima in Rheinland-Pfalz stimmt in weiten Bereichen mit dem Klima im Kernverbreitungsgebiet der Zerreiche überein, wobei die temperatur- und trockenheitsbezogenen Kenngrößen jeweils in der unteren Hälfte des Wertebereichs des Kernverbreitungsgebietes liegen. Abweichungen sind im gegenwärtigen Klima für die kühleren Standorte bei der Klimahülle Temperatur im Gesamtjahr vs. Temperatur in der forstlichen Vegetationszeit zu sehen (Abb. 3.14-1 A). Diese befinden sich im Westerwald, der Eifel und im Hunsrück (S2). Eine Unterschreitung des Wertebereichs der Januartemperaturen ist aber nicht gegeben (S1, Anhang A1). Mit fortschreitendem Klimawandel verbessert sich das Klima dieser Standorte für die Zerreiche, die Modelle zeigen mehrheitlich eine vollständige Übereinstimmung mit dem Wertebereich der genannten Klimahülle zum Ende des Jahrhunderts.

Im Kernverbreitungsgebiet der Zerreiche erreichen manche Standorte bis zu doppelt so hohe Werte der Wachstumsgradtage in Kombination mit gleichen oder geringeren Gesamtjahresniederschlägen im Vergleich zum gegenwärtigen Klima in Rheinland-Pfalz (S1). Dies könnte in Rheinland-Pfalz derzeit noch eine geringere Wuchsleistung

oder Vitalität bedingen, die sich mit zukünftig steigenden Temperaturen gemäß den Projektionen erhöht.

Die Niederschlagsseasonalität ist im Kernverbreitungsgebiet deutlich höher (S1). Weiterhin zeichnet sich das Klima in Rheinland-Pfalz durch einen vergleichsweise geringen Trockenheitsindex aus (Abb. 3.14-1 B und Anhang A1). Selbst bei zunehmender Trockenheit in den Sommermonaten, wie die Klimaprojektionen für starken Klimawandel erwarten lassen, ist eine Überschreitung der Maximalwerte des Trockenheitsindex und eine damit verbundene Eignungseinschränkung nicht zu erkennen.

Durch die hohe Übereinstimmung der Kennwerte wird die Zerreiche im gegenwärtigen Klima bereits fast flächendeckend mit *sehr gut geeignet* bewertet. Die leichten Einschränkungen an den kühleren Standorten der Mittelgebirge verschwinden bereits in der nahen Zukunft vollständig. Eine Verschlechterung ist auch bei stark fortschreitendem Klimawandel bis Ende des Jahrhunderts nicht zu erkennen (Abb. 3.14-2 A-C). Die klimatischen Bewertungen von Zerr- und Flaumeiche entsprechen sich im Wesentlichen.

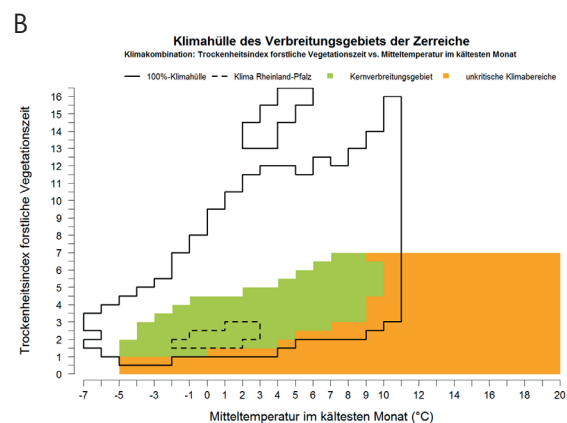
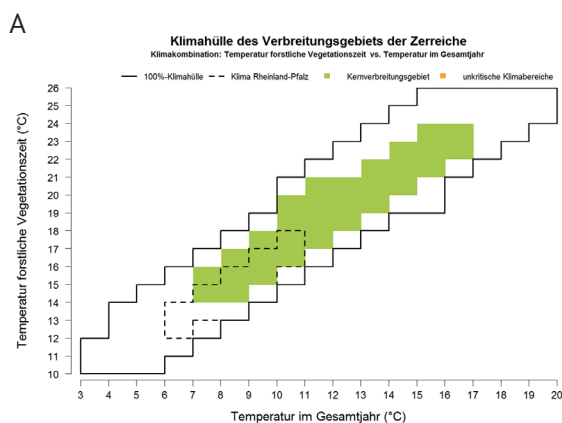


Abbildung 3.14-1: Klimahüllen Temperatur im Gesamtjahr vs. Temperatur in der forstlichen Vegetationszeit (A) und Trockenheitsindex in der forstlichen Vegetationszeit vs. Mitteltemperatur im kältesten Monat (B) zur Zerreiche (*Quercus cerris*). Schwarze Umrandung: 100 %-Hülle. Schwarz gestrichelte Umrandung: Klima in Rheinland-Pfalz im Zeitraum 1971-2000 auf Grundlage des WorldClim2.0-Datensatzes. Grün: Kernbereiche der Verbreitung. Orange: Auffüllung einer Kenngröße in unkritische Wertebereiche.

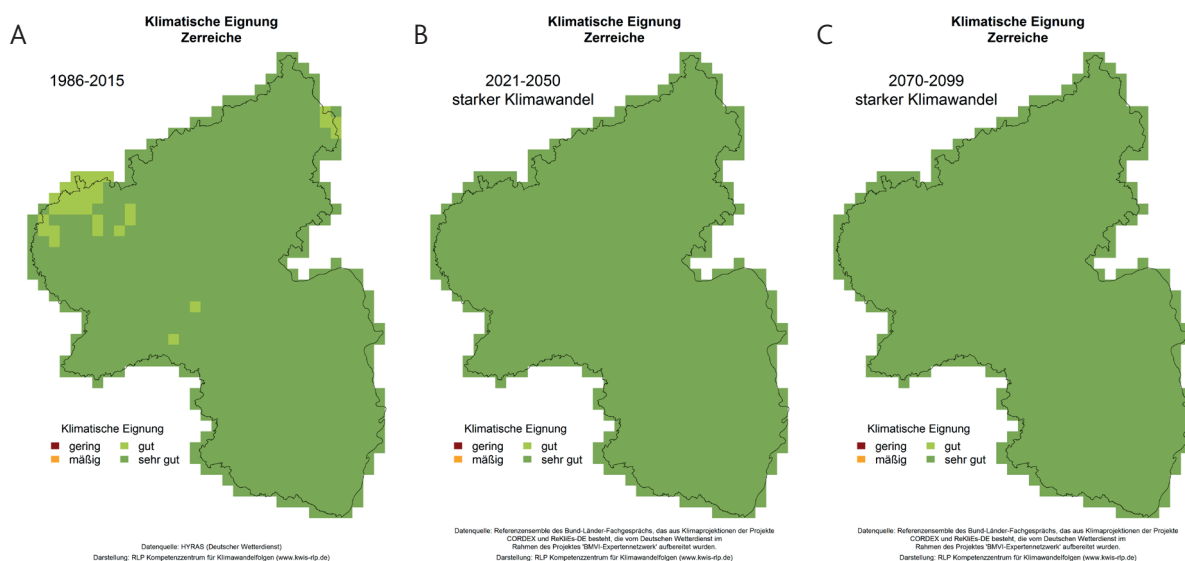


Abbildung 3.14-2: Eignungskarten zur Zerreiche (*Quercus cerris*). A: HYRAS Gegenwart (1986-2015), B/C: BMVI Expertennetzwerk nahe und ferne Zukunft (2021-2050 und 2070-2099) nach RCP8.5.

Trocken-sandige und organische Böden sind für die Zerreiche ungeeignet. Zu den natürlich vergesellschafteten Baumarten zählen verschiedene Eichenarten sowie *Acer campestre*, *Ulmus minor*, *Carpinus orientalis*, *Fraxinus ornus*, *Castanea sativa*, *Fagus sylvatica*, *Ostrya carpinifolia*, *Abies spec.* und *Pinus nigra*. (vgl. Steckbrief zu *Q. cerris*, <https://www.kwis-rlp.de/klimawandelfolgen/wald/ergaenzende-baumarten>)

3.15 *Quercus pubescens* – Flaumeiche

Das Klima in Rheinland-Pfalz stimmt in weiten Bereichen mit dem Klima im Kernverbreitungsgebiet der Zerreiche überein, wobei die temperatur- und trockenheitsbezogenen Kenngrößen jeweils in der unteren Hälfte des Wertebereichs des Kernverbreitungsgebietes liegen. Abweichungen sind im gegenwärtigen Klima für die kühlest Standorte bei der Klimahülle Temperatur im Gesamtjahr vs. Temperatur in der forstlichen Vegetationszeit zu sehen (Abb. 3.15-1 A). Diese befinden sich im Westerwald, der Eifel und im Hunsrück (S2). Eine Unterschreitung des Wertebereichs der Januartemperaturen ist aber nicht gegeben. Mit fortschreitendem Klimawandel verbessert sich das Klima dieser Standorte für die Zerreiche, die Modelle zeigen mehrheitlich eine vollständige

Übereinstimmung mit dem Wertebereich der genannten Klimahülle zum Ende des Jahrhunderts. Im Kernverbreitungsgebiet der Zerreiche erreichen manche Standorte bis zu doppelt so hohe Werte der Wachstumsgradtage in Kombination mit gleichen oder geringeren Gesamtjahresniederschlägen im Vergleich zum gegenwärtigen Klima in Rheinland-Pfalz (S1). Dies könnte in Rheinland-Pfalz derzeit noch eine geringere Wuchsleistung oder Vitalität bedingen, die sich mit zukünftig steigenden Temperaturen gemäß den Projektionen erhöht.

Die Niederschlagssaisonalität ist im Kernverbreitungsgebiet deutlich höher (S1). Weiterhin zeichnet sich das Klima in Rheinland-Pfalz durch einen vergleichsweise geringen Trockenheitsindex aus (Abb. 3.15-1 B, Anhang A1). Selbst bei zunehmender Trockenheit in den Sommermonaten, wie die Klimaprojektionen für starken Klimawandel erwarten lassen, ist eine Überschreitung der Maximalwerte des Trockenheitsindex und eine damit verbundene Eignungseinschränkung nicht zu erkennen.

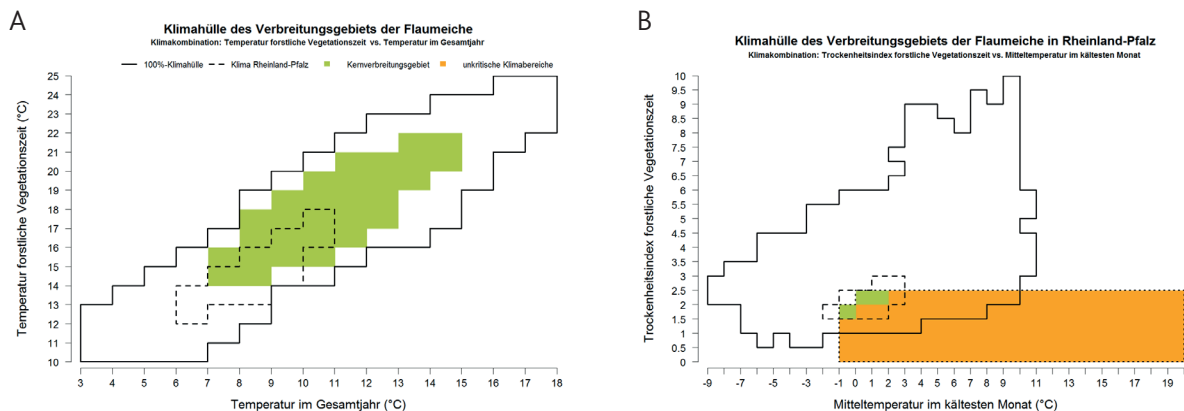


Abbildung 3.15-1: Klimahüllen Temperatur im Gesamtjahr vs. Temperatur in der forstlichen Vegetationszeit (A) und Trockenheitsindex in der forstlichen Vegetationszeit vs. Mitteltemperatur im kältesten Monat (B) zur Flaumeiche (*Quercus pubescens*). Schwarze Umrandung: 100 %-Hülle. Schwarz gestrichelte Umrandung: Klima in Rheinland-Pfalz im Zeitraum 1971-2000 auf Grundlage des WorldClim2.0-Datensatzes. Grün: Kernbereiche der Verbreitung. Orange: Auffüllung einer Kenngröße in unkritische Wertebereiche.

Durch die hohe Übereinstimmung der Klimahüllen ist die Flaumeiche im gegenwärtigen Klima bereits fast flächendeckend mit einer *sehr guten* Eignung bewertet. Die leichten Einschränkungen an den kühlest Standorten der Mittelgebirge verschwinden bereits in der nahen Zukunft vollständig. Eine Verschlechterung ist auch bei stark fortschreitendem Klimawandel bis Ende des Jahrhunderts nicht

zu erkennen (Abb. 3.15-2 A-C). Die klimatischen Bewertungen von Flaum- und Zerreiche entsprechen sich im Wesentlichen.

Stauanasse Böden sind für die Flaumeiche ungeeignet. Zu den natürlich vergesellschafteten Baumarten zählen verschiedene Eichen- und Ahornarten sowie *Carpinus orientalis*, *Celtis spec.*, *Fraxinus*

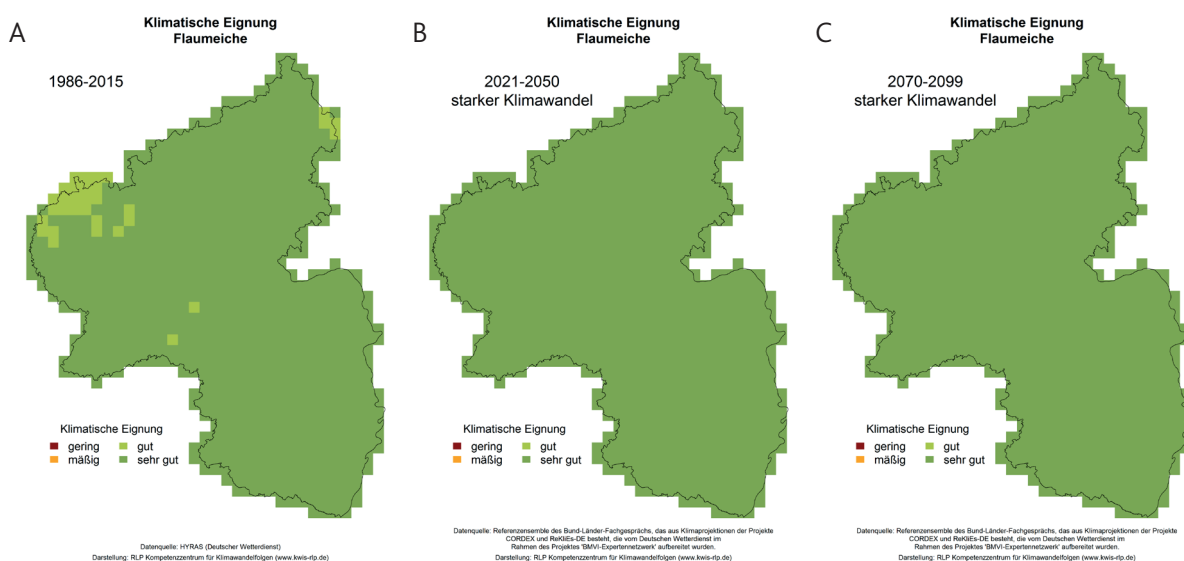


Abbildung 3.15-2: Eignungskarten zur Flaumeiche (*Quercus pubescens*). A: HYRAS Gegenwart (1986-2015), B/C: BMVI Expertennetzwerk nahe und ferne Zukunft (2021-2050 und 2070-2099) nach RCP8.5.

ornus, *Ostrya carpinifolia*, *Pinus spec.*, *Cedrus atlantica* und *Sorbus domestica*. (vgl. Steckbrief zu *Q. pubescens*, <https://www.kwis-rlp.de/klimawan-delfolgen/wald/ergaenzende-baumarten>)

3.16 *Tilia tomentosa* – Silberlinde

Das Klima im Kernverbreitungsgebiet der Silberlinde kennzeichnet sich durch einen ausgeprägteren Jahresgang der Monatsmitteltemperaturen im Vergleich zum gegenwärtigen Klima in Rheinland-Pfalz (Abb. 3.16-1 A). Dies wird für die Etablierung der Baumart als unkritisch angesehen, führt jedoch auch zu Abweichungen zur Klimahülle Temperatur in der forstlichen Vegetationszeit vs. Temperatur im Gesamtjahr, die auf der überwiegenden Fläche von Rheinland-Pfalz im gegenwärtigen Klima besteht (Abb. 3.16-1 B, S2). Im zukünftigen Klima sind Überschreitungen der temperaturbezogenen Kenngrößen Wachstumsgradtage, Temperatur in der forstlichen Vegetationszeit, im Gesamtjahr und im wärmsten Monat sehr wahrscheinlich. Dies betrifft vor allem das Oberrheingebiet, aber auch die großen Flusstäler von Mosel und Mittelrhein (S1, S4). Abweichungen zu den Wertebereichen des Trockenheitsindex der Silberlinde sind auch bis Ende des Jahrhunderts nicht zu erwarten (S1, S4).

Die Niederschlagsmengen in Rheinland-Pfalz entsprechen im Wesentlichen denen des Kernverbreitungsgebietes der Silberlinde. Dies wird beispielsweise anhand der Klimahülle Niederschlag in der forstlichen Vegetationszeit vs. Niederschlag im Gesamtjahr und über die Kennwertetabelle deutlich (Abb. 3.16-2 A, Anhang A1). Bis Ende des Jahrhunderts ist hinsichtlich der Niederschläge keine Verschlechterung für die Silberlinde zu erwarten.

Eine Unterschreitung des Wertebereichs der Januartemperaturen ist an keinem Standort gegeben (Abb. 3.16-2 B).

Die Eignung der Silberlinde wird im gegenwärtigen Klima auf der überwiegenden Fläche von Rheinland-Pfalz mit *gut* bewertet. Die leichte Abwertung wird durch den geringeren Jahresgang der Temperatur und entsprechender Abweichung der Temperatur in der forstlichen Vegetationszeit im Verhältnis zu den Ganzjahrestemperaturen verursacht. Mitte des Jahrhunderts nimmt die Eignung aufgrund steigender Temperaturen zu und erreicht nahezu flächendeckend die Bewertung *sehr gut*, mit wenigen Ausnahmen am nördlichen Rand von Rheinland-Pfalz (insbesondere Westeifel). Ende des Jahrhunderts übersteigen aber verschiedene

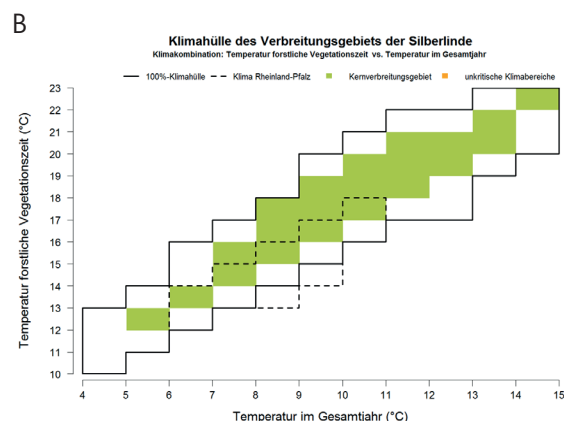
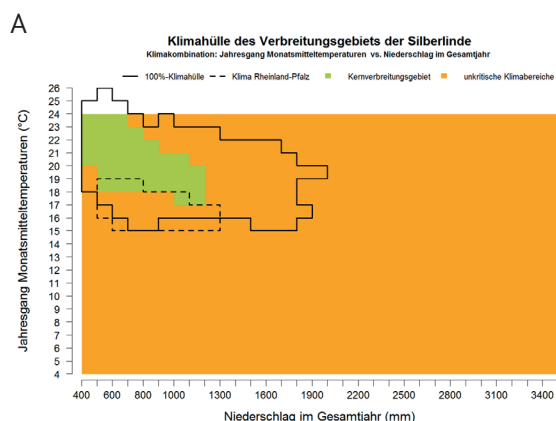


Abbildung 3.16-1: Klimahüllen Niederschlag im Gesamtjahr vs. Jahresgang der Monatsmitteltemperaturen (A) und Temperatur in der forstlichen Vegetationszeit vs. Temperatur im Gesamtjahr (B) zur Silberlinde (*Tilia tomentosa*). Schwarze Umrandung: 100 %-Hülle. Schwarz gestrichelte Umrandung: Klima in Rheinland-Pfalz im Zeitraum 1971-2000 auf Grundlage des WorldClim2.0-Datensatzes. Grün: Kernbereiche der Verbreitung. Orange: Auffüllung einer Kenngröße in unkritische Wertebereiche.

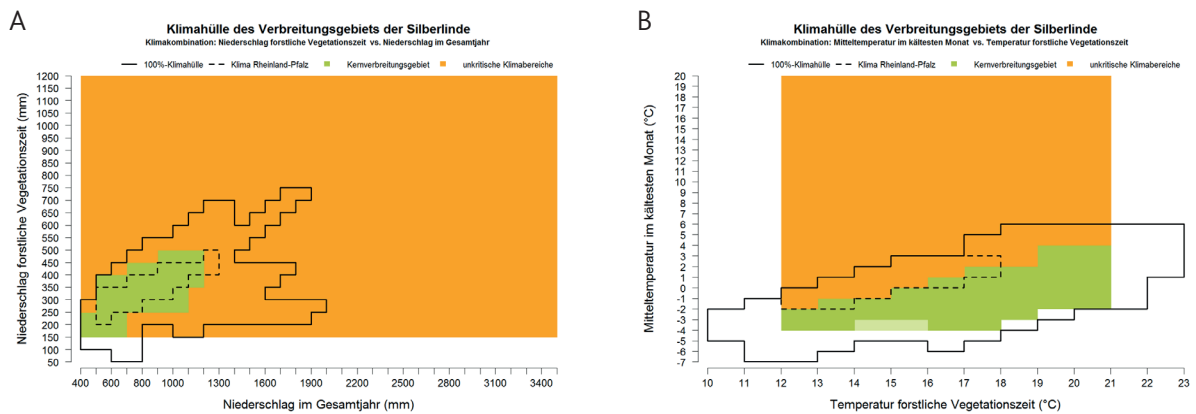


Abbildung 3.16-2: Klimahüllen Niederschlag in der forstlichen Vegetationszeit vs. Niederschlag im Gesamtjahr (A) und Temperatur im kältesten Monat vs. Temperatur in der forstlichen Vegetationszeit (B) zur Silberlinde (*Tilia tomentosa*). Schwarze Umrandung: 100 %-Hülle. Schwarze gestrichelte Umrandung: Klima in Rheinland-Pfalz im Zeitraum 1971-2000 auf Grundlage des WorldClim2.0-Datensatzes. Grün: Kernbereiche der Verbreitung. Orange: Auffüllung einer Kenngröße in unkritische Wertebereiche.

Temperaturparameter die Wertebereiche des Kernverbreitungsgebietes der Silberlinde, so dass sich die Eignung bei starkem Klimawandel auf der ganzen Fläche verschlechtert. Die stärkste Einschränkung ist im Oberrheingebiet zu sehen, wo die Eignung nur noch mit *mäßig* bewertet wird.

natürlich vergesellschafteten Baumarten zählen verschiedene Eichenarten sowie *Acer campestre*, *Carpinus betulus*, *Ulmus minor*, *Pyrus pinaster* und *Fraxinus ornus*. (vgl. Steckbrief zu *T. tomentosa*, <https://www.kwis-rlp.de/klimawandelfolgen/wald/ergaenzende-baumarten>)

Stauwasser Böden, Pseudogley auf Verebnungen und Ton sind für die Silberlinde ungeeignet. Ältere Bäume haben hohe Lichtansprüche. Zu den

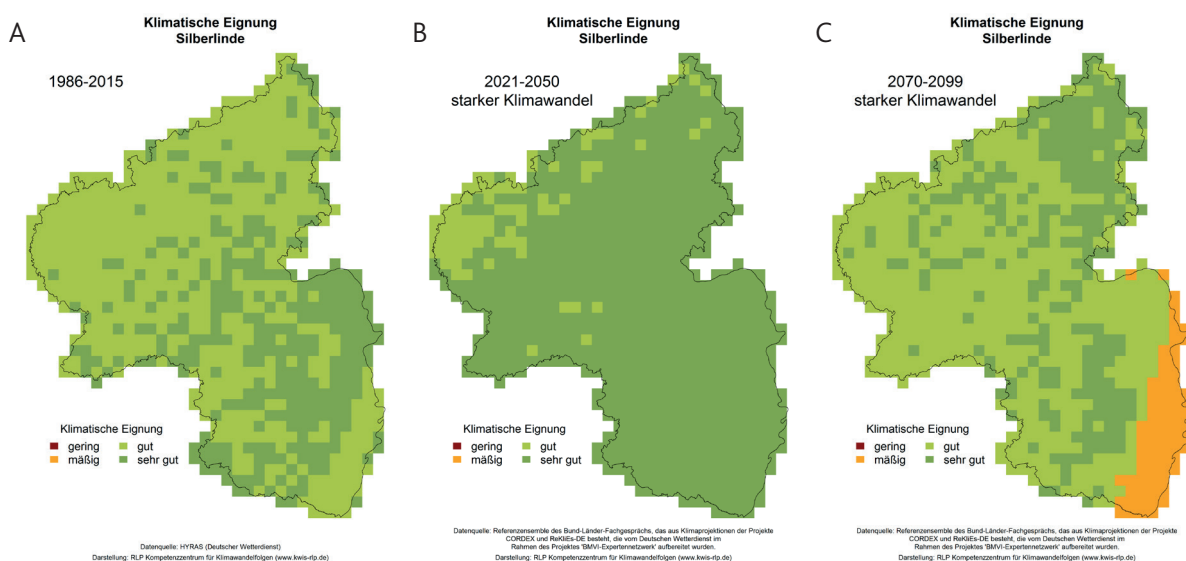


Abbildung 3.16-3: Eignungskarten zur Silberlinde (*Tilia tomentosa*). A: HYRAS Gegenwart (1986-2015), B/C: BMVI Expertennetzwerk nahe und ferne Zukunft (2021-2050 und 2070-2099) nach RCP8.5.

4 Methodendiskussion

4.1 Begründung der angewandten Methoden

Für die meisten der untersuchten Baumarten sind weder in Deutschland noch in benachbarten Ländern ähnlicher geographischer Breite Anbauverfahren vorhanden. Eine Bewertung der Wuchseistung war daher lediglich teilweise und nur qualitativ auf Basis von Literaturangaben möglich. Die Eignungsabschätzung bezieht sich entsprechend ausschließlich auf klimatische Parameter. Die Bewertung der klimatischen Eignung erfolgte anhand von Klimahüllen unter Verwendung ausgewählter Bioklimaparameter, die gemäß Literaturangaben das Verbreitungsgebiet einer Baumart limitieren können. Neben Temperatur- und Niederschlagssummen kann beispielsweise die Temperatur des kältesten Monats die Verbreitung limitieren (SCHMIEDINGER *et al.*, 2009). MUFFLER *et al.* (2016) (MUFFLER *et al.*, 2016) zeigten Korrelationen zur Sensitivität gegenüber Spätfrost mit den Parametern Minimaltemperatur im Mai, mittlere Temperatur des wärmsten Monats, Jahrestemperaturspanne und Summe der monatlichen Niederschläge in der forstlichen Vegetationszeit. Verschiedene Studien weisen nach Gardner u. a. (GARDNER *et al.*, 2019) auch auf Bezüge zwischen der Niederschlagsmenge in der Vegetationszeit und physiologischen Effekten auf Baumarten hin. Weiterhin findet häufig die Niederschlagssaisonalität Anwendung in Artverbreitungsmodellen. Als wichtigsten Parameter in physiologischen Studien haben Gardner u. a. die Bodenfeuchte identifiziert.

Über die klimatischen Verhältnisse hinaus spielen eine Vielzahl weiterer Faktoren eine Rolle für die Verbreitungsmöglichkeiten einer Baumart. So können Konkurrenzverhältnisse zu anderen Baumarten und der Begleitflora der vorherrschenden Waldgesellschaft einen Einfluss auf die Etablierungs- und Verbreitungsfähigkeit haben (LANDESFORSTEN RHEINLAND-PFALZ, 2020). Weiterhin spielen abiotische, biotische und strukturelle Bodenfaktoren eine wichtige Rolle. Beispielsweise können fehlende mikrobiologische Interaktionen

(Symbiosen), Nährstoffmängel oder extreme Bodenreaktionen (Podsole, freier Kalk) ein schwaches Wachstum bedingen (COURBET *et al.*, 2012; LÜPKE *et al.*, 2018). Zur Berücksichtigung dieser Aspekte wurden im zweiten Projektabschnitt Informationen je Baumart literaturbasiert und überwiegend qualitativ zusammengetragen.

Problematisch war die Identifizierung des natürlichen Verbreitungsgebietes. So ist das Verbreitungsgebiet für manche Baumarten stark anthropogen geprägt (z. B. *Castanea sativa*, *Juglans regia*), für andere sind die gegenwärtigen Standorte nicht georeferenziert beschrieben und teilweise widersprüchlich (z. B. *Corylus colurna*, *Acer opalus*). Eine detaillierte Analyse für jede Baumart wäre sehr aufwändig und war im gegebenen zeitlichen Rahmen nicht möglich. Die vorliegende Analyse hatte vielmehr die Intention, einen ersten, schnell verfügbaren Überblick bereit zu stellen, so dass die stark heterogene Datenlage der Verbreitungsgebiete zum Teil generalisiert werden musste. Besonders seltene Klimakombinationen wurden bei der Methode bewusst nicht berücksichtigt, um mögliche Fehlangaben des Verbreitungsgebietes auszuschließen. Die Standorte der unberücksichtigten seltenen Klimakombinationen sollten jedoch langfristig dahingehend geprüft werden, ob es sich dabei tatsächlich um seltene Randvorkommen oder um Fehlangaben handelt. Seltene Randvorkommen könnten wichtige Hinweise auf spezielle Anpassungsfähigkeiten (beispielsweise größere Kältetoleranz) der jeweiligen Baumart geben und im Einzelfall bei der Auswahl passender Standorte für die Saatgutgewinnung hilfreich sein. Eine regelmäßige Aktualisierung ist vorgesehen, sobald neue Informationen zur Verfügung stehen.

Standortansprüche von Baumarten werden in der Literatur häufig unterschiedlich bewertet, beschrieben und kategorisiert. Meist werden Kategorien innerhalb einer Region in Relation zueinander gebracht. Eine Übertragung ist schon aufgrund unterschiedlicher Höhenlagen nicht immer möglich und macht eine Vereinheitlichung häufig schwierig. Die Zusammenstellung der verfügbaren Literatur ist dadurch größtenteils

qualitativ und die Übertragung auf die rheinland-pfälzischen Flächen auf Expertenwissen angewiesen.

Zur Erhöhung der Resilienz der rheinland-pfälzischen Wälder verfolgt Landesforsten die Strategie der dosierten, d. h. nur punktweisen und in Bezug auf den Flächenanteil deutlich begrenzten Einbringung nicht-gebietsheimischer Baumarten in Form von Mischungselementen in überschaubaren ökologischen Nischen. Ziel ist dabei „die Erhaltung von Wäldern, die sich aus sich selbst heraus im Klimawandel anpassen“ (LANDESFORSTEN RHEINLAND-PFALZ, 2020). In erster Linie dient die Einbringung ergänzender Baumarten der Erhöhung der Risikostreuung durch erhöhte Artenvielfalt und damit zur Erhöhung der Fähigkeit zum Erhalt der Vegetationsform Wald. Wirtschaftliche Aspekte (Produktivität und Leistung) standen somit nicht im Vordergrund, sondern das Aufzeigen klimatisch-ökologischer Perspektiven.

4.2 Stärken und Schwächen der Methodik

Die Bewertung der Eignung einer Baumart für ein bestimmtes Gebiet ist einerseits von verschiedenen Umweltfaktoren abhängig (Klima, Boden, Ökologie) und andererseits von Funktionen, die die Baumart erfüllen soll, wie wirtschaftliche Nutzbarkeit, Walderhalt und Erhöhung der Biodiversität. Daher wird vielfach darauf hingewiesen, dass multikriterielle Ansätze robustere Aussagen zur Eignung einer Baumart liefern (ALBRECHT & DE AVILA, 2019; MÄRKEL & DOLOS, 2017; THURM *et al.*, 2018; VASCONCELOS, 2014). Nach ALBRECHT und AVILA (2019) (ALBRECHT & DE AVILA, 2019) sind zwei Faktoren besonders relevant: 1) Die starke Überprägung der Artvorkommen durch Waldbewirtschaftung erlaubt nicht immer die korrekte Identifizierung des natürlichen Verbreitungsgebietes; 2) Für seltene Baumarten ist die Datenlage oft nicht ausreichend. Bisher veröffentlichte multikriterielle Ansätze beziehen neben klimatischen Faktoren bspw. Bodeneigenschaften (THURM *et al.*, 2018) oder Wachstum bzw. Ertragsleistung (MÄRKEL & DOLOS, 2017; VASCONCELOS, 2014) mit ein. Neben der Produktivität kann der Faktor Wachstum Anhaltspunkte zu ökologischen Ansprüchen

und zur Konkurrenzfähigkeit einer Baumart bieten (MÄRKEL & DOLOS, 2017). ALBRECHT und AVILA (2019) (ALBRECHT & DE AVILA, 2019) haben den Weg einer literaturbasierten multikriteriellen Entscheidungsanalyse (MCDA) auf Basis von 35 Kriterien für die Zielsysteme Anbau, Ertrag, Holzverwendung, Ökosystemleistungen und Risiken gewählt. Für die meisten der in unserer Studie untersuchten Baumarten liegen nur wenige oder keine Kenntnisse zu den Ansprüchen an Boden und Ökologie bzw. zur Wuchsleistung vor. Die Kenntnisse sind zudem meist aufgrund unterschiedlicher Standortkartierungssysteme der Länder nicht direkt übertragbar. Die durch die extremen Witterungsbedingungen der jüngsten Jahre entstandenen massiven Schäden und z. T. großen Kalamitätsflächen erfordern ein schnelles Handeln, um die Resilienz der Wälder in Rheinland-Pfalz zu stärken, die wichtigen Funktionen und Ökosystemleistungen zu erhalten und einem Verlust der Vegetationsform Wald vorzubeugen. Daher stand für den Ansatz der vorliegenden Untersuchung eine schnelle orientierende Bewertung möglicher alternativer Baumarten im Vordergrund. Zu diesem Zweck erfolgte quantitativ eine rein klimatische Bewertung, die durch qualitative, literaturbasierte Aussagen ergänzt wurde. Trotz der genannten Schwächen erlaubt die vorliegende Auswertung eine erste Einschätzung der möglichen Anbaueignung im gegenwärtigen Klima und der zukünftigen Eignungsentwicklung der untersuchten Baumarten in Rheinland-Pfalz. Darüber hinaus gibt die Literaturrecherche erste Anhaltspunkte für passende bzw. unpassende Standorte und mögliche Risiken.

GARDNER u. a. (GARDNER *et al.*, 2019) weisen darauf hin, dass die häufig für Artverbreitungsmodelle genutzten Niederschlagsparameter lediglich eine Annäherung an Bodenfeuchte-Bedingungen darstellen. Die tatsächliche für die jeweilige Baumart verfügbare Bodenwassermenge am Standort wird darüber nur unzureichend abgebildet. Die Diskrepanz kann insbesondere durch die lokale Topografie und in Übergangszonen zwischen trockenem und feuchtem Klima verstärkt sein. Insofern sind bewertende Aussagen zur Trockenstressanfälligkeit bei den einzelnen

Baumarten mit Vorsicht vorzunehmen bzw. eingeschränkt. Die Autoren betonen weiterhin, dass klimatische Einflüsse auf Pflanzen insbesondere in der Vegetationszeit zum Tragen kommen. In unserer Studie konnte die Bodenfeuchte aufgrund einer unzureichenden Datenlage ebenfalls nicht berücksichtigt werden. In Annäherung wurden Niederschlagsparameter berücksichtigt, die physiologische Relevanz haben, wie der Niederschlag in der Vegetationszeit und der Sommerniederschlag. Weitere fünf der genutzten Parameter weisen einen Bezug zur Vegetationszeit auf: Mitteltemperatur in der forstlichen Vegetationszeit, Mitteltemperatur im wärmsten Monat, Spanne der Mitteltemperaturen in der Vegetationszeit, Wachstumsgradtage und Trockenheitsindex in der Vegetationszeit. Da in der vorliegenden Arbeit ein ganzes Set an Baumarten jeweils mit den gleichen Bioklimaparametern bewertet wurde, ist eine Vereinheitlichung gegeben, durch die Fehlergebnisse nicht ausgeschlossen sind. Klimatische Verbreitungslimitierungen sind artspezifisch, daher wäre ein eigenes Set physiologisch relevanter Variablen je Baumart die bessere Herangehensweise, die aufgrund unzureichender Kenntnis für die gewählten Baumarten jedoch nicht umsetzbar war. Die genannten Aspekte verdeutlichen die Notwendigkeit, für eine abschließende Bewertung der Eignung einer Baumart die lokalen standörtlichen Verhältnisse zu berücksichtigen.

Für einzelne Kenngrößen wurden in den Klimahüllen Bereiche in eine Richtung aufgefüllt (Kap. 2.1.7). Dies erfolgte immer dann, wenn vorkommende Wertebereiche als unkritisch bzw. günstig für die Etablierung der Baumart angesehen wurden (experten- und literaturbasiert). Beispielsweise ist anzunehmen, dass mehr Niederschlag in Rheinland-Pfalz keine Limitierung für die Etablierung einer Baumart darstellt. Daher wurde das mögliche Vorkommen einer Baumart auch auf Bereiche mit (verglichen zum Kernverbreitungsgebiet) höheren Werten für die Kenngrößen Niederschlag im Kalenderjahr, in der forstlichen Vegetationszeit und in den Wintermonaten erweitert. Für Laubbäume wurde dies auch von CORREIA u. a. (CORREIA *et al.*, 2018) beschrieben, in deren Untersuchungen sich eine größere Nieder-

schlagsmenge im Testgebiet im Vergleich zum Kernverbreitungsgebiet positiv auf das Überleben auswirkte. Unklar ist derzeit jedoch, in wie weit sich höhere Luftfeuchtigkeit auf die Entwicklung schädigender Pilzkrankheiten bei den untersuchten Baumarten auswirkt. Weiterhin ist anzunehmen, dass geringere temperaturbezogene Extremwerte (höhere Tiefsttemperaturen im Winter, geringere Höchsttemperaturen im Sommer) und ein besseres Temperatur-Niederschlag-Verhältnis in der Vegetationszeit (geringerer Trockenheitsindex in der forstlichen Vegetationszeit) keine negativen Auswirkungen auf die Etablierungsfähigkeit einer Baumart in einem neuen Gebiet haben werden. Ein geringerer Trockenheitsindex in der forstlichen Vegetationszeit kann nach den Untersuchungen von Correia *et al.* sogar vorteilhaft für das Wachstum sein (CORREIA *et al.*, 2018).

Die hier vorgenommene klimatische Eignungsbewertung kann aus verschiedenen Gründen lediglich eine Orientierung zum aktuellen und zukünftigen Einfluss des Klimas auf die Lebensfähigkeit und Wachsmöglichkeiten einer Baumart geben. Folgende Gründe bzw. Einschränkungen sind anzuführen:

- eine relativ grobe räumliche Auflösung
- die alleinige Berücksichtigung klimatischer Parameter in der Eignungsbewertung
- die einheitliche Verwendung des Sets an ausgewählten Bioklimaparametern und Parameterkombinationen für alle Baumarten
- Nichtberücksichtigung des Bodenwassergehalts
- Nichtberücksichtigung der Länge der Vegetationszeit
- Nichtberücksichtigung von Variablen, die Extremereignisse darstellen (absolute Temperaturmaxima und –minima, Minimaltemperaturen im Frühjahr [= Spätfrost])
- Nichtberücksichtigung des möglichen Einflusses einer anderen Strahlungsintensität und eines anderen Einstrahlungswinkels im Vergleich zum Herkunftsgebiet

5 Schlussfolgerungen für die Praxis / Fazit

Die dargestellten Ergebnisse erlauben eine Bewertung der Übereinstimmung des Klimas im Kernverbreitungsgebiet der geprüften ergänzenden Baumarten mit dem gegenwärtigen und zukünftigen Klima in Rheinland-Pfalz. Für die Erstellung der Eignungskarten wurden ausschließlich klimatische Parameter verwendet. Zur besseren Abschätzung der Standorteignung können Informationen aus literaturbasiert zusammengestellten Steckbriefen verwendet werden, die über das ForstNET (https://forstnet.wald-rlp.de/intranet/arbeitsplatz_2/Biologische%20Produktion/Steuerung%20der%20Waldentwicklung/Standort%20und%20Baumartenwahl) bzw. im Klimawandelinformationssystem zur Verfügung gestellt sind (<https://www.kwis-rlp.de/klimawandelfolgen/wald/ergaenzende-baumarten/>). Zukünftig sollen Standortansprüche, die aus der Literatur zum natürlichen Herkunftsgebiet sowie anhand von Versuchsanbauten in Deutschland und Nachbarländern ermittelt werden, Einzug in das digitale Standortinformationssystem von Rheinland-Pfalz finden.

Die entwickelte Methode ist grundsätzlich auf jede Baumart anwendbar, deren natürliches Verbreitungsgebiet bekannt und klimatisch beschrieben ist.

Acht Laubbaumarten zukünftig sehr gut geeignet:

Die Bewertung zeigte für die folgenden acht der zehn Laubbaumarten eine auf dem Großteil der Fläche von Rheinland-Pfalz sehr gute Eignung im Zeitraum 2071-2100 unter Annahme eines starken Klimawandels an: **Edelkastanie** (*Castanea sativa*), **Südlicher Zürgelbaum** (*Celtis australis*), **Mannaesche** (*Fraxinus ornus*), **Zerreiche** (*Quercus cerris*), **Flaumeiche** (*Quercus pubescens*), **Baumhasel** (*Corylus colurna*), **Französischer Ahorn** (*Acer monspessulanum*) und **Italienischer Ahorn** (*Acer opalus*). Lediglich *gute Eignung* wurden der Silberlinde (*Tilia tomentosa*) und dem Walnussbaum (*Juglans regia*) auf der Mehrheit der Fläche bescheinigt bis hin zu *mäßiger* und *geringer*

Eignung im Oberrheingebiet. Der Walnussbaum wurde einheitlich in den kühlen Mittelgebirgslagen von Eifel, Westerwald und Hunsrück ebenfalls mit sehr gut bewertet, jedoch deutet der Vergleich mit der Eignungsbewertung im gegenwärtigen Klima eine Verschlechterung durch den Klimawandel an.

Drei Nadelbaumarten zukünftig sehr gut geeignet:

Von den sechs bewerteten Nadelbaumarten zeigte sich für die **Bulgarische Tanne** (*Abies borisii-regis*), die **Atlaszeder** (*Cedrus atlantica*) und die **Libanonzeder** (*Cedrus libani*) eine fast flächendeckende sehr gute Eignung im Zeitraum 2071-2100 unter Annahme eines starken Klimawandels. Für die Griechische Tanne (*Abies cephalonica*) ergab die Bewertung eine gute Eignung über weite Teile der großen Flusstäler von Mosel und Rhein und eine sehr gute Eignung in den kühlen Mittelgebirgslagen von Westerwald, Eifel und Hunsrück.

Unter Berücksichtigung standörtlicher Verhältnisse erscheinen diese 11 bis 14 Baumarten geeignet, um das Spektrum der heimischen Baumarten zu erweitern.

Eine deutliche Verschlechterung der Eignung vom gegenwärtigen zum zukünftigen Klima (Zeitraum 2071-2100) unter Annahme eines starken Klimawandels zeichnet sich für die Baumarten Türkische Tanne (*Abies bornmuelleriana*) und Korsische Schwarzkiefer (*Pinus nigra laricio*) ab. Auf Basis dieser Bewertung erscheinen sie daher nicht empfehlenswert zur langfristigen Unterstützung der Wälder in Rheinland-Pfalz.

Sonderstandort Oberrheingraben:

Deutlich zeichnen sich bei den Eignungsbewertungen die Unterschiede zwischen den kühlen Mittelgebirgsregionen und den großen Flusstälern ab. Eine besondere Herausforderung stellt das Oberrheingebiet dar. Wenngleich auf der Mehrheit der Fläche mit sehr gut bewertet, ist für die **Baumhasel, den Italienischen Ahorn und die Nadelbaumarten eine Einschränkung im Oberrheingebiet** zu erwarten.

Dagegen könnten gemäß der Bewertung die Baumarten **Edelkastanie, Südlicher Zürgelbaum, Mannaesche, Zerreiche, Flaumeiche und Französischer Ahorn** ohne Einschränkung im Oberrheingebiet eingesetzt werden.

Weitere mögliche Kandidaten:

Ohne ergänzende Literaturrecherche wurden weitere Baumarten mit natürlichem Verbreitungsgebiet aus dem eurasiatischen Raum anhand der beschriebenen Methode auf Basis der Übereinstimmung der Klimate bewertet. Die Eignungskarten sind auf Anfrage erhältlich (S6).

Für die **Hopfenbuche** (*Ostrya carpinifolia*) zeigt die Bewertung eine flächendeckend *sehr gute Eignung* sowohl im gegenwärtigen Klima als auch im Zeitraum 2071-2100 unter Annahme eines starken Klimawandels an.

Für die **Steineiche** (*Quercus ilex*) zeigt die Bewertung eine zunehmende Verbesserung durch den Klimawandel an. Im gegenwärtigen Klima erscheinen die großen wärmebegünstigten Flusstäler bereits *sehr gut geeignet*, die übrige Fläche von Rheinland-Pfalz *gut bis mäßig*. Für den Zeitraum 2071-2100 unter Annahme eines starken Klimawandels ergibt die Bewertung eine flächendeckend *sehr gute Eignung* für ganz Rheinland-Pfalz.

Für die **Kilikische Tanne** (*Abies cilicica*) zeigt die Bewertung eine zunehmende Verbesserung durch den Klimawandel an. Im gegenwärtigen Klima zeigt die Bewertung eine fast flächendeckende *gute Eignung* an. Im Zeitraum 2071-2100 unter Annahme eines starken Klimawandels ist fast die gesamte Fläche mit *sehr gut* bewertet, lediglich Teile des nördlichen Oberrheingebietes erscheinen nur *gut geeignet*.

Für die **Nebrodi-Tanne** (*Abies nebrodensis*) zeigt die Bewertung eine zunehmende Verbesserung durch den Klimawandel an. Während im gegenwärtigen Klima die überwiegende Fläche mit *gut geeignet* und das Oberrheingebiet mit *mäßig bis gering geeignet* bewertet wird, kann im Zeitraum 2071-2100 unter Annahme eines starken Klima-

wandels von einer Verbesserung im Oberrheingebiet (keine Standorte mehr *gering geeignet*) sowie im Westerwald und in der Eifel (*sehr gut geeignet*) ausgegangen werden.

Für die **Spanische Tanne** (*Abies pinsapo*) wurden die Variationen *A. p. marocana* (Herkunft Nordmarokko) und *A. p. pinsapo* (Herkunft Südspanien) bewertet. Beide werden im gegenwärtigen Klima flächendeckend als *gering geeignet* bewertet. Eine Verbesserung zeichnet sich bei beiden Variationen im Zeitraum 2071-2100 unter Annahme eines starken Klimawandels ab, mit einer etwas besseren Bewertung der marokkanischen Variation (*mäßige bis gute Eignung* in Westerwald, Eifel, Hunsrück).

Auf Basis dieser Bewertung scheint **insbesondere die Hopfenbuche** *sehr gut geeignet*. **Steineiche** wie auch **Kilikische Tanne** könnten unter Berücksichtigung sehr geeigneter Standorte gegenwärtig möglicherweise auch schon in Betracht gezogen werden. Nebrodi- und Spanische Tanne erscheinen noch nicht anbauwürdig.

Literaturverzeichnis

- ALBRECHT, A. T., & DE AVILA, A. L. (2019). Ein Vorschlag zur literaturbasierten Ermittlung möglicher Alternativbaumarten im Klimawandel am Beispiel der Artensteckbriefe in Baden-Württemberg. *Allgemeine Forst und Jagdzeitung*, 189, 129–143.
- ALEXANDROV, A. H. (2014). *Corylus columna*. In *Enzyklopädie der Holzgewächse: Handbuch und Atlas der Dendrologie* (S. 1–8). American Cancer Society. <https://doi.org/10.1002/9783527678518.ehg1995026>
- BELOULA, S. (2010). Etude sur le dépérissement du Cèdre de l'Atlas dans le Parc National de Belezma (Wilaya de BATNA). [Apport de la télédétection et SIG (60 p.)]. Batna, Annexes: Mem. Mag. Sci. agr. univer.
- CHURKINA, G., ORGANSCHI, A., REYER, C. P. O., RUFF, A., VINKE, K., LIU, Z., RECK, B. K., GRAEDEL, T. E., & SCHELLNHUBER, H. J. (2020). Buildings as a global carbon sink. *Nature Sustainability*, 3(4), 269–276. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0462-4>
- COBANOGLU, G., & SEVGI, O. (2009). Analysis of the distribution of epiphytic lichens on *Cedrus libani* in Elmalı Research Forest (Antalya, Turkey). *Journal of Environmental Biology*, 30(2), 205–212.
- CORREIA, H., ALMEIDA, H., BRANCO, M., TOMÉ, M., CORDERO MONTOYA, R., DI LUCCHIO, L., CANTERO, A., CASERO, J., PRIETO, C., BRAVO, F., GARTZIA, N., ARIAS, A., JINKS, R., PAILLISSA, E., PASTUSZKA, P., ROZADOS LORENZO, M., SILVA PANDO, J., TRAVER, M., ZABALZA, S., ... ORAZIO, C. (2018). Early Survival and Growth Plasticity of 33 Species Planted in 38 Arboreta across the European Atlantic Area. *Forests*, 9(10), 630. <https://doi.org/10.3390/f9100630>
- COURBET, LAGACHERIE, MARTY, LADIER, J., RIPERT, AMANDIER, PAILLISSA, & GUILLEMOT, J. (2012). Le cèdre en France face au changement climatique: Un projet pour un bilan et un transfert des connaissances. *Forêt Entreprise*, 204, 41–45.
- DEUTSCHER WETTERDIENST, BUNDESAMT FÜR SEESCHIFFFAHRT UND HYDROGRAPHIE, BUNDESANSTALT FÜR GEWÄSSERKUNDE, & BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU. (2020). Klimawandelbedingte Änderungen in Atmosphäre und Hydrosphäre: Schlussbericht des Schwerpunktthemas Szenarienbildung (SP-101) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertennetzwerks: S. Brienens, A. Walter, C. Brendel, C. Fleischer, A. Ganske, M. Haller, M. Helms, S. Höpp, C. Jensen, K. Jochumsen, J. Möller, S. Krähenmann, E. Nilson, M. Rauthe, C. Razafimaharo, E. Rudolph, H. Rybka, N. Schade, K. Stanley [PDF]. <https://doi.org/10.5675/EXPNBS2020.2020.02>
- EARLE, C. J. (2021, Juli). Conifers. <https://conifers.org/>
- EUROPEAN COMMISSION. JOINT RESEARCH CENTRE. (2016). European atlas of forest tree species. Publications Office. <https://data.europa.eu/doi/10.2788/4251>
- FICK, S. E., & HIJMANS, R. J. (2017). WorldClim 2: New 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 37(12), 4302–4315. <https://doi.org/10.1002/joc.5086>
- FRICK, C., STEINER, H., MAZURKIEWICZ, A., RIEDIGER, U., RAUTHE, M., REICH, T., & GRATZKI, A. (2014). Central European high-resolution gridded daily data sets (HYRAS): Mean temperature and relative humidity. *Meteorologische Zeitschrift*, 23(1), 15–32. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2014/0560>
- GALK Straßenbaumliste. (2021, Januar). <https://www.galk.de/arbeitskreise/stadtbaeume/themenuebersicht/strassenbaumliste/galk-strassenbaumliste>
- GARDNER, A. S., MACLEAN, I. M. D., & GASTON, K. J. (2019). Climatic predictors of species distributions neglect biophysically meaningful va-

- riables. Diversity and Distributions, ddi.12939. <https://doi.org/10.1111/ddi.12939>
- HAJAR, L., FRANÇOIS, L., KHATER, C., JOMAA, I., DÉQUÉ, M., & CHEDDADI, R. (2010). Cedrus libani (A. Rich) distribution in Lebanon: Past, present and future. *Comptes Rendus Biologies*, 333(8), 622–630. <https://doi.org/10.1016/j.crv.2010.05.003>
- KLEMMT, H.-J. (2017). Mehr Mischung, mehr Produktivität. *LWF aktuell*, 113(2).
- KLIMAWANDELINFORMATIONSSYSTEM RLP. (o. J.). kwis-rlp. <https://www.kwis-rlp.de/daten-und-fakten/klimawandel-zukunft/>
- LAGACHERIE, M., MARTY, P., LADIER, J., RIPERT, C., NIVERT, P., HUARD, F., AMANDIER, L., PAILLASSA, E., & COURBET, F. (2012). Atlas Cedar and climate change in France: Assessment and recommendations.
- LANDESFORSTEN RHEINLAND-PFALZ. (2020). Waldverjüngung im Klimawandel – Waldbauliche Grundsatzanweisung für den Staatswald.
- LÜPKE, M., HEITZ, R., UHL, E., & HÜBNER, C. (2018). Die Edelkastanie in Bayern – Erkenntnisse aus einem Projekt der LWF. *LWF Wissen*, 81.
- MÄRKEL, U., & DOLOS, K. (2017). Tree species site suitability as a combination of occurrence probability and growth and derivation of priority regions for climate change adaptation [PDF]. <https://doi.org/10.5445/IR/1000071173>
- MUFFLER, L., BEIERKUHNLIN, C., AAS, G., JENTSCH, A., SCHWEIGER, A. H., ZOHNER, C., & KREYLING, J. (2016). Distribution ranges and spring phenology explain late frost sensitivity in 170 woody plants from the Northern Hemisphere: Late frost sensitivity of woody species. *Global Ecology and Biogeography*, 25(9), 1061–1071. <https://doi.org/10.1111/geb.12466>
- NORMAND, S., RICKLEFS, R. E., SKOV, F., BLADT, J., TACKENBERG, O., & SVENNING, J.-C. (2011). Postglacial migration supplements climate in determining plant species ranges in Europe. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 278(1725), 3644–3653. <https://doi.org/10.1098/rspb.2010.2769>
- RAUTHE, M., STEINER, H., RIEDIGER, U., MAZURKIEWICZ, A., & GRATZKI, A. (2013). A Central European precipitation climatology? Part I: Generation and validation of a high-resolution gridded daily data set (HYRAS). *Meteorologische Zeitschrift*, 22(3), 235–256. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0436>
- RICHTER, E. (2021, Juli). Baumhasel. <https://www.baumhasel.info/>
- SCHMIEDINGER, A., BACHMANN, M., KÖLLING, C., & SCHIRMER, R. (2009). Verfahren zur Auswahl von Baumarten für Anbauversuche vor dem Hintergrund des Klimawandels. *Forstarchiv*, 80, 15–22. <https://doi.org/10.237603004112-80-15>
- SEIDL, R., & KAUTZ, M. (2019). Einfluss des Klimawandels auf Störungen. In Wohlgemuth, T., Jentsch, A., Seidl, R., *Störungsökologie* (S. 325–336). UTB.
- STADTGRÜN 2021. (2021, Januar). https://www.lwg.bayern.de/mam/cms06/landespflege/dateien/stadtgruen_falzflyer_in.pdf
- STRONA, G., MAURI, A., & SAN-MIGUEL-AYANZ, J. (2016). A high-resolution pan-European tree occurrence dataset. <https://doi.org/10.6084/M9.FIGSHARE.C.3288407.V1>
- SVENNING, J.-C., & SKOV, F. (2007). Could the tree diversity pattern in Europe be generated by postglacial dispersal limitation? *Ecology Letters*, 10(6), 453–460. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2007.01038.x>
- THURM, E. A., HERNANDEZ, L., BALTENSWEILER, A., AYAN, S., RASZTOVITS, E., BIELAK, K., ZLATANOV, T. M., HLADNIK, D., BALIC, B., FREUDENSCHUSS, A., BÜCHSENMEISTER, R., & FALK, W. (2018). Alternative tree species under climate warming in managed European forests. *Forest Ecology*

and Management, 430, 485–497. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.08.028>

VASCONCELOS, A. C. P. (2014). Wälder im Klimawandel: Grundlagen für Anpassungsoptionen in Rheinland-Pfalz. Verl. der Professur für Landespflege der Univ. Freiburg.

VOR, T., SPELLMANN, H., BOLTE, A., & AMMER, C. (Hrsg.). (2015). Potenziale und Risiken eingeführter Baumarten: Baumartenportraits mit naturschutzfachlicher Bewertung. Göttingen University Press. <https://doi.org/10.17875/gup2015-843>

VRIES, S. M. G. DE, ALAN, M., BOZZANO, M., BURIANEK, V., COLLIN, E., COTTRELL, J., IVANKOVIC, M., KELLEHER, C. T., KOSKELA, J., ROTACH, P., VIETTO, L., & YRJÄNÄ, L. (2015). Pan-European strategy for genetic conservation of forest trees: And establishment of a core network of dynamic conservation units. <http://edepot.wur.nl/367753>

Anhang

A1: Klimakennwerte von Rheinland-Pfalz in der Gegenwart (1986-2015) und der Zukunft nach Szenario RCP8.5 (2071-2100, 10. und 90. Perzentil der Flächenmittel des betrachteten Ensembles, jeweils der zweitgeringste und zweithöchste Wert) und der Kernverbreitungsgebiete der Baumarten (Abkürzungen und Erläuterungen s. Kap. 2).

	Rheinland-Pfalz Hyras, 1986-2015		Rheinland-Pfalz RCP8.5, 2070-2100		<i>Acer monspessulanum</i>		<i>Acer opalus</i>		<i>Castanea sativa</i>		<i>Celtis australis</i>	
	P10	P90	P10	P90	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
prec_kalJahr	602	996	578-662	927-1055	400	1912	400	2046	300	2772	200	2975
prec_fVZ	283	387	242-292	333-387	100	765	100	647	50	1129	2	1187
prec_NDJFM	225	461	240-278	471-533	149	977	147	1041	84	1248	90	1362
prec_seasonality	11	18	11-19	20-29	11	69	8	60	7	88	10	123
tavg_kalJahr	8	10	11-12	13-14	7,1	15,4	4,2	15	5	16	5,3	20
tavg_fVZ	14	17	17-18	20-21	13	22	10,1	21,9	11,3	22,5	12	26,5
tavg_warmest	16	19	20-21	23-24	15,6	25,7	12,7	24,5	12,9	26,4	14	29,4
tavg_coldest	-0,1	1,6	3.2-3.7	4.9-5.8	-0,4	8,3	-3	8,3	-5	10,8	-3	13,1
tavg_range	16	18	16-17	18-19	12	20,7	10,9	20,6	8,2	26	9,7	25,4
tavg_vzrange	4,7	5,2	5.7-6.9	6.1-7.7	5,1	10,9	4,8	11,2	3,3	11,1	3,4	11,7
tavg_seasonality	65	79	48-50	54-57	32	85,1	29,7	144,1	21,1	155,6	21,5	126,1
DD5_kalJahr	1535	2113	2231-2531	3066-3393	1322	3800	800	3665	1100	4028	1107	5488
vdi	1,9	2,5	2.2-2.5	2.8-3.1	1,56	5,07	1,13	4,71	1,11	7,08	1,1	39,08

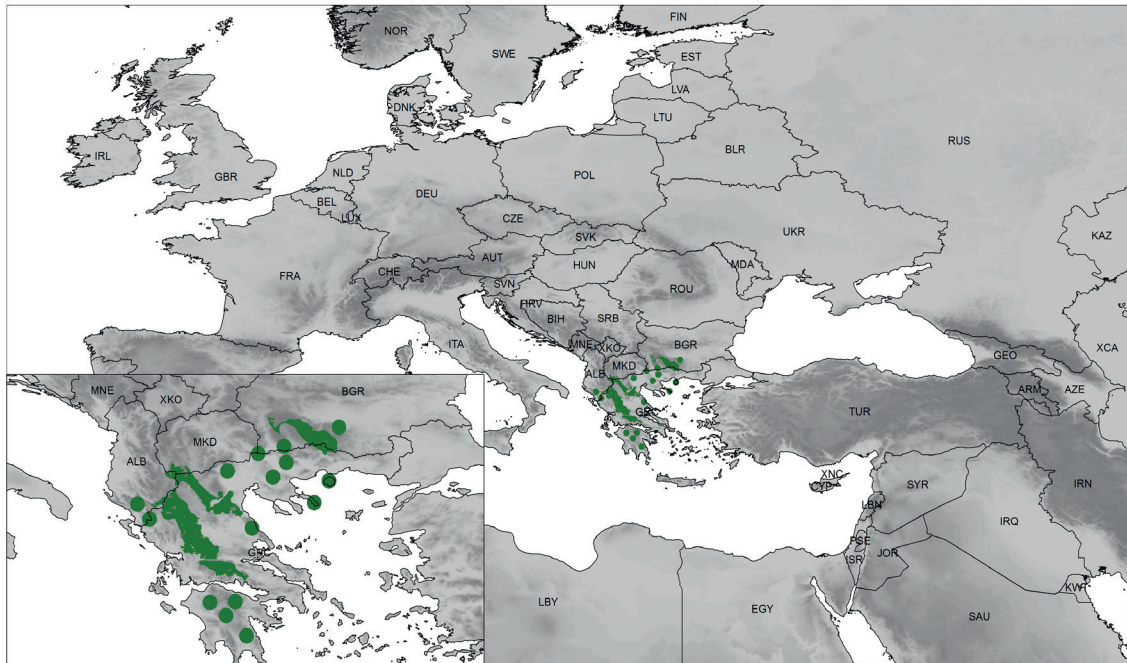
	<i>Corylus colurna</i>		<i>Fraxinus ornus</i>		<i>Juglans regia</i>		<i>Quercus cerris</i>		<i>Quercus pubescens</i>		<i>Tilia tomentosa</i>	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
prec_kalJahr	430	1785	300	2975	486	2605	400	2975	300	2975	404	1756
prec_fVZ	150	680	20	1187	251	995	18	1187	50	1187	147	693
prec_NDJFM	114	901	108	1362	123	1128	105	1362	79	1362	115	1162
prec_seasonality	13	62	12	112	8	51	11	111	7	94	12	68
tavg_kalJahr	5	14,2	4,6	18	7	14	4,1	19	5	17,3	5	14
tavg_fVZ	12	22	11	24	14	21	11	25	11	24	12	21,3
tavg_warmest	14,3	26,1	13,3	27	16,2	23,9	13,1	28,1	13	27,2	13,9	24,2
tavg_coldest	-5	5,9	-4	11,9	-3,3	5,7	-5	10,9	-4,7	10,6	-5	5,9
tavg_range	16,5	25,3	12,8	25,5	14,3	22,8	13,1	26,5	10,1	26,4	15,8	25,5
tavg_vzrange	4,6	10,4	3,8	9,6	4,3	9,1	3,6	10	3,6	10,2	3,9	7,7
tavg_seasonality	45,3	156,8	28,9	148,9	42,7	104,1	29,9	165,6	26,3	139,2	44,2	138,2
DD5_kalJahr	1109	3399	953	4757	1480	3296	919	5123	947	4499	1097	3315
vdi	1,43	3,66	1,03	11,6	1,19	2,92	1,02	12,34	1,01	7,49	1,25	4,01

Fortsetzung A1: Klimakennwerte

	<i>Abies bornmülleriana</i>		<i>Abies borisii-regis</i>		<i>Abies cephalonica</i>		<i>Pinus nigra laricio</i>		<i>Cedrus atlantica</i>		<i>Cedrus libani</i>	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
prec_kalJahr	500	932	440	1623	500	1089	706	1019	215	1125	400	1169
prec_fVZ	179	297	100	342	70	271	150	329	73	211	42	176
prec_NDJFM	186	494	181	1098	214	704	297	571	86	807	212	983
prec_seasonality	16	46	15	67	18	73	18	55	31	83	39	99
tavg_kalJahr	5	12	5	14	7	15	5	13	9	15	4	16
tavg_fVZ	11	19	11	22	13	22	11	19	15	21	11	23
tavg_warmest	14	22	13	24	16	25	14	22	18	25	14	26
tavg_coldest	-5	4,3	-5	6,1	-2	7,6	-2	6,1	-0,6	7,2	-6	8,1
tavg_range	16	21	16	22	16	20	15	18	15	22	16	25
tavg_vzrange	5,4	6,8	4,5	7,8	5,3	7,6	5,8	8,1	6,9	10,8	4,8	8,5
tavg_seasonality	50	144	45	144	40	95	45	112	40	89	39	175
DD5_kalJahr	1033	2719	965	3399	1355	3665	954	2929	1800	3615	1018	4016
vdi	1,9	3,3	1,7	4,8	2,2	5,9	1,9	3,6	2,9	5,6	2,4	7,1

A2: Karten der Kernverbreitungsgebiete

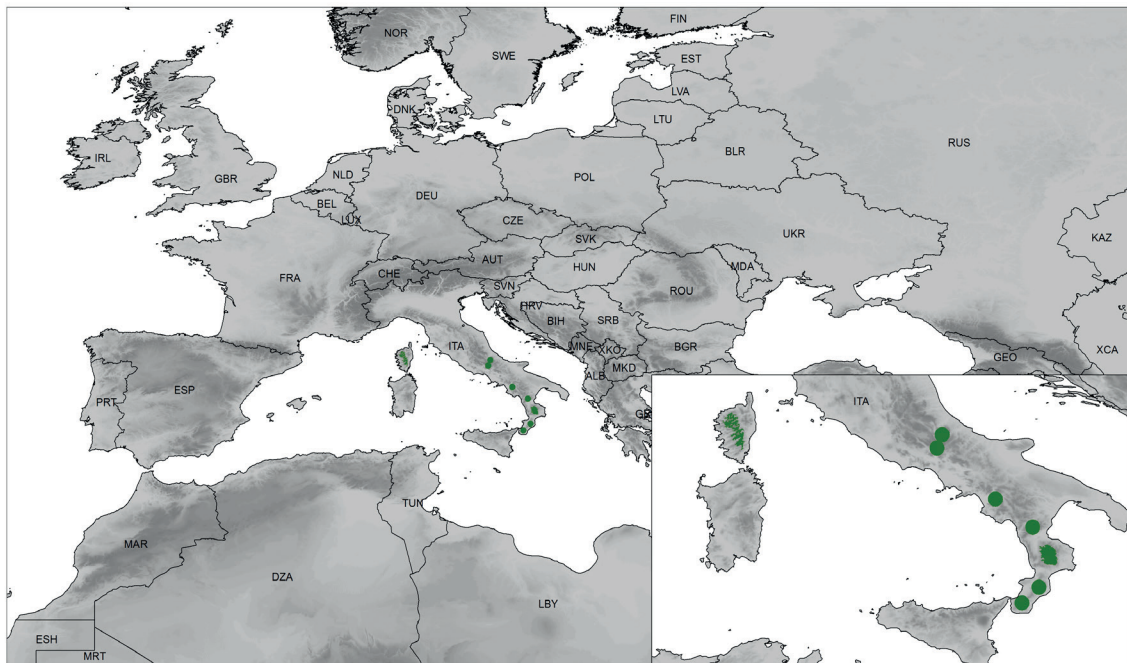
Verbreitung der Bulgarischen Tanne



■ flächenhafte Verbreitung ● kleinflächige oder punktuelle Verbreitung (Symbolgröße nicht repräsentativ für Fläche)

Die dargestellte Verbreitung fungiert als Basis für die Bewertung der klimatischen Eignung der Baumarten in Rheinland-Pfalz. Vorkommen in klimatischen Randbereichen wurden ausgenommen.

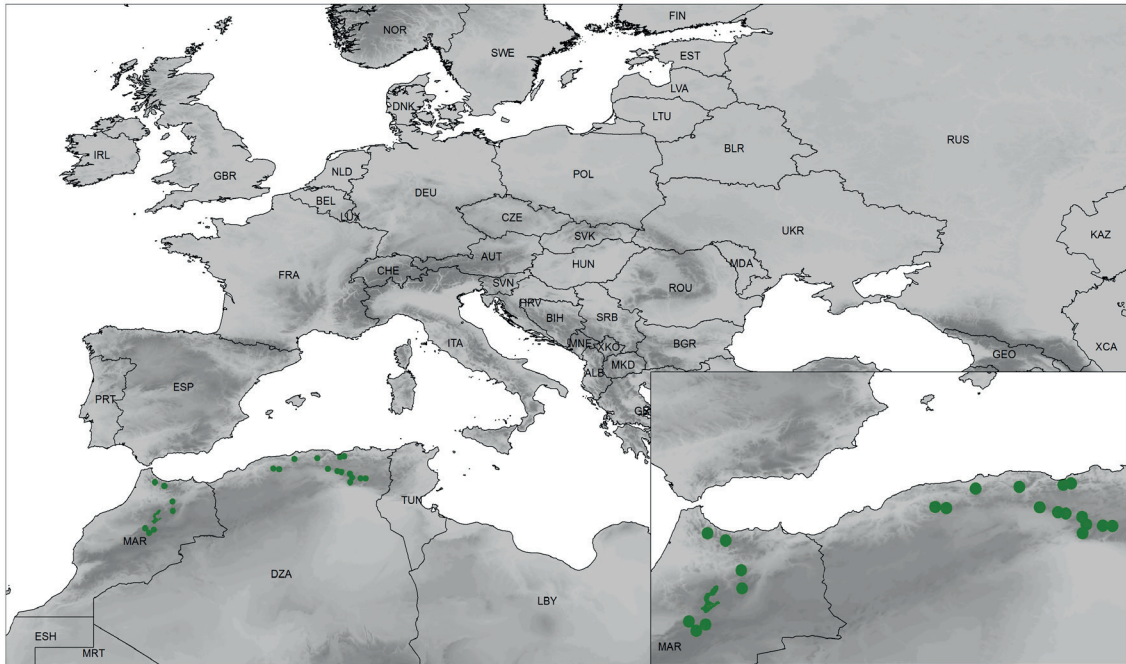
Verbreitung der Korsischen Schwarzkiefer



■ flächenhafte Verbreitung ● kleinflächige oder punktuelle Verbreitung (Symbolgröße nicht repräsentativ für Fläche)

Die dargestellte Verbreitung fungiert als Basis für die Bewertung der klimatischen Eignung der Baumarten in Rheinland-Pfalz. Vorkommen in klimatischen Randbereichen wurden ausgenommen.

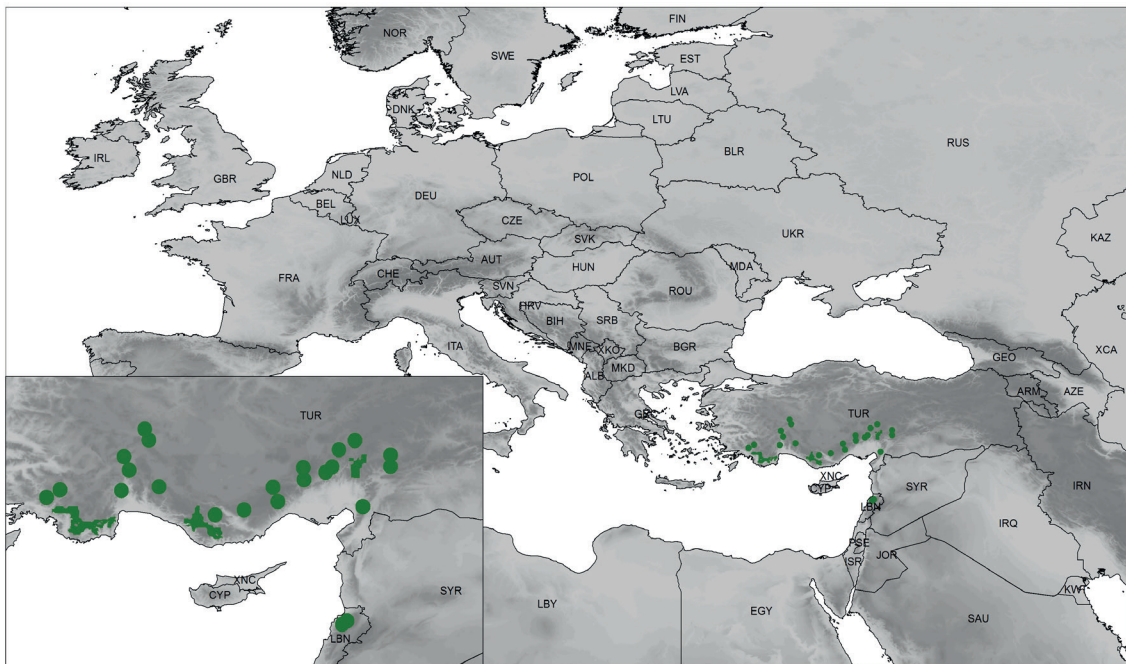
Verbreitung der Atlaszeder



flächenhafte Verbreitung
 kleinflächige oder punktuelle Verbreitung
 (Symbolgröße nicht repräsentativ für Fläche)

Die dargestellte Verbreitung fungiert als Basis für die Bewertung der klimatischen Eignung der Baumarten in Rheinland-Pfalz. Vorkommen in klimatischen Randbereichen wurden ausgenommen.

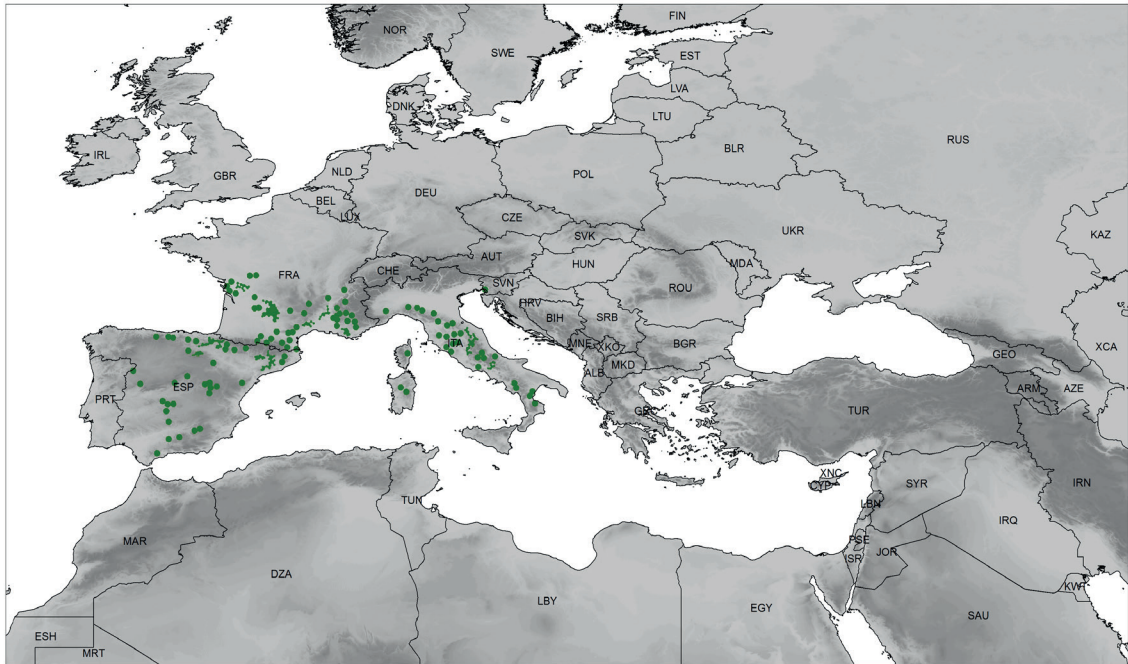
Verbreitung der Libanonzeder



flächenhafte Verbreitung
 kleinflächige oder punktuelle Verbreitung
 (Symbolgröße nicht repräsentativ für Fläche)

Die dargestellte Verbreitung fungiert als Basis für die Bewertung der klimatischen Eignung der Baumarten in Rheinland-Pfalz. Vorkommen in klimatischen Randbereichen wurden ausgenommen.

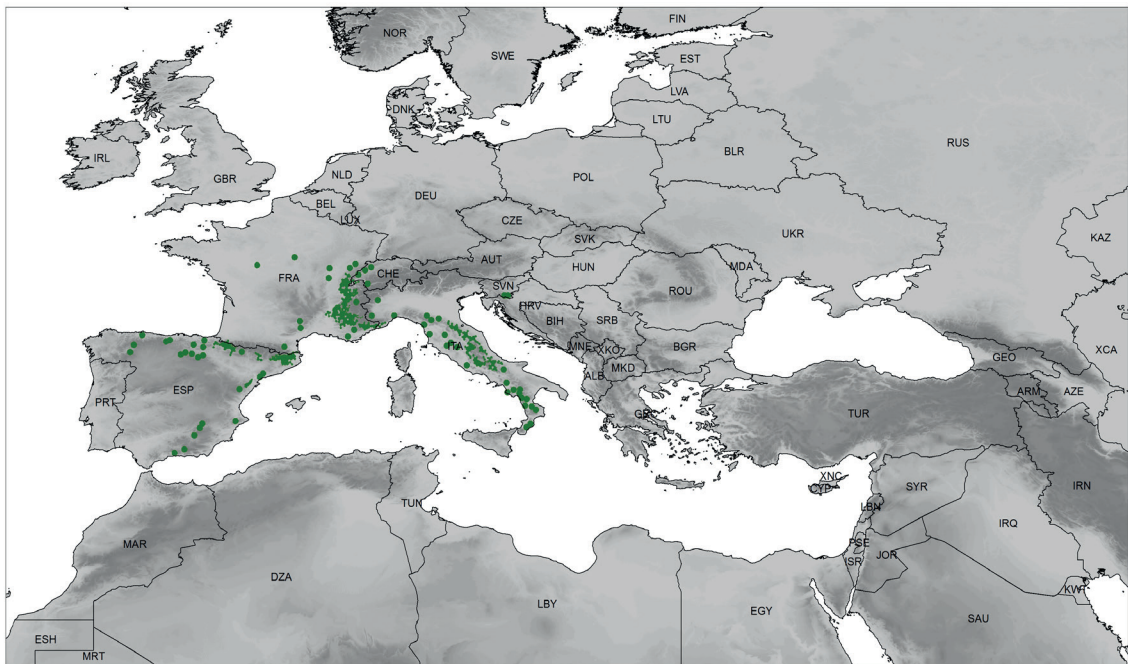
Verbreitung des Französischen Ahorns



■ flächenhafte Verbreitung ● kleinflächige oder punktuelle Verbreitung (Symbolgröße nicht repräsentativ für Fläche)

Die dargestellte Verbreitung fungiert als Basis für die Bewertung der klimatischen Eignung der Baumarten in Rheinland-Pfalz. Vorkommen in klimatischen Randbereichen wurden ausgenommen.

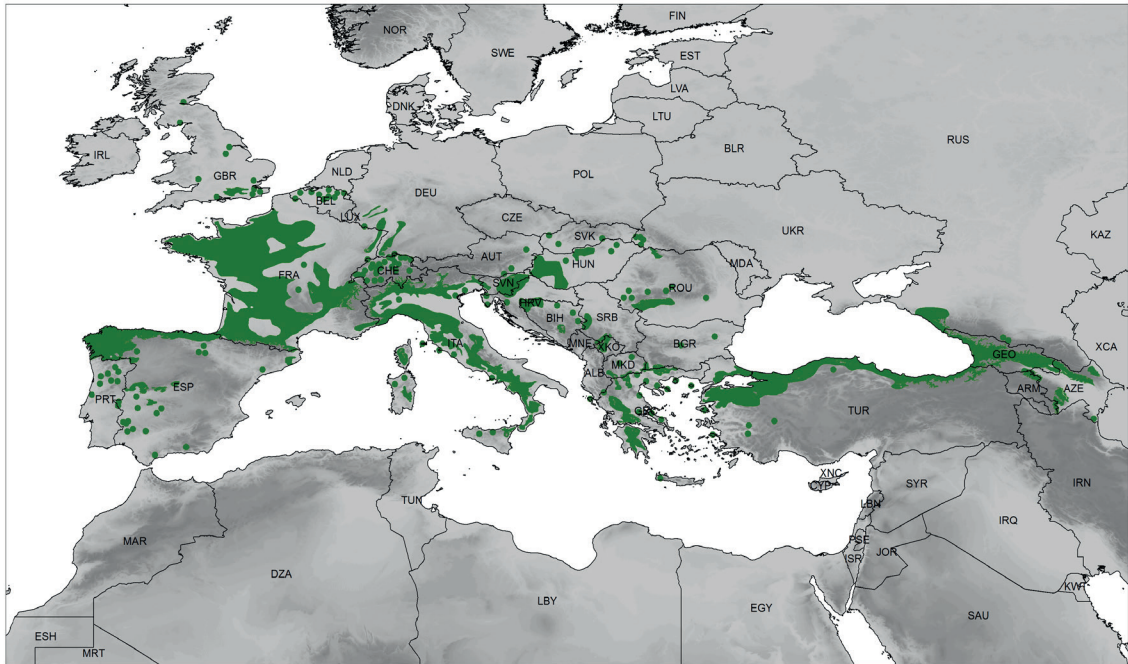
Verbreitung des Italienischen Ahorns



■ flächenhafte Verbreitung ● kleinflächige oder punktuelle Verbreitung (Symbolgröße nicht repräsentativ für Fläche)

Die dargestellte Verbreitung fungiert als Basis für die Bewertung der klimatischen Eignung der Baumarten in Rheinland-Pfalz. Vorkommen in klimatischen Randbereichen wurden ausgenommen.

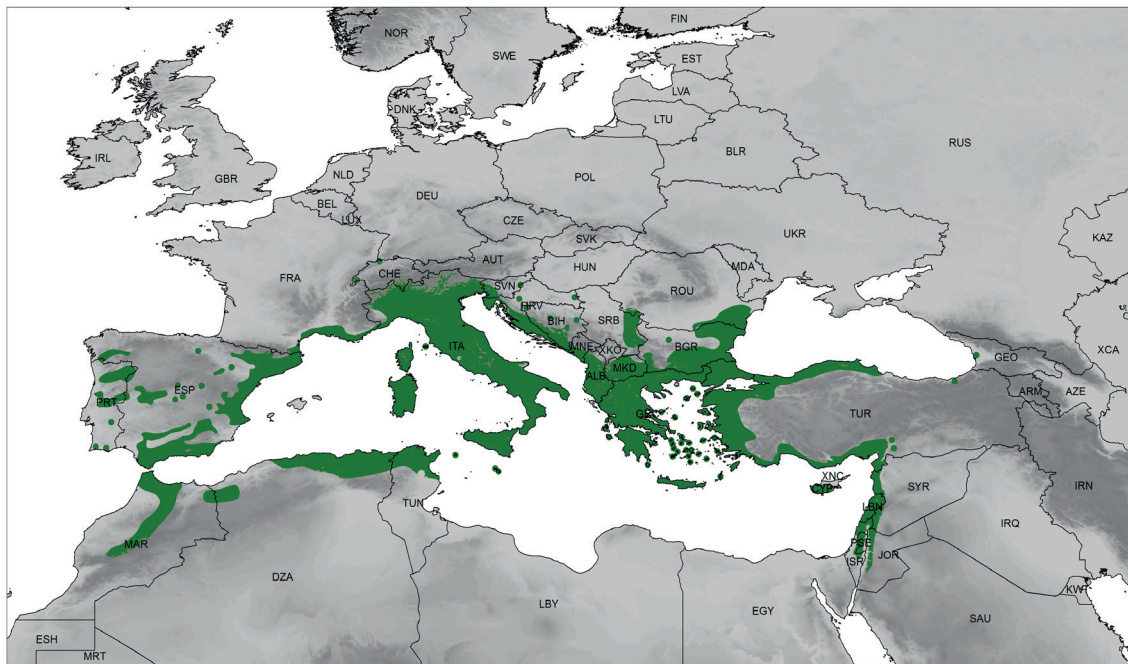
Verbreitung der Edelkastanie



■ flächenhafte Verbreitung
 ● kleinflächige oder punktuelle Verbreitung
 (Symbolgröße nicht repräsentativ für Fläche)

Die dargestellte Verbreitung fungiert als Basis für die Bewertung der klimatischen Eignung der Baumarten in Rheinland-Pfalz. Vorkommen in klimatischen Randbereichen wurden ausgenommen.

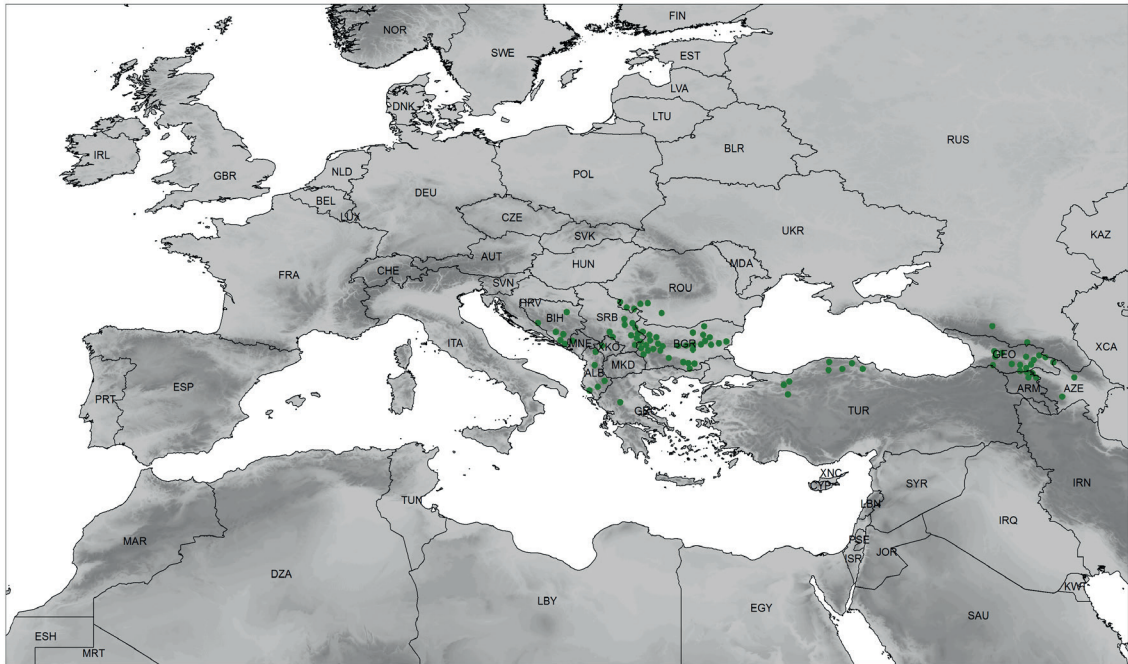
Verbreitung des Zürgelbaums



■ flächenhafte Verbreitung
 ● kleinflächige oder punktuelle Verbreitung
 (Symbolgröße nicht repräsentativ für Fläche)

Die dargestellte Verbreitung fungiert als Basis für die Bewertung der klimatischen Eignung der Baumarten in Rheinland-Pfalz. Vorkommen in klimatischen Randbereichen wurden ausgenommen.

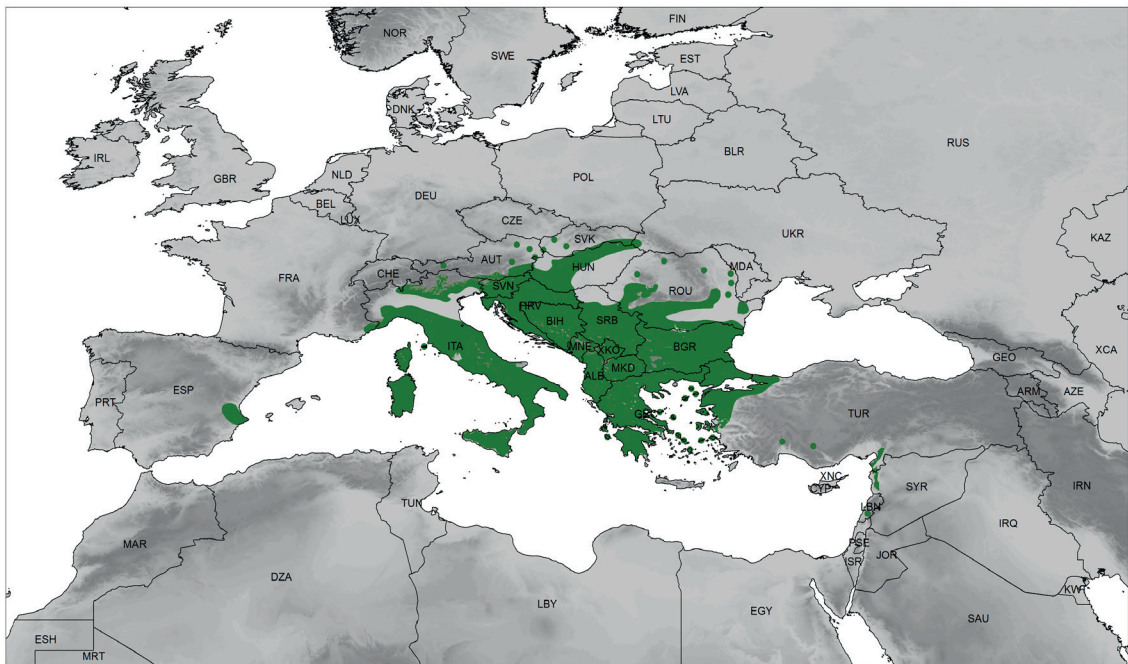
Verbreitung der Baumhasel



■ flächenhafte Verbreitung ● kleinflächige oder punktuelle Verbreitung (Symbolgröße nicht repräsentativ für Fläche)

Die dargestellte Verbreitung fungiert als Basis für die Bewertung der klimatischen Eignung der Baumarten in Rheinland-Pfalz. Vorkommen in klimatischen Randbereichen wurden ausgenommen.

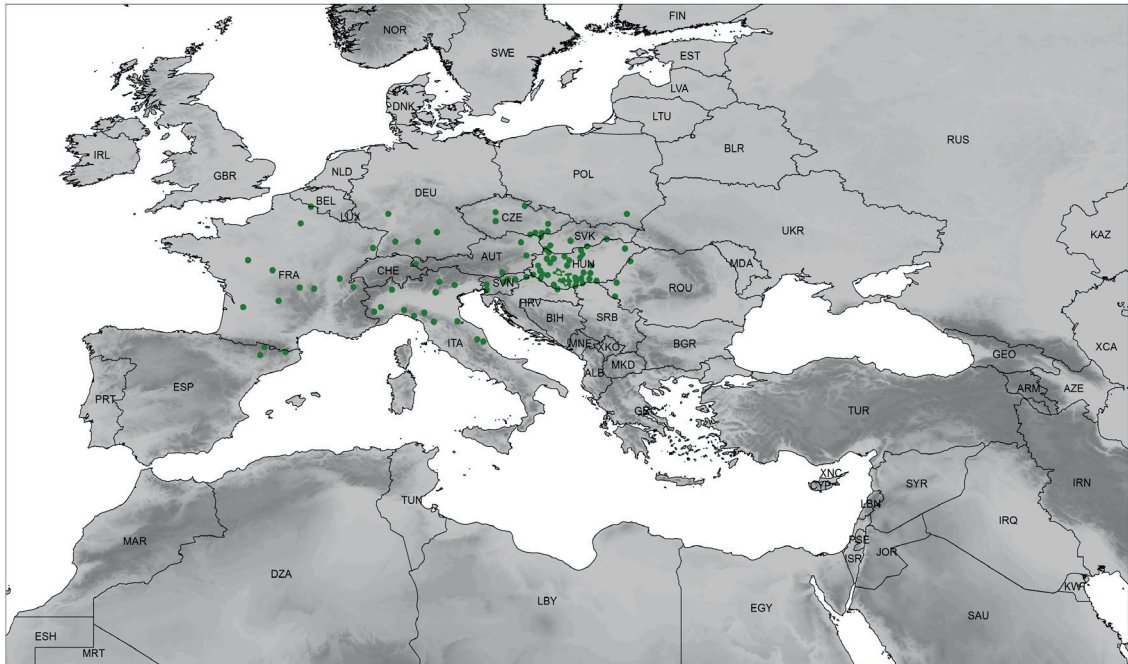
Verbreitung der Mannaesche



■ flächenhafte Verbreitung ● kleinflächige oder punktuelle Verbreitung (Symbolgröße nicht repräsentativ für Fläche)

Die dargestellte Verbreitung fungiert als Basis für die Bewertung der klimatischen Eignung der Baumarten in Rheinland-Pfalz. Vorkommen in klimatischen Randbereichen wurden ausgenommen.

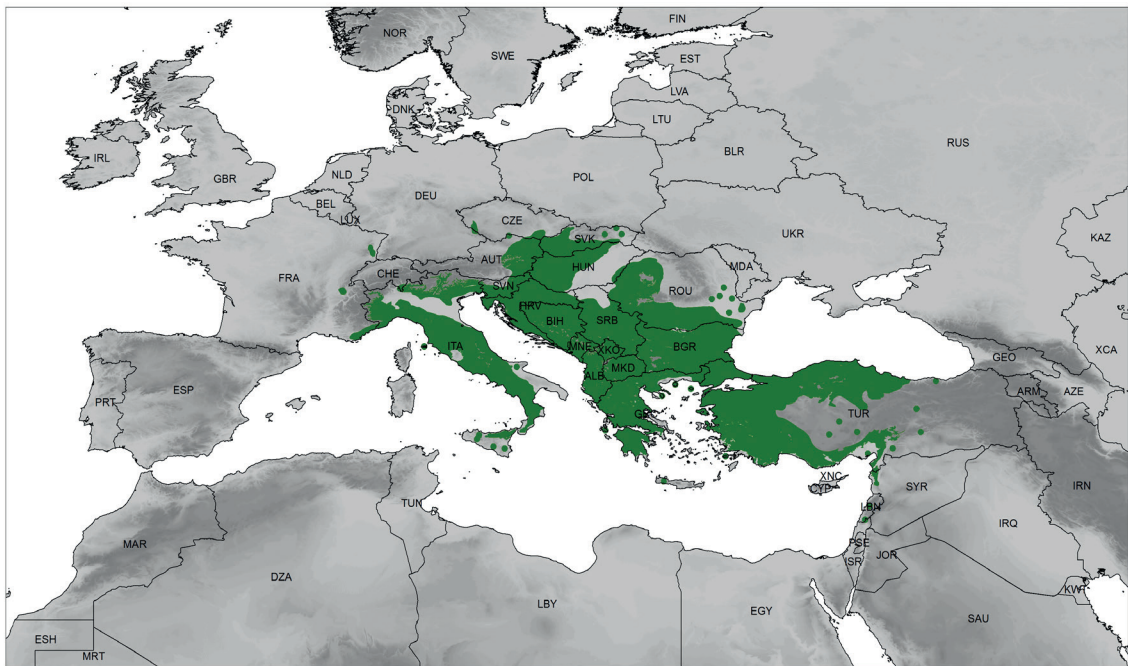
Verbreitung des Walnussbaums



■ flächenhafte Verbreitung ● kleinflächige oder punktuelle Verbreitung (Symbolgröße nicht repräsentativ für Fläche)

Die dargestellte Verbreitung fungiert als Basis für die Bewertung der klimatischen Eignung der Baumarten in Rheinland-Pfalz. Vorkommen in klimatischen Randbereichen wurden ausgenommen.

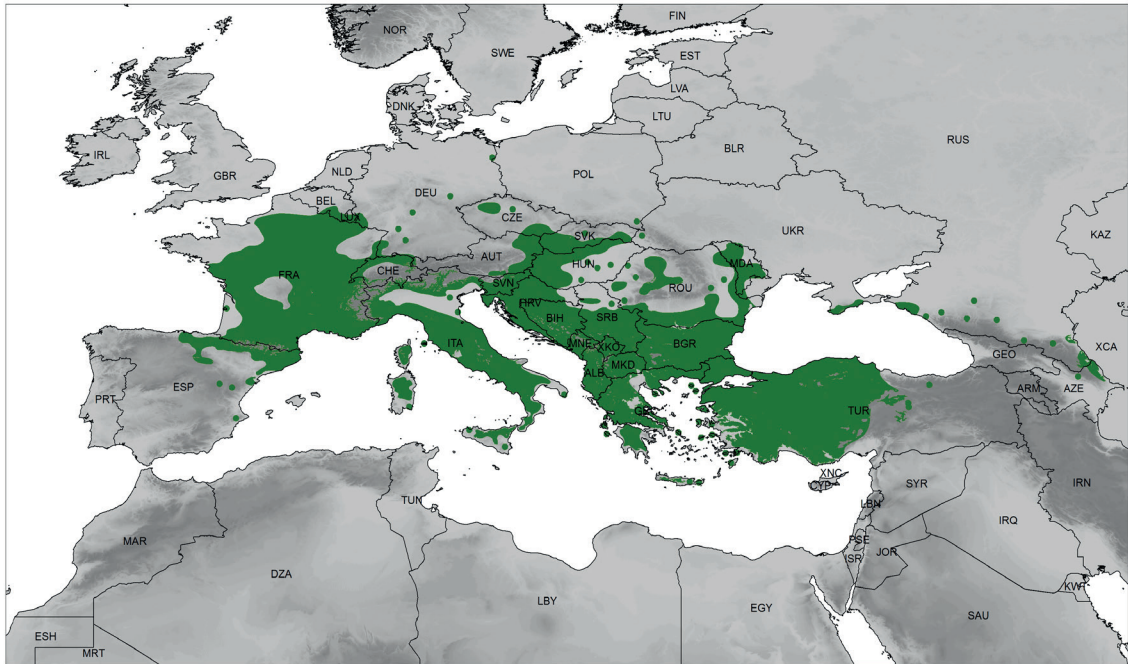
Verbreitung der Zerreihe



■ flächenhafte Verbreitung ● kleinflächige oder punktuelle Verbreitung (Symbolgröße nicht repräsentativ für Fläche)

Die dargestellte Verbreitung fungiert als Basis für die Bewertung der klimatischen Eignung der Baumarten in Rheinland-Pfalz. Vorkommen in klimatischen Randbereichen wurden ausgenommen.

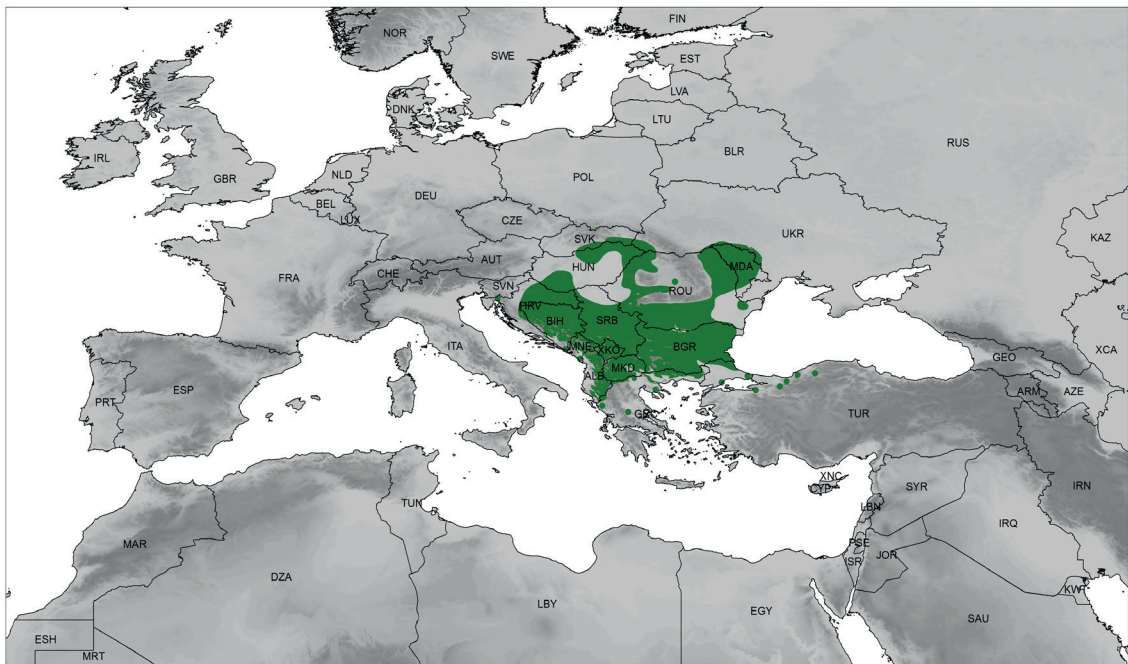
Verbreitung der Flaumeiche



■ flächenhafte Verbreitung ● kleinflächige oder punktuelle Verbreitung (Symbolgröße nicht repräsentativ für Fläche)

Die dargestellte Verbreitung fungiert als Basis für die Bewertung der klimatischen Eignung der Baumarten in Rheinland-Pfalz. Vorkommen in klimatischen Randbereichen wurden ausgenommen.

Verbreitung der Silberlinde



■ flächenhafte Verbreitung ● kleinflächige oder punktuelle Verbreitung (Symbolgröße nicht repräsentativ für Fläche)

Die dargestellte Verbreitung fungiert als Basis für die Bewertung der klimatischen Eignung der Baumarten in Rheinland-Pfalz. Vorkommen in klimatischen Randbereichen wurden ausgenommen.

Supplement (wird auf Anfrage zur Verfügung gestellt)

S1: alle Klimahüllen Gegenwart (1986-2015) und Zukunft nach RCP8.5 (2021-2050, 2071-2100)

S2: Einzeleignungskarten HYRAS (1971-2000, 1986-2015)

S3: Einzeleignungskarten RCP8.5 (2021-2050)

S4: Einzeleignungskarten RCP8.5 (2071-2100)

S5: Histogramme Höhenverteilung

S6: Eignungsbewertungen Gegenwart und Zukunft für weitere Baumarten aus dem südeuropäischen Kontakt- und Übergangsbereich

Bisher sind folgende Mitteilungen aus der
Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz
erschienen und stehen als Download zur Verfügung

88/2021	TRÖGER, ALBRECHT, BACK, HOHMANN Demographisches Großkarnivoren-Monitoring Rheinland-Pfalz - Monitoringjahr 2018 und 2019 ISSN 1610-7705
87/2020	AUTORENKOLLEKTIV Untersuchungen über die Ingetratrion der Schwarznuss (<i>Juglans Nigra</i> L.) in die Waldökosysteme der Pfälzer Rheinebene ISSN 1610-7705
86/2020	AUTORENKOLLEKTIV Die Hangbrücher des Hunsrücks ISSN 1610-7705
85/2020	KOPF Hypothese der Hanbruchgenese im südwestdeutschen Mittelgebirge Hunsrück anhand hydrologischer, pedologischer und geobotanischer Untersuchungen in der Region des Nationalpark Hunsrück-Hochwald ISSN 1610-7705
84/2018	HOHMANN, HETTICH, EBERT, HUCKSCHLAG Evaluierungsbericht zu den Auswirkungen einer dreijährigen Jagdruhe in der Kernzone „Quellgebiet der Wieslauter“ im Wildforschungsgebiet Pfälzerwald ISSN 1610-7705 nur als download http://www.fawf.wald-rlp.de/index.php?id=2601
83/2018	HUCKSCHLAG Demographisches Großkarnivoren-Monitoring in Rheinland-Pfalz – Monitoringjahr 2017 ISSN 1610-7705 nur als download http://www.fawf.wald-rlp.de/index.php?id=2601
82/2018	AUTORENKOLLEKTIV Biodiversität in Buchenwald-Naturwaldreservaten – 30 Jahre nutzungsfreie Waldentwicklung (Vögel, Pflanzen, Fledermäuse, Käfer, Moose, Flechten, Pilze, Baumstrukturen) ISSN 1610-7705 nur als download http://www.fawf.wald-rlp.de/index.php?id=2601
81/2017	HUCKSCHLAG Demographisches Großkarnivoren-Monitoring in Rheinland-Pfalz – Monitoringjahr 2016 ISSN 1610-7705 nur als download http://www.fawf.wald-rlp.de/index.php?id=2601

80/2017	In Bearbeitung
79//2016	BLOCK, DIELER, GAUER, GREVE, MOSHAMMER, SCHUCK, SCHWAPPACHER, WUNN Gewährleistung der Nachhaltigkeit der Nährstoffversorgung bei der Holz- und Biomasse- nutzung im rheinland-pfälzischen Wald ISSN 1610-7705 nur als download http://www.fawf.wald-rlp.de/index.php?id=2601
78/2016	BLOCK, GREVE, SCHRÖCK, ZUM HINGSTE Mangantoxizität bei Douglasie ISSN 1610-7705 nur als download http://www.fawf.wald-rlp.de/index.php?id=2601
77/2016	HUCKSCHLAG Demographisches Großkarnivoren-Monitoring in Rheinland-Pfalz – Monitoringjahr 2015 ISSN 1610-7705 nur als download http://www.fawf.wald-rlp.de/index.php?id=2601
76/2016	GREVE Nährstoffversorgung rheinland-pfälzischer Wälder ISSN 1610-7705 nur als download http://www.fawf.wald-rlp.de/index.php?id=2601
75/2016	HUCKSCHLAG Die Großkarnivoren in Rheinland-Pfalz – Hinweise seit Ausrottung der Großkarnivoren bis zum Monitoringjahr 2014 ISSN 1610-7705 nur als download http://www.fawf.wald-rlp.de/index.php?id=2601
74/2015	SEGATZ (Hrsg) Die Edelkastanie am Oberrhein – Aspekte ihrer Ökologie, Nutzung und Gefährdung aus dem EU Interreg IV a Oberrhein-Projekt ISSN 1610-7705 nur als download http://www.fawf.wald-rlp.de/index.php?id=2601
73/2015	GREVE Langfristige Auswirkungen der Waldkalkungen auf den Stoffhaushalt ISSN 1610-7705 nur als download http://www.fawf.wald-rlp.de/index.php?id=2601
72/2012	KARL, BLOCK, SCHULTZE UND SCHERZER Untersuchungen zu Wasserhaushalt und Klimawandel an ausgewählten Forstlichen Mo- nitoringflächen in Rheinland-Pfalz ISSN 1610-7705 nur als download http://www.fawf.wald-rlp.de/index.php?id=2601
71/2012	KARL, BLOCK, SCHULZE UND SCHERZER Wasserhaushaltsuntersuchungen im Rahmen des Forstlichen Umweltmonitorings und bei waldbaulichen Versuchen in Rheinland-Pfalz ISSN 1610-7705 nur als download http://www.fawf.wald-rlp.de/index.php?id=2601

70/2012	BLOCK UND GAUER Waldbodenzustand in Rheinland-Pfalz ISSN 1610-7705
69/2011	MAURER UND HAASE (HRSG.) Holzproduktion auf forstgenetischer Grundlage. Tagungsbericht 28. Internationale Tagung ARGE Forstgenetik und Forstplanzenzüchtung, 4.-6. November 2009 in Treis-Karden (Mosel)
68/2009	ENGELS, JOCHUM, KRUG UND SEEGMÜLLER (HRSG.) Käferschäden im Buchenholz: Einbußen und Verwendungsoptionen ISSN 1610-7705
67/2009	PHAN HOANG DONG (HRSG.) Zum Anbau und Wachstum von Vogelkirsche und Birke ISSN 0931-9662
66/2008	MAURER UND HAASE (HRSG.) Walnuss-Tagung 2008 ISSN 1610-7705
65/2008	BLOCK (HRSG.) Forstliche Forschung Grundlage für eine zukunftsfähige Forstwirtschaft ISSN 1610-7705
64/2007	SCHÜLER, GELLWEILER UND SEELING (HRSG.) Dezentraler Wasserrückhalt in der Landschaft durch vorbeugende Maßnahmen der Wald- wirtschaft, der Landwirtschaft und im Siedlungswesen ISSN 1610-7705
63/2007	DONG (Hrsg.) Eiche im Pfälzerwald ISSN 0931-9662
62/2007	BÜCKING, MOSHAMMER UND ROEDER Wertholzproduktion bei der Fichte mittels kronenspannungsarm gewachsener Z-Bäume ISSN 0931-9622
61/2007	Jahresbericht 2006 ISSN 1610-7705 ISSN 1610-7713
60/2006	BLOCK UND SCHÜLER (HRSG.) Stickstoffbelastung der rheinland-pfälzischen Wälder; Erschließung von Sekundärrohstoffen als Puffersubstanzen für Bodenmaßnahmen im Wald ISSN 1610-7705
59/2006	Petercord und Block (Hrsg.) Strategien zur Sicherung von Buchenwäldern ISSN 0931-9662

58/2006	Jahresbericht 2005 ISSN 0931-9662 ISSN 0936-6067
57/2005	SEEGMÜLLER (HRSG.) Die Forst-, Holz- und Papierwirtschaft in Rheinland-Pfalz ISSN 0931-9662
56/2005	Jahresbericht 2004 ISSN 0931-9662 ISSN 0936-6067
55/2005	DONG (HRSG.) Zum Aufbau und Wachstum der Douglasie ISSN 0931-9662
54/2004	DONG (HRSG.) Kiefer im Pfälzerwald ISSN 0931-9662
53/2004	Jahresbericht 2003 issn 0931-9662 issn 0936-6067
52/2004	MAURER (HRSG.) Zwei Jahrzehnte Genressourcen-Forschung in Rheinland-Pfalz ISSN 1610-7705
51/2003	Jahresbericht 2002 issn 0931-9662 issn 0936-6067
50/2003	MAURER (HRSG.) Ökologie und Waldbau der Weißtanne – Tagungsbericht zum 10. Internationalen IUFRO Tannensymposium am 16-20. September 2002 an der FAWF in Trippstadt ISSN 1610-7705
49/2002	MAURER (HRSG.) Vom genetischen Fingerabdruck zum gesicherten Vermehrungsgut: Untersuchungen zur Erhaltung und nachhaltigen Nutzung forstlicher Genressourcen in Rheinland-Pfalz ISSN 1610-7705
48/2002	Jahresbericht 2001 ISSN 0931-9662 ISSN 0936-6067
47/2001	Jahresbericht 2000 ISSN 0931-9662 ISSN 0936-6067

46/1999	Jahresbericht 1999 ISSN 0931-9662 ISSN 0936-6067
45/1999	DELB UND BLOCK Untersuchungen zur Schwammspinnerkalamität von 1992–1994 in Rheinland-Pfalz ISSN 0931-9662
44/1998	Jahresbericht 1998 ISSN 0931-9662 ISSN 0936-6067
43/1997	Jahresbericht 1997 ISSN 0931-9662 ISSN 0936-6067
42/1997	BÜCKING, EISENBARTH UND JOCHUM Untersuchungen zur Lebendlagerung von Sturmwurfholz der Baumarten Fichte, Kiefer, Douglasie und Eiche ISSN 0931-9662
41/1997	MAURER UND TABEL (HRSG.) Stand der Ursachenforschung zu Douglasienschäden – derzeitige Empfehlungen für die Praxis ISSN 0931-9662
40/1997	SCHRÖCK (HRSG.) Untersuchungen an Waldökosystemdauerbeobachtungsflächen in Rheinland-Pfalz – Ta- gungsbericht zum Kolloquium am 04. Juni 1996 in Trippstadt - ISSN 0931-9662
39/1997	Jahresbericht 1996 ISSN 0931-9662 ISSN 0936-6067
38/1996	BALCAR (HRSG.) Naturwaldreservate in Rheinland-Pfalz: Erste Ergebnisse aus dem Naturwaldreservat Rotenberghang im Forstamt Landstuhl ISSN 0931-9662
37/1996	HUNKE Differenzierte Absatzgestaltung im Forstbetrieb - Ein Beitrag zu Strategie und Steuerung der Rundholzvermarktung ISSN 0931-9662
36/1996	Jahresbericht 1995 ISSN 0931-9662 ISSN 0936-6067

35/1995	BLOCK, BOPP, BUTZ-BRAUN UND WUNN Sensitivität rheinland-pfälzischer Waldböden gegenüber Bodendegradation durch Luftschadstoffbelastung ISSN 0931-9662
34/1995	MAURER UND TABEL (HRSG.) Genetik und Waldbau unter besonderer Berücksichtigung der heimischen Eichenarten ISSN 0931-9662
33/1995	EISENBARTH Schnittholzeigenschaften bei Lebendlagerung von Rotbuche (<i>Fagus sylvatica</i> L.) aus Wintersturmwurf 1990 in Abhängigkeit von Lagerart und Lagerdauer ISSN 0931-9662
32/1995	AUTORENKOLLEKTIV Untersuchungen an Waldökosystem-Dauerbeobachtungsflächen in Rheinland-Pfalz ISSN 0931-9662
31/1995	Jahresbericht 1994 ISSN 0931-9662 ISSN 0936-6067
30/1994	SCHÜLER Ergebnisse forstmeteorologischer Messungen für den Zeitraum 1988 bis 1992 ISSN 0931-9662
29/1994	FISCHER Untersuchung der Qualitätseigenschaften, insbesondere der Festigkeit von Douglasien-Schnittholz (<i>Pseudotsuga Menziesii</i> (Mirb.)Franco), erzeugt aus nicht-wertgeästeten Stämmen ISSN 0931-9662
28/1994	SCHRÖCK Kronenzustand auf Dauerbeobachtungsflächen in Rheinland-Pfalz - Entwicklung und Einflußfaktoren - ISSN 0931-9662
27/1994	OESTEN UND ROEDER Zur Wertschätzung der Infrastrukturleistungen des Pfälzerwaldes ISSN 0931-9662
26/1994	Jahresbericht 1993 ISSN 0931-9662 ISSN 0936-6067
25/1994	WIERLING Zur Ausweisung von Wasserschutzgebieten und den Konsequenzen für die Forstwirtschaft am Beispiel des Pfälzerwaldes ISSN 0931-9662
24/1993	BLOCK Verteilung und Verlagerung von Radiocäsium in zwei Waldökosystemen in Rheinland-Pfalz insbesondere nach Kalk- und Kaliumdüngungen ISSN 0931-9662

23/1993	HEIDINGSFELD Neue Konzepte zum Luftbildeinsatz für großräumig permanente Waldzustandserhebungen und zur bestandesbezogenen Kartierung flächenhafter Waldschäden ISSN 0931-9662
22/1993	Jahresbericht 1992 ISSN 0931-9662 ISSN 0936-6067
21/1992	AUTORENKOLLEKTIV Der vergleichende Kompensationsversuch mit verschiedenen Puffersubstanzen zur Minderung der Auswirkungen von Luftschadstoffeinträgen in Waldökosystemen - Zwischenergebnisse aus den Versuchsjahren 1988 - 1991 - ISSN 0931-9662
20/1992	Jahresbericht 1991 ISSN 0931-9662 ISSN 0936-6067
19/1991	AUTORENKOLLEKTIV Untersuchungen zum Zusammenhang zwischen Sturm- und Immissionschäden im Vorderen Hunsrück - "SIMS" - ISSN 0931-9662
18/1991	SCHÜLER, BUTZ-BRAUN UND SCHÖNE Versuche zum Bodenschutz und zur Düngung von Waldbeständen ISSN 0931-9662
17/1991	BLOCK, BOPP, GATTI, HEIDINGSFELD UND ZOTH Waldschäden, Nähr- und Schadstoffgehalte in Nadeln und Waldböden in Rheinland-Pfalz ISSN 0931-9662
16/1991	BLOCK, BOCKHOLT, BORCHERT, FINGERHUT, HEIDINGSFELD UND SCHRÖCK Immissions-, Wirkungs- und Zustandsuntersuchungen in Waldgebieten von Rheinland-Pfalz - Sondermeßprogramm Wald, Ergebnisse 1983-1989 ISSN 0931-9662
15/1991	Jahresbericht 1990 ISSN 0931-9662 ISSN 0936-6067
14/1990	BLOCK Ergebnisse der Stoffdepositionsmessungen in rheinland-pfälzischen Waldgebieten 1984 - 1989 ISSN 0931-9662
13/1990	SCHÜLER Der kombinierte Durchforstungs- und Düngungsversuch Kastellaun - angelegt 1959 - heute noch aktuell ? ISSN 0931-9662

12/1990	JAHRESBERICHT 1989 ISSN 0931-9662 ISSN 0936-6067
11/1989	BLOCK, DEINET, HEUPEL, ROEDER UND WUNN Empirische, betriebswirtschaftliche und mathematische Untersuchungen zur Wipfelköpfung der Fichte ISSN 0931-9662
10/1989	HEIDINGSFELD Verfahren zur luftbildgestützten Intensiv-Waldschadenserhebung in Rheinland-Pfalz ISSN 0931-9662
9/1989	Jahresbericht 1988 ISSN 0936-6067
8/1988	GERECKE Zum Wachstumsgang von Buchen in der Nordpfalz ISSN 0931-9662
7/1988	BEUTEL UND BLOCK Terrestrische Parkgehölzschadenserhebung (TPGE 1987) ISSN 0931-9662
6/1988	Jahresbericht 1987 ISSN 0931-9662
5/1988	Die Forstliche Versuchsanstalt Rheinland-Pfalz im Dienste von Wald und Forstwirtschaft - Reden anlässlich der Übergabe des Schlosses Trippstadt als Dienstsitz am 10.04.1987 - ISSN 0931-9662
4/1987	BEUTEL UND BLOCK Terrestrische Feldgehölzschadenserhebung (TFGE 1986) ISSN 0931-9662
3/1987	BLOCK, FRAUDE UND HEIDINGSFELD Sondermeßprogramm Wald (SMW) ISSN 0931-9662
2/1987	BLOCK UND STELZER Radioökologische Untersuchungen in Waldbeständen ISSN 0931-9662
1/1987	Jahresbericht 1984-1986 ISSN 0931-9662



