

UNTERSUCHUNGEN ZUM EINFLUSS DES KLIMAS AUF DAS WACHSTUM DER HAUPTBAUMARTEN IN DEUTSCHLAND

DISSERTATION

zur Erlangung des Doktorgrades (Dr. forest.) der Fakultät für Forstwissenschaften
und Waldökologie der Georg-August-Universität Göttingen

vorgelegt von

Dipl. Biologe Manuel Punzet
geboren am 20.07.1974 in Volkmarsen

Göttingen, Januar 2020

1. Gutachter: Prof. Dr. Achim Dohrenbusch
Abteilung Waldbau und Waldökologie der gemäßigten Zonen
Fakultät für Forstwissenschaften und Waldökologie
Georg-August-Universität Göttingen

2. Gutachter: Prof. Dr. Jürgen Nagel
Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt

Tag der mündlichen Prüfung: 19. August 2020

„Das Leben ist zu kostbar, um es dem Schicksal zu überlassen.“
Walter Moers

INHALT

Danksagung	V
Zusammenfassung	VI
Abstract	X
1 Einleitung	1
1.1 Wald und Klima	1
1.2 Zielsetzung der Arbeit	2
1.3 Stand der Forschung	4
1.3.1 Bundeswaldinventur	4
1.3.2 Baumarten im Klimawandel.....	5
1.4 Klimatische und standörtliche Einordnung der Hauptwirtschaftsbaumarten....	10
2 Material und Methoden	16
2.1 Datengrundlage.....	16
2.1.1 Klimadaten	16
2.2 BWI-Daten und Durchmesserzuwachs.....	21
2.2.1 Berechnung der Durchmesserzuwächse aus den BWI-Daten	22
2.3 Datenselektion	23
2.3.1 Räumliche Selektion.....	23
2.3.2 Plausibilität und Selektion	23
2.3.3 Minderung des Effekts von Co-Variablen	24
2.3.4 Überprüfung der statistischen Verteilung.....	28
2.3.5 Vergleich der Durchmesserzuwächse beider Zuwachsperioden.....	29
2.4 Zusammenführung der Waldinventur-, Klima- und Bodendaten	29
2.5 Datenanalyse.....	31
2.5.1 Deskriptive Analysen der Klima und Zuwachsdaten.....	31
2.5.2 Klimaabhängige Zuwachsreaktionen der Hauptbaumarten.....	32
2.5.3 Relative Abweichung der Zuwächse vom mittleren Zuwachs.....	33
2.5.4 Nutzbare Feldkapazität	34
2.5.5 Räumliche Zuwachsanalyse	36
2.5.6 Analyse der Zuwachsdaten auf Basis der Ergebnisse der Clusteranalysen	38
2.5.7 Multifaktorielle Regressionsanalyse	39

3	Ergebnisse	45
3.1	Deskriptive Analyse der Klima und Zuwachsdaten	45
3.1.1	Klima und Klimaveränderung auf dem Gebiet der Waldinventuren.....	45
3.1.2	Klima und Klimaveränderungen der Inventurtrakte unter Berücksichtigung der Baumarten	51
3.1.3	Klimahüllen der Inventurtrakte	55
3.1.4	Jährlicher Durchmesserzuwachs der Hauptbaumarten	58
3.2	Untersuchungen der Zuwachsreaktion der Hauptbaumarten auf Klima und Klimaveränderungen	59
3.2.1	Klimaabhängige Zuwachsreaktion der Hauptbaumarten.....	59
3.2.2	Vergleich humider und arider Standorte.....	65
3.2.3	Zuwachsreaktionen unter Berücksichtigung des Klimas und der nutzbaren Feldkapazität des effektiven Wurzelraumes (nFKWe).....	67
3.2.4	Hotspot-Analyse.....	69
3.2.5	Verteilung der High- und LowCluster.....	75
3.2.6	Klimaabhängige Zuwachsreaktionen der High- und LowCluster	76
3.3	Multifaktorielle Regressionsanalyse	81
4	Diskussion	83
4.1	Deskriptive Analyse der Klima und Zuwachsdaten	83
4.1.1	Klima	83
4.1.2	Klimahüllen der Inventurtrakte	85
4.1.3	Durchmesserzuwachs	86
4.2	Klimaabhängige Zuwachsreaktion	86
4.3	Vergleich humider und arider Standorte	90
4.3.1	Zuwachsreaktionen unter Berücksichtigung des Klimas und der Feldkapazität	92
4.4	Hotspotanalyse.....	94
4.5	Multifaktorielle Regressionsanalyse	97
4.6	Eignung und Grenzen der Datenbasis und der Methoden	98
4.6.1	Klimadaten	98
4.6.2	Zielvariablen und BWI-Daten.....	101

4.6.3	Hotspotanalyse	103
4.6.4	Multifaktorielle Regressionsanalyse	104
5	Fazit und Ausblick.....	106
6	Verzeichnisse	108
6.1	Literaturverzeichnis.....	108
6.2	Abkürzungsverzeichnis.....	121
6.3	Abbildungsverzeichnis.....	122
6.4	Tabellenverzeichnis	128
7	Anhang.....	130
	Lebenslauf	139
	Eidesstattliche Erklärung.....	141



DANKSAGUNG

Die vorliegende Arbeit konnte nur durch die großartige Unterstützung und vielfältige Mithilfe zahlreicher Menschen gelingen.

Mein erster Dank geht an meinen Doktorvater Prof. Dr. Achim Dohrenbusch, der als stets herzlicher Mentor die Betreuung des Projektes übernahm und in allen Phasen der Arbeit ein offenes Ohr für meine fachlichen und persönlichen Belange hatte. Weiterhin möchte ich mich sehr herzlich bei Herrn Prof. Dr. Jürgen Nagel bedanken, der sich bereit erklärt hat, diese Arbeit zu begutachten.

Ein großes Dankeschön geht an die gesamte Abteilung Waldbau und Waldökologie der gemäßigten Zonen, die mich herzlich in ihre Reihen aufgenommen hat. Ich habe mich bei Euch immer wohl gefühlt.

Ein extra Danke geht an meine Kollegen*innen Michela Dölle, Nils Hoffman, Kirsten Hoewler und Ray Wollenzien. Ihr habt mich nicht nur großartig bei meiner Promotion unterstützt, sondern wart auch maßgeblich verantwortlich, dass die Universität zu einem liebenswerten Ort für mich geworden ist. Peter Schall und Peter Annighöfer danke ich, dass Ihr euch Zeit für meine Statistikfragen genommen habt, obwohl ihr selbst stets gut zu tun hattet. Dr. Sabine Ammer danke ich für die Unterstützung bei bodenkundlichen Fragen.

Karl-Heinz Heine, Silke Marks, Andreas Parth, Michael Unger und Ulrike Westphal sorgten dafür, dass alle elektrotechnischen, bürokratischen, computerspezifischen, koffeinhaltigen und analytischen Angelegenheiten reibungslos funktionierten. Es ist schön, solche kompetenten und herzlichen Ansprechpartner zu kennen. Vielen Dank an Euch. Auch aus dem familiären und freundschaftlichen Umfeld habe ich viel Unterstützung erhalten. Riesen Dank an Michael Punzet und Gero Lenhardt für Korrekturlesen und wertvolle Kritik.

Jasmin hat mich sicherlich am intensivsten während der Bearbeitung dieser Arbeit begleitet und die zahlreichen Höhen und Tiefen mit mir durchgestanden. Ich danke Dir von ganzem Herzen, dass du mich unablässig motiviert und zum Durchhalten genötigt hast. Dafür liebe ich dich!

ZUSAMMENFASSUNG

Seit dem 20. Jahrhundert verändert sich das globale Klima in einer bislang nicht gekannten Geschwindigkeit. Für Mitteleuropa bedeutet dieser Wandel eine stetige Zunahme der mittleren Jahrestemperaturen, veränderte Niederschlagsverhältnisse sowie eine zunehmende Frequenz und Intensivierung von Witterungsextremen wie Hitzewellen und Dürreperioden. Dadurch verschieben sich auch die ökologischen Rahmenbedingungen für unsere Wälder. Vielerorts sind die Reaktionen auf den Klimawandel bereits erkennbar. Sie reichen von regionalen Produktionsrückgängen und Vitalitätsverlusten über Verschiebungen in der Artenzusammensetzung bis hin zum großflächigen Absterben von Bäumen.

Um die ökologischen, wirtschaftlichen und soziokulturellen Funktionen der Wälder zu erhalten und Lösungen für einen an die Veränderungen angepassten Waldumbau zu finden, ist es erforderlich die Prozesse des Klimawandels in den Wäldern zu verstehen. In den vergangenen Jahren haben zahlreiche Studien dieses Phänomen mit unterschiedlichen Ansätzen untersucht. Häufig beziehen sich diese Studien auf lokale Gebiete oder berücksichtigen aufgrund des hohen Aufwands nur wenige Bäume. Die drei Bundeswaldinventuren von 1986-1989 (BW1), 2001-2002 (BW2) und 2011-2012 (BW3) liefern einen umfassenden Datensatz für das gesamte Bundesgebiet über einen Zeitraum von über 25 Jahren. Bislang wurden diese Daten zur Analyse von klimabedingten Wachstumsuntersuchungen jedoch noch wenig genutzt.

Ziel dieser Arbeit war es herauszufinden, ob Waldinventurdaten ein geeignetes Medium darstellen, um klimabedingte Zuwachsreaktionen für die Hauptwirtschaftsbaumarten Gemeine Fichte (*Picea abies*, (L.) H.Karst.), Rot-Buche (*Fagus sylvatica*, L.), Wald-Kiefer (*Pinus sylvestris*, L.), Trauben-Eiche (*Quercus petraea*, L.), Stiel-Eiche (*Quercus robur*, L.) und Weiß-Tanne (*Abies alba*, Mill.) abzuleiten, anhand derer praktikable Aussagen bezüglich ihres Anbaurisikos und der Zukunftssicherheit getroffen werden können. Für die Zuwachsanalysen diente der jährliche Durchmesserzuwachs als Proxy für die Beurteilung der Klimasensitivität. Die Berechnungen erfolgten auf Basis der Erhebungen der drei Bundeswaldinventuren für jeweils zwei Zuwachsperioden (P1: 1986-2001, P2: 2003-2011). Das Untersuchungsgebiet bezog sich auf die alten Bundesländer in Deutschland, da

zum Zeitpunkt der BWI1 keine Inventurdaten für die Neuen Bundesländer vorlagen. Als Klimafaktoren wurden Mitteltemperatur (°C), Niederschlagssumme (mm) und *de Martonne Index (dMI)* für die forstliche Vegetationsperiode (IV-IX) verwendet. Auf Grundlage des *de Martonne Index* wurde ein weiterer Klimaindex, die *relative Häufigkeit von Trockenmonaten (rHTM)* abgeleitet. Dieser Klimaindex berücksichtigt zusätzlich saisonale Klimaaspekte. Der Index basiert auf der Anzahl der Trockenmonate ($dMI < 20$) während der drei Untersuchungsperioden.

Der Ansatz verfolgte eine allgemeine Analyse der klimabedingten Zuwachsreaktion sowie eine räumliche Betrachtung dieser Beziehung. Neben den oben genannten Klimavariablen wurden weitere standörtliche und strukturelle Faktoren wie Hangneigung, nutzbare Feldkapazität des effektiven Wurzelraumes und Baumalter in die Untersuchungen einbezogen.

Die **Klimaveränderungen** der beiden Zuwachsperioden bezogen sich auf einen fünfzehn jährigen Referenzzeitraum vor der ersten Waldinventur (P0 1971-1985). Auf den Trakten aller sechs Hauptbaumarten war eine Zunahme der Temperatur von 0.6 °C pro Zuwachsperiode im Vergleich zur Periode vor den Inventuren (1971 bis 1985) zu beobachten. Die Veränderung betraf nahezu das komplette Untersuchungsgebiet. Der Niederschlag nahm über den Untersuchungszeitraum nur geringfügig zu. Allerdings war die Niederschlagsverteilung in den Perioden sehr heterogen. Auch der *de Martonne Index* veränderte sich auf den meisten Standorten nur wenig. Der für trockenheitssensitive Arten kritische Wert von 25 wurde nur an drei Standorten unterschritten. Die relative Häufigkeit von Trockenmonaten hatte eine größere Dynamik als die vorhergehenden Klimafaktoren. Von P0 zu P1 wurde es für die meisten Bäume zunächst feuchter und von P1 zu P2 nahm die Häufigkeit der Trockenmonate wieder zu. Auch die Häufigkeit trockener Monate zeigte eine räumlich heterogene Verteilung.

Der **Vergleich der Durchmesserzuwächse** beider Zuwachsperioden (P1 und P2) ergab, dass bei allen Baumarten, außer bei Trauben-Eiche, der Durchmesserzuwachs in P1 höher war als in P2.

Bei der Analyse **der Beziehung von Klima und Durchmesserzuwachs** konnten für die sechs Hauptbaumarten artspezifische Zuwachsmuster gefunden werden. Die Zuwachsklimahüllen für Niederschlag und Temperatur zeigten für Gemeine Fichte und Weiß-Tanne unterschiedliche Zuwachsmuster in beiden Zuwachsperioden, während die übrigen

vier Hauptbaumarten in beiden Perioden ein ähnliches Zuwachsmuster aufwiesen. Rot-Buche und Trauben-Eiche hatten ihr Zuwachsoptimum bei mittleren Niederschlägen zwischen 400 und 600 mm in der Vegetationsperiode und oberhalb von 14.5 °C. Wald-Kiefer und Stiel-Eiche zeigten auch bei Niederschlägen unterhalb von 400 mm hohe Zuwächse. Bei Gemeiner Fichte war kein spezifischer Zuwachstrend erkennbar. Bei der Weißtanne führten Temperaturen oberhalb von 15 °C zu reduziertem Zuwachs.

Dieser Trend wurde durch den Vergleich der Zuwächse von fünf Ariditätsklassen (*sehr seltene, seltene, mittlere, häufige und sehr häufige relative* Häufigkeit von Trockenmonaten (rHTM)) bestätigt. In 8 von 12 Fällen fiel der durchschnittliche Zuwachs in den Kategorien *häufige* und *sehr häufige* Anzahl von Trockenmonaten höher aus als der durchschnittliche Zuwachs. Der Zuwachs in den Kategorien *geringe und sehr geringe* Trockenmonate war in den meisten Fällen unterdurchschnittlich. Dies lässt sich dadurch begründen, dass diese Ariditätsklassen meist in den höheren Gebirgslagen auftraten, wo Strahlung und Temperatur geringer sind als in Tieflagen.

Um **räumliche Aspekte der Klima-Zuwachsbeziehungen** zu berücksichtigen, wurden mittels räumlicher Clusteranalysen Gebiete mit ähnlichen Zuwachsverhalten lokalisiert und hinsichtlich ihrer klimatischen Einflüsse untersucht.

Die räumliche Clusteranalyse ergab für über 50% der Einzelbäume keine Clusterung in Bezug auf den Zuwachs. Das heißt, dass in den meisten Regionen die Zuwächse der Einzelbäume sehr stark variierten und kein räumliches Muster abgeleitet werden konnte. Für die andere Hälfte der Individuen lag eine räumliche Clusterung hoher und niedriger Zuwächse zu etwa gleichen Anteilen vor. Die Cluster mit hohen Zuwächsen (HighCluster) waren vor allem in Gebieten mit feucht warmen Klima zu finden. Während die Zuwächse in feucht kühlen Hochlagen oft geringer ausfielen (LowCluster). Bei Gemeiner Fichte, Rot-Buche und Weiß-Tanne konnte regional eine Zuwachsreduktion bei zunehmenden Temperaturen und Trockenheit beobachtet werden, während bei Wald-Kiefer und beiden Eichenarten geringe klimabedingte Veränderungen auftraten.

Neben klimatischen Faktoren spielt auch das Wasserspeichervermögen des Bodens eine wichtige Rolle für das Wachstum. Bei häufiger Trockenheit (rHTM>40%) reagierten Gemeine Fichte, Rot-Buche, Trauben-Eiche und Weiß-Tanne auf Standorten mit sehr geringer nutzbarer Feldkapazität des effektiven Wurzelraumes (<50 mm) mit

vermindertem Zuwachs im Vergleich zu Böden mit besser Wasserspeicherkapazität. Wald-Kiefer und Stiel-Eiche zeigten auf Böden geringer Feldkapazität höheres Wachstum. Bei mittlerer Trockenheit ($30 \% > r_{HTM} < 40 \%$) hatte die nutzbare Feldkapazität des effektiven Wurzelraumes keinen Einfluss auf ihren Zuwachs.

Anhand von **multifaktoriellen Analysen** wurden weitere ökologische und standörtliche Faktoren identifiziert, wodurch die Bedeutung des Klimas für den Zuwachs besser eingeschätzt werden konnte. Hierfür wurden geographisch gewichtete Regressionen verwendet, die zusätzlich zu den Eingangsfaktoren auch räumliche Aspekte berücksichtigten.

Die geographisch gewichteten Regressionen zeigten, dass insbesondere die Faktoren Alter, Ausgangs-BHD und Bestandesgrundfläche (Konkurrenz) den Zuwachs beeinflussten. Von den Klimavariablen hatte die Temperatur den größten Anteil als erklärende Variable. Sie war bei 54% der Modelle von Relevanz. Danach folgte Niederschlag mit 38%. Die relative Häufigkeit von Trockenmonaten kam in 23% der Modelle als erklärende Variable vor.

Bei der Bewertung der Ergebnisse ist zu berücksichtigen, dass zwar baumartenspezifische Muster gefunden wurden, die auf klimabedingte Zuwachsreaktionen hindeuten, häufig kein statistischer Zusammenhang für die Klima-Zuwachsbeziehung gefunden wurde. Eine der Ursachen für die geringe Prognosegüte ist auch dadurch zu begründen, dass der Durchmesserzuwachs aus zwei Durchmesserwerten berechnet wurde, die in einen mehrjährigen Abstand von 11 bis 15 Jahren gemessen wurden. Zuwachsreaktionen der Bäume in Jahren mit extremen Witterungsbedingungen konnten dadurch nicht abgebildet werden, obwohl sich gerade auch in der jüngsten Vergangenheit gezeigt hat, dass extreme Situationen den Zuwachs und die Vitalität direkter und intensiver beeinflussen können als stetige Veränderungen. Somit sind die Zuwachsdaten der Waldinventuren aufgrund der langen Zeitintervalle nur bedingt geeignet, um klimabedingte Zuwachsreaktionen abzuleiten.

Die Ergebnisse der multifaktoriellen Analysen deuten darauf hin, dass die Berücksichtigung weiterer Faktoren wie zum Beispiel Konkurrenz zu einer Verbesserung der Prognosen führen kann.

ABSTRACT

Since the 20th century, the global climate is changing at an unprecedented rate. For Central Europe, this change means an increase in average annual temperatures, changing precipitation conditions and an increase of weather extremes like heat waves and droughts. Climate change also alters the ecological site-conditions of forests. In many areas, effects of climate change are already recognizable. They range from regional declines in productivity and loss of vitality to shifts in species composition and large-scale tree mortality.

In order to preserve the ecological, socio-cultural and economic functions of forests it is necessary to understand the processes of climate change. In recent years, numerous studies have investigated this phenomenon with different approaches. Often, these studies are conducted on smaller regional scale, due to the high costs, or only considered a limited number of trees. The three German national forest inventories contain a comprehensive dataset for the entire federal territory and for a period of more than 25 years. So far, however, these data have still been rarely used to analyze climate-induced growth.

The aim of this work was to find out to what extent forest inventory data are suitable to describe climate-related growth reactions for the main economic tree species Norway spruce (*Picea abies*, (L.) H. Karst.), European beech (*Fagus sylvatica*, L.), Scots pine (*Pinus sylvestris*, L.), sessile oak (*Quercus petraea*, L.), pedunculate oak (*Quercus robur*, L.) and silver fir (*Abies alba*, Mill.).

The annual diameter increment served as proxy for the assessment of climate sensitivity. The analysis was based on the data of the three German National Forest Inventories (BW11: 1986-1989, BW12: 2001-2002, BW13: 2011-2012) for two incremental periods each (P1: 1986-2002, P2: 2003-2011). The analysis was restricted to the old federal states of Germany, since no data was collected in the new federal states during the first inventory¹. Mean temperature (°C), precipitation sum (mm) and the de Martonne index (dMI) for the forest vegetation period (IV-IX) were used as the descriptive climate variables. Another climate index, the relative frequency of dry months (rHTM), was derived on the basis of the de Martonne index. This index took seasonal climatic aspects into account. It was based on the number of dry months (dMI <20) during the three study periods.

The approach followed a general analysis of climate-induced growth reaction as including spatial analysis of this relationship. In addition to the climate, other site-specific and ecological factors were included in the analysis.

¹ Until 1990 Germany was divided into two states, an eastern and a western part.

The climatic changes of the two growth periods were related to a 15-year period before the first forest inventory (P0 1971-1985). For all six tree species, an increase in temperature of 0.6 °C per incremental period (P1 and P2) was observed compared to the pre-inventory period (1971 to 1985). Almost the entire study area was affected by this change in temperature. The precipitation slightly increased over the investigation period. However, the distribution of precipitation in the growing season was very heterogeneous. Also, the de Martonne index changed only slightly in most locations. The values fell below the threshold of 25, considered to be critical for drought-sensitive species, at three sites. The relative frequency of dry months had greater dynamics than the previous climatic factors. From P0 to P1 it became moister for most trees and from P1 to P2 the frequency of the dry months increased again. The frequency of dry months also showed a spatially heterogeneous distribution.

The analysis of climatic growth relationships revealed species-specific growth patterns for the six main tree species. The climatic envelopes for precipitation and temperature showed different growth patterns for Norway spruce and Silver fir in the two incremental periods, while the other four tree species showed a similar growth pattern in both periods. European beech and sessile oak had their growth optimum on sites with an average precipitation sum between 400 and 600 mm and mean temperatures above 14.5°C during the growing season. Scots pine and pedunculate oak had high diameter increments even at precipitation sums below 400 mm. No specific trend could be found for spruce. For the silver fir, temperatures above 15°C resulted in reduced growth. These trends were confirmed by comparing the increases of five aridity classes (*very rare*, *rare*, *medium*, *frequent* and *very frequent* number of dry months (rHTM) with average increment of each tree species. In 8 of 12 cases, the average increment in the categories *frequent* and *very frequent* number of dry months was higher than the average increase. However, the increase in *very frequent* drought was lower than in *frequent* drought. The increase in the categories *low* and *very low* dry months was below average in most cases, which was due to the fact that these arid classes mostly occurred in the higher mountain ranges where radiation and temperature are lower than in low altitudes.

In order to consider spatial aspects of the climatic growth relationships, areas with similar growth behavior were localized by means of a spatial cluster analysis and examined with regard to their climatic influences.

Spatial cluster analysis showed no clustering in terms of growth for over 50% of the single trees. This means that in most regions, the growth of individual trees varies greatly, that there was no spatial pattern. For the other half of the individuals, spatial clustering of high and low growth was roughly equal. The high-growth clusters were found mainly in wet,

warm conditions. While clusters with low increment occurred especially in mid and high altitudes with more humid and cool conditions. For Norway spruce, European beech and silver fir, increasing temperatures and drought led to a reduction in diameter increment between the two growth periods. While Scots pine and both oak species showed little growth response to climate changes.

In addition to climatic factors, the water storage capacity of soils is also important for tree growth. With frequent aridity ($r_{HTM} > 40\%$), Norway spruce, European beech, sessile oak and silver fir showed reduced growth response at sites with very low field capacity compared to soils with better water storage capacity. Scots pine and pedunculate oak showed higher diameter increment on these soils. At a medium frequency of drought events ($40\% < r_{HTM} > 30\%$), the field capacity in the effective root zone had no impact on diameter increment.

Multifactorial analyzes identified additional environmental and site factors, which improved the ability to assess the importance of the climate for diameter growth. For this purpose, geographically weighted regressions were applied which, in addition to the input factors, also take spatial aspects into account.

The geographically weighted regressions showed that especially the factors age, diameter at breast height and basal area (competition) influence the diameter increment stronger than climate. Regarding the climate variables, temperature was the most frequent significant factor. It was relevant in 54% of the models, followed by precipitation with 38%. The relative frequency of dry months occurred as an explanatory variable in 23% of the models.

In general, tree-specific patterns could be found in the models, but in most cases the statistical significance was weak. One of the reasons for the low predictive strength is probably related to the fact that the diameter increase was calculated from two diameter values, which were several years apart (ranging from 11 to 15 years). From this data growth reactions in years with extreme weather conditions cannot be derived. However, recent studies have shown that extreme conditions might influence growth and vitality more strongly than successive changes in the overall climate conditions.

Due to the long time intervals between the inventories, the data of forest inventories are conditionally suitable to estimate climate-related growth reactions. The results of the multifactorial analyzes indicate that the consideration of other ecological and structural factors may lead to an improvement in the forecasts

1 EINLEITUNG

1.1 Wald und Klima

Das Klima ist ein dynamisches, sich stets wandelndes System. Seit dem Beginn des 20. Jahrhunderts ändert sich das globale Klima jedoch in einer bislang nicht gekannten Geschwindigkeit (Kölling et al. 2007). Im Zeitraum von 1901 bis 2000 stieg die Jahresmitteltemperatur in Deutschland um etwa 1°C an (Kaspar et al. 2017; Schönwiese et al. 2004). Modellrechnungen prognostizieren eine weitere Zunahme um 1,2 bis 4,8 °C bis 2100 bezogen auf den Zeitraum 1971 bis 2000 (Kaspar et al. 2017). Die Niederschläge hingegen nahmen von 1881 bis 2014 um 10 % zu. Der Anstieg der Niederschlagsmenge war vor allem im Winter (+ 26 %) zu beobachten, während er im Sommer leicht abnahm (-0,6 %) (Kaspar et al. 2017). Diese schnell voranschreitenden Veränderungen wirken sich unmittelbar auf die klimatischen Rahmenbedingungen vieler Ökosysteme aus. Bäume werden aufgrund ihrer langen Lebensdauer als besonders sensibel gegenüber dem Klimawandel eingeschätzt (Lindner et al. 2010; Reif et al. 2010). Die Wälder Mitteleuropas und ihre Bauartenzusammensetzung werden, sofern sie nicht auf Extremstandorten stehen, durch das Allgemeinklima geprägt (Ellenberg und Dierschke 2010). Das milde europäische Klima begünstigt das Baumwachstum, dass unter natürlichen Bedingungen Mitteleuropa nahezu vollständig bewaldet wäre. Die vorherrschende Baumart ist die Rot-Buche, deren Hauptverbreitungsgebiet südlich der Elbe beginnt und sich über ganz Deutschland bis zu den Alpen erstreckt. In den Berglagen sind Tanne und Fichte beigemischt. Nord-östlich der Elbe wachsen aufgrund der Sandböden vorwiegend Kiefernwälder (Ellenberg und Dierschke 2010).

Aufgrund der ökonomischen Ausrichtung der Waldbewirtschaftung im 19. und 20. Jahrhundert sowie Wiederausforstungsmaßnahmen nach Reparationshieben als Maßnahme zur Regulierung von Schäden des 2. Weltkrieges wurden auf typischen Buchenstandorten oft gleichaltrige Fichtenmonokulturen herangezogen, da die anspruchslose Fichte hat im Vergleich zur Buche eine höhere Zuwachsrates und eine kürze Umtriebszeit hat. Allerdings gilt die Fichte als wenig widerstandsfähig gegenüber extremen Witterungseinflüssen. Die Stürme Vivian, Wiebke (1990), Lothar (1999) und Kyrill (2007) und die damit einhergehenden Sekundärereignisse verursachten schwere

Schäden und großen Verluste (Reif et al. 2010) vor allem in Fichtenbeständen. In den folgenden Jahren sorgten auch zunehmende Dürre- und Hitzeperioden zu einer verminderten Vitalität und Produktivität bei der Fichte (Neuner 2016).

Der rasche Temperaturanstieg und die Intensivierung von Witterungsextremen führen zu einer Veränderung der Standortbedingungen, die Verschiebungen in den Artenzusammensetzungen sowie in den Konkurrenzbeziehungen zwischen Baumarten nach sich ziehen können (Brang et al. 2008). Davon sind nicht nur die Fichte sondern auch alle anderen Baumarten betroffen. Es ist davon auszugehen, dass viele Waldgesellschaften mit den Arealverschiebungen nicht Schritt halten können und Anpassungsprozesse an die Umweltveränderungen zu langsam ablaufen (Parmesan und Yohe 2003; Delzon et al. 2013; Lindner et al. 2014). Um die bereits entstandenen Schäden abzumildern und dafür Sorge zu tragen, dass auch in Zukunft funktionale Waldökosysteme erhalten bleiben, sind Forstwirtschaft und -wissenschaft gefordert, neue Lösungsansätze für eine mitigative und zukunftsichernde Waldentwicklung zu finden. Daraus resultierte ein länderübergreifendes Umdenken der Waldbewirtschaftungskonzepte, das zu einem großflächigen Waldumbau führte, bei dem insbesondere die sogenannte naturnahe Waldwirtschaft im Fokus stand (Reif et al. 2010).

1.2 Zielsetzung der Arbeit

In den vergangenen Jahren hat die Erforschung der Klimafolgen für unsere Wälder enorm an Bedeutung gewonnen. Allerdings wird immer noch intensiv darüber diskutiert, wie die einzelnen Baumarten auf die Veränderungen reagieren und welche von ihnen den zukünftigen Bedingungen gewachsen sind. Viele dieser Studien beziehen sich auf ein begrenztes Gebiet oder umfassen eine geringe Anzahl von Probestämmen. In dieser Studie wird durch Verwendung von Bundeswaldinventurdaten ein Ansatz verfolgt, bei dem die Auswirkungen des Klimawandels über einen Zeitraum von etwa 25 Jahren auf großräumiger Skala, einem Gebiet von rund 250 000 km² (alte Bundesländer) betrachtet werden. Es handelt sich dabei um eine retrospektive Analyse, bei der bereits nachweisbare Reaktionen der Hauptwirtschaftsbaumarten auf die klimatischen Gegebenheiten im Vordergrund stehen. Modellrechnungen zur zukünftigen Entwicklung der Hauptbaumarten unter verschiedenen Klimaszenarien sind nicht Gegenstand dieser

Studie. Gleichwohl können Resultate und Erkenntnisse der vorliegenden Arbeit als Grundlagen für Simulationsmodelle dienen.

Vorrangig zielt die vorliegende Studie darauf ab, zu untersuchen inwieweit sich die Ergebnisse von Großrauminventuren zur Analyse von klimabedingten Zuwachsreaktionen unterschiedlicher Baumarten eignen. Daraus ergab folgender Fragenkomplex:

Sind Daten der Bundeswaldinventuren eine geeignete Grundlage zur Untersuchung von klimabedingten Zuwachsreaktionen? Welche Möglichkeiten bieten die Inventurdaten und wo sind die Grenzen der Aussagefähigkeit?

In diesem ersten Teil wurden zunächst Struktur, Qualität und die geeigneten Faktoren des Waldinventurdatensatzes betrachtet. Dazu war es erforderlich, die Daten hinsichtlich ihrer Plausibilität und Verteilung zu untersuchen. Zusätzlich dienten die Antworten der folgenden Forschungsfragen dazu, Aussagen über die Praktikabilität der Daten und die Aussagekraft der Ergebnisse treffen zu können.

Neben den methodischen Aspekten war es von Interesse, die Zuwachsreaktion der Hauptbaumarten im Zusammenhang mit der Klimaveränderung über einen langen Zeitraum und für ein großes Gebiet zu untersuchen, um daraus Rückschlüsse ihrer Klimatoleranz abzuleiten. Dieser Ansatz führte zum zweiten Fragenkomplex:

Wie hat sich das Klima in dem Zeitraum der drei Waldinventuren verändert und welche Zuwachsreaktionen zeigen die Hauptbaumarten gegenüber diesen Veränderungen? Wie ist der relative Zuwachs der sechs untersuchten Baumarten im Vergleich zueinander zu bewerten? Oder: bei welchen Baumarten ist die Zuwachsänderung als Folge veränderter ökologischer Rahmenbedingungen besonders ausgeprägt?

Die Analyse der Klimaentwicklung erfolgte durch einen Vergleich verschiedener Klimafaktoren für die zwei Zuwachsperioden (P1: 1989-2001 und P2: 2002-2011) zwischen den drei Waldinventuren und einer fünfzehn jährigen Referenzperiode (P0: 1971-1985). Anschließend wurden die Zuwächse der Hauptbaumarten mit dem Klima in Bezug gesetzt und die Zuwachsreaktionen der Baumarten zwischen beiden Zuwachsperioden analysiert. Dies erfolgte zunächst für das gesamte Datenkollektiv. Da auch regionale Aspekte für

diese Betrachtung von Bedeutung waren, wurde nachfolgend eine räumliche Analyse der Klima-Zuwachsbeziehung durchgeführt.

Neben dem Klima beeinflusst eine Vielzahl weiterer Faktoren die Zuwachsentwicklung von Bäumen, die das Klimazuwachssignal überlagern können. Daraus leitete sich der dritte Fragenkomplex ab:

Welche Faktoren neben dem Klima haben Einfluss auf das Zuwachsvermögen? Wie bedeutend ist der Einfluss einzelner Faktoren? Wie ist ihr Einfluss im Vergleich zum Klima zu bewerten?

Durch Hinzunahme weiterer standörtlicher und struktureller Faktoren sollte mit Hilfe von multifaktoriellen Analysen die Bedeutung dieser Faktoren auf den Zuwachs betrachtet werden, um so abschätzen zu können, welchen Stellenwert das Klima für die Zuwachsentwicklung einnimmt.

1.3 Stand der Forschung

1.3.1 Bundeswaldinventur

Die Bundeswaldinventur (BWI) ist eine forstliche Großrauminventur, die auf dem gesamten Bundesgebiet durchgeführt wird. Sie ist ein gesetzlicher Auftrag, der durch das Bundeswaldgesetz § 41a vorgeschrieben ist. Ziel dieser Untersuchung ist es einen Gesamtüberblick über den Zustand und die Entwicklung des Waldes in Deutschland zu erhalten. Als zentrales Kontroll- und Monitoringinstrument ist die Bundeswaldinventur eine wichtige Grundlage für Entscheidungen von Politik und Wirtschaft. Bislang wurden in Deutschland drei Bundeswaldinventur durchgeführt. Die erste Inventur (BWI 1) von 1986 bis 1989 bezog sich noch ausschließlich auf Westdeutschland. Die Zweite Bundeswaldinventur (BWI 2) war die erste gesamtdeutsche Inventur, die in den Jahren 2001 bis 2003 erfolgte. Die Feldaufnahmen zur dritten Bundeswaldinventur begannen im April 2011 und wurden bundesweit bis Ende 2012 abgeschlossen. Die Ergebnisse wurden im Oktober 2014 veröffentlicht.

Methodisch betrachtet ist die BWI eine einstufige Klumpenstichprobe mit regional unterschiedlicher Stichprobendichte. Die Stichproben werden auf permanenten

Probepunkten in einem Intervall von etwa 10 Jahren nach einem einheitlichen Verfahren auf dem gesamten Gebiet Deutschlands durchgeführt. Grundlage der Inventur bildet ein Rasternetz von 4x4 km Zellgröße, das Deutschland vollständig abdeckt. Einige Bundesländer haben das Netz um den Faktor 2 (2,83x2.83 km) oder den Faktor 4 (2x2km) verdichtet (Abb. 1). An der Südwestecke einer Rasterzelle ist der Trakt, auch Stichprobe, mit einer Größe von 150 x 150 m verankert, an dessen vier Traktecken die

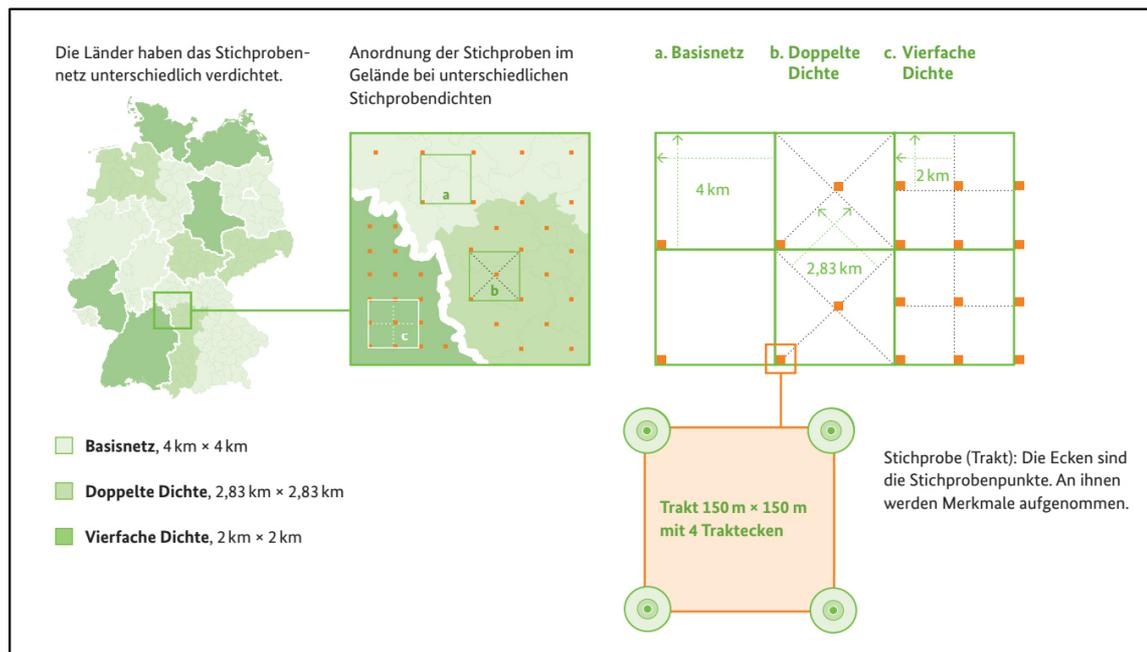


Abb. 1: Schema des Inventurrasters und der Datenerfassung an den Stichprobenpunkten der drei BWL. Quelle: Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV) 2011

Stichprobenpunkte liegen, an denen die Datenaufnahme erfolgt (Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV) 2011).

1.3.2 Baumarten im Klimawandel

Um zukunftssichere Wälder zu entwickeln, wurde in den vergangenen beiden Dekaden die Rolle der Hauptwirtschaftsbaumarten hinsichtlich ihrer Anpassungsfähigkeit und Klimastabilität in zahlreichen Studien untersucht (Oberhuber et al. 1998, Penninckx et al. 1999; Lebourgeois et al. 2005; Kölling und Ammer 2006; Koprowski und Zielski 2006; Macias et al. 2006; Kölling et al. 2007; Ammer 2009; Friedrichs et al. 2009a; Mölder et al.

2011; Scharnweber et al. 2011; Zang et al. 2012; Zang et al. 2014; Knutzen et al. 2017; Land et al. 2017).

Über die zukünftige Verwendung der **Fichte** herrscht ein weitgehenderer Konsens. In vielen Regionen Deutschlands gilt sie als Verliererin des Klimawandels (Thomasius 1991; Pretzsch und Ďurský 2002; Kölling und Ammer 2006; Kölling et al. 2007; Profft et al. 2007; Spellmann et al. 2007), da sie sich bereits in jüngerer Vergangenheit durch hohe Ausfälle nach Sturmereignissen (Brosinger und Östreicher 2009) und Zuwachsreduktion in Folge von Temperaturanstieg und zunehmender Trockenheit (Kölling et al. 2007) als sehr anfällig gegenüber dem Klimawandel gezeigt hat. Modellprognosen weisen auf einen weiteren Anstieg der Temperatur sowie eine Zunahme von Extremen, wie Trockenheit und Sturmereignissen, im Verlauf des 21. Jahrhunderts hin. Dadurch werden sich die für die Fichte geeigneten Areale weiter verringern (Dolos und Märkel 2016). Zusätzlich führen die wärmeren Bedingungen zu einer steigenden Populationsentwicklung von Borkenkäfern, wodurch der Befallsdruck für die Fichte zunimmt (Profft et al. 2008).

Die Eignung der **Rot-Buche** unter veränderten Klimabedingungen wird dagegen kontrovers diskutiert (Ammer 2009). Ammer et al. (2005), Kölling et al. (2005) und Manthey et al. (2007) gehen davon aus, dass sie in ihrem Verbreitungsareal, abgesehen von einigen Gebieten (Scharnweber et al. 2011; Mette et al. 2013), kaum vom Klimawandel betroffen sein wird. Eine verlängerte Vegetationsperiode kann auf ausreichend wasserversorgten Standorten zu einer höheren Produktivität führen (Sabaté et al. 2002). Dem steht die Einschätzung von z.B. Geßler et al. (2007) und Rennenberg et al. (2004) entgegen, die für die Buche bei zunehmenden Dürreereignissen mit einem verringertem Zuwachs sowie einem Verlust an Konkurrenzfähigkeit rechnen. Seit den 1980ern konnte ein langfristiger Rückgang des Radialzuwachses in den Tieflagen in unterschiedlichen Regionen Europas beobachtet werden (Scharnweber et al. 2011; Kint et al. 2012; Zimmermann et al. 2015), der auf die Empfindlichkeit der Buche gegenüber wärmeren und trockenerem Klima zurückgeführt wird. Walentowski et al. (2017) fanden auf trockenen Standorten im Wuchsgebiet *Fränkische Platte* für das Trockenjahr 1976 eine durch Trockenheit verursachte Zuwachsreduktion von über 40% gegenüber normalen Jahren. Auf Level II- Flächen reagierte die Buche im Hitzejahr 2003 ebenfalls mit deutlicher Zuwachsreaktion, allerdings erst im Folgejahr (Beck 2010). Beide Autoren

beobachteten eine deutliche Erholungstendenz der Buche in den Folgejahren. Steigende Temperaturen und die Zunahme von Trockensommern in der vergangenen Dekade führen jedoch dazu, dass der Buche nicht mehr genügend Zeit bleibt, um sich von den Stressereignissen zu erholen. Insbesondere der Trockensommer 2018 führt auf Standorten mit ungünstiger Wasserkapazität zu hohen Ausfällen bei der Buche. Es ist also davon auszugehen, dass auch die Buche auf schlecht wasserversorgten Standorten durch den Klimawandel in Mitleidenschaft gezogen wird.

Trauben- und Stiel-Eiche werden von vielen Autoren eine geringe Gefährdung durch den Klimawandel nachgesagt (Thomas et al. 2002; Beck 2010; Meinardus und Bräuning 2011; Kölling 2012; Walentowski et al. 2017) . Ammer (2009) vermutet, dass sich die Situation für die Eiche verbessern wird, da sie zum Beispiel in Buchen-Eichenmischwäldern gegenüber der Buche an Konkurrenzkraft gewinnen kann (Zimmermann et al. 2006).

Thomas et al. (2002) bringen die Klimaveränderung als möglichen Co-Faktor in Zusammenhang mit dem Eichensterben in den 1980ern. Bréda et al. (2006) beobachteten einen verminderten Radialzuwachs bei zunehmendem Wasserdefizit in Nordost-Frankreich für den Zeitraum 1964-1994. Generell wird die Trauben-Eiche gegenüber der Stiel-Eiche als trockenheitstoleranter eingeschätzt (Cochard et al. 1992; Bréda 2000; Thomas et al. 2002)

Bei der **Wald-Kiefer** sind die Ansichten über ihr Potential als Zukunftsart recht unterschiedlich. Zum einen wird von einigen Autoren bezweifelt, dass die Kiefer als „boreale Baumart“ mit den steigenden Temperaturen und den damit verstärkt auftretenden biotischen Schädlingen zurechtkommt (Walentowski et al. 2007; Reif et al. 2010). Untersuchungen deuten darauf hin, dass sie in einigen Regionen (Oberrheinebene, Wallis) ihre Wärmegrenze erreicht hat (Rebetez und Dobbartin 2004; Walentowski et al. 2007). Reich und Oleksyn (2008) halten bei voranschreitender Erwärmung einen Rückgang der Zuwachsraten in ganz Europa, abgesehen vom hohen Norden, für sehr wahrscheinlich. Dagegen berichten Martínez-Vialta et al. (2008) von einer Zunahme des Radialzuwachses bei der Wald-Kiefer in Nordost-Spanien.

Auch in borealen Kiefernwäldern in Süd- und Nord-Finnland reagierten die Wald-Kiefern mit Zuwachssteigerungen auf die Klimaerwärmung (Briceño-Elizondo et al. 2006). Bauwe et al. (2016) fanden für Kiefernbestände in Nordostdeutschland einen moderaten Einfluss

des Klimawandels auf den Zuwachs. Sie schlossen daraus, dass sich Nordostdeutschland in der Übergangszone zwischen den nordwärts gelegenen Gebieten mit steigenden Zuwächsen und den südlichen Gebieten mit abnehmenden Zuwächsen befindet.

Verschiedene Studien deuten darauf hin, dass die Wald-Kiefer nicht direkt durch den Klimawandel betroffen ist, sondern eher durch Sekundärschäden wie zum Beispiel Kiefernholznematoden oder Borkenkäfern geschädigt wird (Rebetez und Dobbertin 2004; Bauwe et al. 2016).

Die **Weiß-Tanne** ist vor allem in Bayern und Baden-Württemberg „ein Hoffnungsträger für den Waldbau im Klimawandel“ (Muck et al. 2008). Sie gilt als optimal an das mitteleuropäische Klima angepasst (Muck et al. 2008) und die klimatischen Bedingungen werden sich für sie zukünftig vermutlich eher verbessern (Muck et al. 2008; Ammer 2009; Reif et al. 2010). Wobei Macias et al. (2006) sowie Maxime und Hendrik (2011); herausfanden, dass zunehmende Sommertrockenheiten zu einer Verringerung der Zuwachsleistung führen können. Anhand von Modellrechnungen vermuten Kölling et al. (2011) einen Rückgang geeigneter Standorte für den Zeitraum 2071-2100 (Regionales Klimamodell WETTREG, Szenario B1). Somit ist der Status der Weiß-Tanne in Bezug auf Klimaeignung noch nicht vollständig geklärt.

Baumwachstum gilt als wichtiger Indikator für die Vitalität von Bäumen und den Zustand des Waldes im Allgemeinen (Cook 1987; Dobbertin 2005). Vor allem Untersuchungen des Radialzuwachses können Aufschluss über die Einflüsse von Klima und anderen Umweltfaktoren auf das Wachstum geben (Scharnweber 2014; Hoffmann et al. 2018). Daher haben sich dendrochronologische Methoden zur Analyse von Zuwachsreaktionen der Baumarten auf den Klimawandel bewährt. In zahlreichen Studien wurden die Einflüsse spezieller Klimafaktoren auf den Zuwachs abgeleitet (Schweingruber et al. 1990; Lévesque et al. 2014; Zimmermann et al. 2015; Dulamsuren et al. 2017; Hoffmann et al. 2018) und die Zuwachsreaktionen auf spezifische Extremereignisse (z.B. Trocken- und Hitzeereignisse) rückwirkend analysiert (Lloret et al. 2011; Pretzsch et al. 2013; Hoffmann et al. 2018). Neben dem Durchmesserzuwachs wird häufig auch der Höhenzuwachs als Proxy für klimabedingte Reaktionen verwendet (Dobbertin 2005; Messaoud und Chen

2011; Ivancich et al. 2012), da dieser weniger durch die Bestandesdichte beeinflusst wird als der Durchmesserzuwachs (Dobbertin 2005).

Trockenheit wirkt sich unmittelbar auf das Wassertransportsystem von Pflanzen aus. Trockenstress lässt sich dadurch auch über den Xylemfluss nachweisen. Anhaltende Trockenheit kann zu Luft-Embolien (Kavitation) innerhalb der Leitelemente und somit zum Zusammenbrechen des Wassertransports der Pflanzen führen (Choat et al. 2012). Die Resistenz gegenüber Kavitation kann dabei zwischen unterschiedlichen Baumarten beträchtlich variieren (Choat et al. 2012) und ist zudem mit hohem Messaufwand verbunden (George et al. 2015).

Ein vielbeachteter Ansatz sind die von Kölling et al. (2007) entwickelten Klimahüllen, in denen die Verbreitungsgebiete der europäischen Baumarten innerhalb ihrer aktuellen und zukünftigen klimatischen Grenzen (Jahresniederschlagssumme und Jahresmitteltemperatur) abgebildet sind. Mittlerweile wird die auf Arealkarten basierende Auswertung der Klimahüllen durch komplexe Modelle abgelöst (Kölling et al. 2011). Höhere Rechenleistung von Computern ermöglichen die Auswertung großer Datensätze durch zum Beispiel komplexe Regressionen und elaborierte Modelle, anhand derer Aussagen über den Zusammenhang zwischen Klimawandel und Waldentwicklung oder die Standorteignung von Bäumen verbessert werden können (Falk und Mellert 2011; Mette et al. 2013; Ruiz-Benito et al. 2013; Märkel und Dolos 2017). Neben dem Vorkommen einer Baumart werden häufig auch Ertrag (Ertragstafeln, Bonität), Radialzuwachs, Höhenwachstum sowie Grundfläche einer Art als Proxy für Standorteignung herangezogen (Kölling et al. 2007; Nothdurft 2013; Brandl et al. 2014; Dolos und Märkel 2016).

Derartige Modelle basieren meist auf formalisierten ökologischen und statistischen Annahmen, die durch großräumig erhobene Datensätze gestützt werden. Ein solch großräumiger Datensatz ist im Rahmen der drei Bundeswaldinventuren entstanden. In der dritten Inventur (BWI3 2011-2012) wurden Informationen von über 500.000 Einzelbäumen erfasst.

Allerdings werden Wachstumsmodelle auf der Datenbasis von Waldinventuren bislang noch wenig genutzt (Benito-Garzón et al. 2013; Mette et al. 2013; Brandl et al. 2014; Dolos und Märkel 2016).

1.4 Klimatische und standörtliche Einordnung der Hauptwirtschaftsbaumarten

Die Hauptwirtschaftsbaumarten

Gemeine Fichte (*Picea abies*, (L.) H.Karst.), Rot-Buche (*Fagus sylvatica*, L.), Wald-Kiefer (*Pinus sylvestris*, L.), Trauben-Eiche (*Quercus petraea*, L.), Stiel-Eiche (*Quercus robur*, L.) und Weiß-Tanne (*Abies alba*, Mill.) bedecken zirka

dreiviertel der Holzbodenfläche des Waldes in Deutschland. Am häufigsten kommt die Fichte mit 26 % vor, gefolgt von der Wald-

Kiefer (23%). Die Buche ist mit 16 % die häufigste Laubbaumart vor der Eiche (10 %). Die Tanne hat einen Flächenanteil von 2 % (Abb. 2). Sie ist als Wirtschaftsbaumart vor allem in Bayern und Baden Württemberg von Bedeutung.

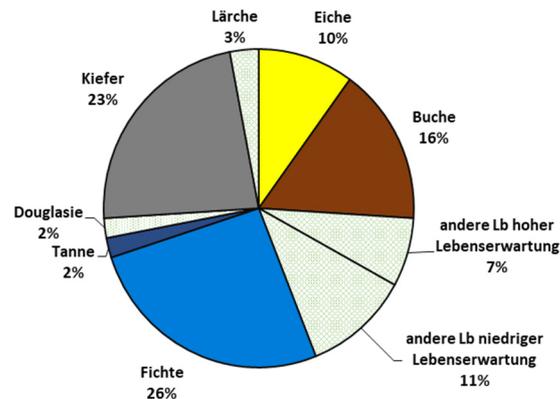


Abb. 2: Häufigkeiten der Baumarten in Deutschland. Stand BWI 3 (20011-2012). Die in dieser Studie verwendeten Hauptbaumarten sind in ihrer formellen Farbgebung dargestellt. Alle übrigen Bäume und Baumgruppen sind einheitlich hellgrün dargestellt.

Gemeine Fichte (*Picea abies* (L.) KARST)



Abb. 3: Verbreitungsgebiet der Gemeinen Fichte (*Picea abies*) zusammengestellt von den Mitgliedern des EUFORGEN-Netzwerks, basierend auf der Karte von H. Schmidt-Vogt in 1977 (*Die Fichte*, Verlag Paul Parey, Hamburg and Berlin, p.647). Quelle: EUFORGEN 2009, www.euforgen.org, (EPSG: 4326).

Die Fichte bevorzugt kühl-kontinentales Klima bzw. subalpines bis montanes Höhenklima mit mittleren bis hohen Niederschlägen (mindestens 40 mm Niederschlag pro Monat in der Vegetationsperiode). Niederschlagsarme und lufttrockene Lagen werden deshalb von ihr gemieden. Sie benötigt weder hohe Sommerwärme, noch stellen tiefe

Winterfröste ein Problem dar. Ihre Wachstumsleistung variiert stark in Abhängigkeit vom Klima ihres Wuchsgebietes. An die Nährstoffversorgung stellt die Fichte eher geringe

Ansprüche. Sie wächst auf tiefgründigen, sandig bis lehmigen Verwitterungsböden silikatischer Grundgesteine. Kalkstandorte und sehr nährstoffreiche Böden sind eher ungünstig, vor allem im planaren Bereich.

Ihr Verbreitungsgebiet erstreckt sich von Süd- und Mitteleuropa über Skandinavien bis nach Sibirien (Abb. 3). Sie kommt hier meistens in höheren Lagen vor wie z.B. den Alpen, Pyrenäen oder Karpaten vor. Ihr Optimum befindet sich im Bereich Alpenvorland, Bayerischer Wald, Böhmischer Wald und den Karpaten. Die Fichte wurde durch den Menschen in Mitteleuropa weit über ihr natürliches Verbreitungsareal angebaut. Ursprünglich mit einem Waldanteil von vermutlich nicht mehr als einem Prozent ist sie in den hochmontanen und subalpinen Lagen der deutschen Mittelgebirge und in den Alpen beheimatet. Aktuell stellt die Fichte mit 26 % (Stand BWI 3) den größten Waldanteil in Deutschland.

Rot-Buche (*Fagus sylvatica* L., *Fagus silvatica* L.)

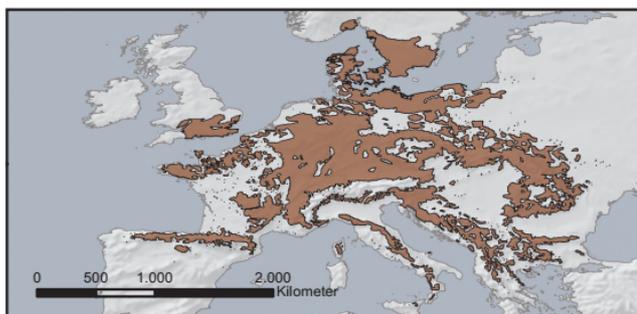


Abb. 4: Verbreitungsgebiet der Rot-Buche (*Fagus-sylvatica*). Quelle: EUFORGEN 2009, www.euforgen.org, (EPSG: 4326).

Die Nordgrenze der Buchenverbreitung verläuft etwa entlang der 13 °C Juli-Isotherme. Dabei kann die Rot-Buche Winterfröste bis -30 °C aushalten. Erst bei -35 °C treten verstärkt Schäden auf.

Das Verbreitungszentrum der Buche befindet sich im ozeanisch beeinflussten Westeuropa mit Mittelfrankreich, dem westdeutschen Hügel- und Bergland, dem Bayerischen Wald, dem Schweizer Jura und den Voralpen. Weiterhin gehören die Buchenwälder der Dinarischen Gebirgskette und der Südkarpaten zu diesen Gebieten.

Im südlichen und östlichen Teil ihres Verbreitungsgebietes ist die Buche in den Gebirgslagen zu finden, wobei sie bis ins Baltikum reicht (Abb. 4). In Italien ist sie auf dem gesamten Apennin zu finden. Im Norden und Westen hingegen dringt sie bis in das tiefere Hügelland und in die Ebene vor. In Spanien beschränkt ihr Vorkommen auf die Pyrenäen

und die nordwestlichen Gebirge der Iberischen Halbinsel.. Im Osten ist vor allem der Winterfrost der limitierende Faktor.

Nach der Bundeswaldinventur 2011 nimmt die Buche mit 1,3 Mio. ha 18,8 % der Waldfläche der ein und ist damit mit Abstand die bedeutendste Laubbaumart Westdeutschlands. Die 225.000 ha in den neuen Bundesländern entsprechen dort einem Waldflächenanteil von 9 %, sodass für das gesamte Bundesgebiet der mittlere Buchenanteil bei 15,4 % lag.

Wald-Kiefer (*Pinus sylvestris*, L., *Pinus silvestris*, L.)

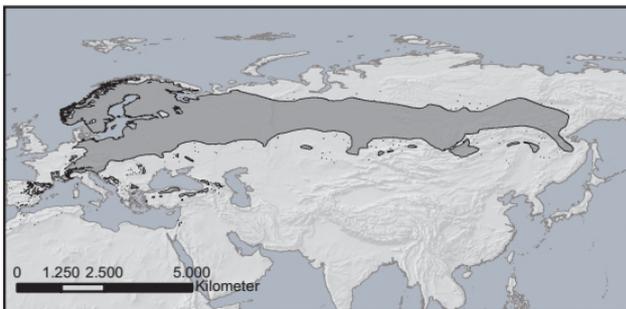


Abb. 5: Verbreitungsgebiet der Wald-Kiefer (*Pinus sylvestris*). Quelle: EUFORGEN 2009, www.euforgen.org, (EPSG: 4326).

Die Wald-Kiefer ist eine subkontinentale bis kontinentale Baumart. Ihr natürliches Areal erstreckt sich von Lappland bis Ostsibirien und damit fast bis zum Polarkreis. Im Süden reicht das Gebiet bis zur russischen Steppe, Kleinasien, dem Balkan und den Gebirgen Süd-

Spaniens (Abb. 5). In den Gebirgen kann sie bis zu einer Höhe von 2200 m (Graubünden, Schweiz) vorkommen. In Norwegen findet man sie in Höhenlagen zwischen 200 und 300 m über NN, im Kaukasus und in Spanien bis 2100 m über NN. In Südfrankreich ist sie von 700 bis 1200 m über NN und in Ungarn von 300 bis 800 m über NN zu finden.

Die Wald-Kiefer ist neben der Fichte der häufigste Waldbaum in Deutschland. In den alten Bundesländern macht sie mit 990.000 ha 11% der Waldfläche aus. In den neuen Bundesländern findet man die Wald-Kiefer auf ca. 38 % der Fläche (1,37 Mio. ha)². Daraus ergibt sich ein Flächenanteil von 22% für die deutschen Wälder. Ausgedehnte Wald-Kiefernwälder findet man in Brandenburg, in der Lüneburger Heide und in Mittel- und Oberfranken, dem Thüringer Wald, dem Odenwald sowie im Hessischen Buntsandsteingebirge. Im Fichtelgebirge ist die Wald-Kiefer bis 750 m ü. NN anzutreffen, im Erzgebirge bis 850 m, im Bayerischen Wald bis 900 m und im Schwarzwald bis 950 m.

² Bezogen auf die Bundeswaldinventur 3 (2010-2011)

Die Wald-Kiefer ist als mäßiger Wasserverbraucher bekannt und kommt in Mitteleuropa mit einem Jahresniederschlag von 500-600 mm aus. Ihre Trockengrenze liegt in der russischen Steppe bei etwa 400 mm Jahresniederschlag. An den Boden stellt sie keine hohen Ansprüche. Sie kommt mit bodensauren, nährstoffarmen und mäßig trockenen, sandigen Böden zurecht.

Trauben-Eiche (*Quercus petraea*, L.),

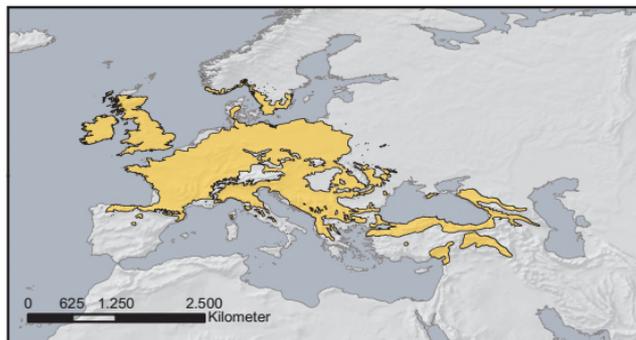


Abb. 6: Verbreitungsgebiet der Trauben-Eiche (*Quercus petraea*). Quelle: EUFORGEN 2009, www.euforgen.org, (EPSG: 4326).

Die Trauben-Eiche ist vor allem im subatlantisch-submediterranen Raum verbreitet. Ihr Areal umfasst fast ganz West- und Mitteleuropa sowie das südliche Skandinavien und große Teile Süd- und Südosteuropas (Abb. 6). Ihre Ostverbreitung ist wesentlich geringer als bei der Stiel-Eiche. Die Trauben-Eiche besiedelt

eher tiefere Lagen, hier vor allem die kollinen und unteren montanen Stufen. Sie bevorzugt luftfeuchte Lagen und milde Winter. Kontinentales Klima meidet sie.

An die Böden stellt die Trauben-Eiche keine besonderen Ansprüche. Sie kommt auf silikatischem als auch kalkhaltigem Ausgangsmaterial vor. Sie verträgt jedoch kein Stauwasser oder oberflächennahes Grundwasser. Daher sollten die Böden ausreichend drainiert sein. Der Bodenwasserhaushalt ist von hoher Bedeutung für die Differenzierung von Trauben- und Stiel-Eiche in Bezug auf ihre sympatrische Verbreitung, da die Stiel-Eiche, im Gegensatz zur Trauben-Eiche, auch auf nassen oder zeitweise gefluteten Standorten siedelt.

Stiel-Eiche (*Quercus robur*, L.)

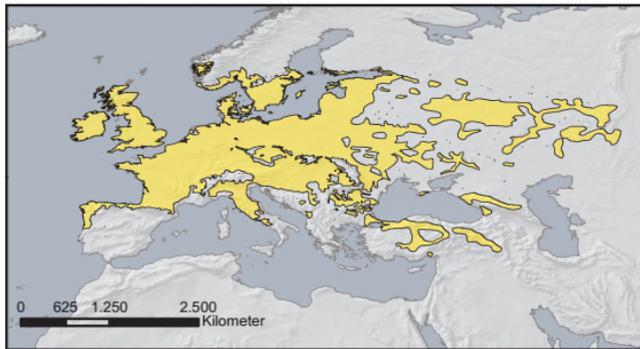


Abb. 7: Verbreitungsgebiet der Stiel-Eiche (*Quercus robur*). Quelle: EUFORGEN 2009, www.euforgen.org, (EPSG: 4326).

Die Stiel-Eiche ist wie die Trauben-Eiche vorwiegend in Mitteleuropa verbreitet. Sie bevorzugt gemäßigt kontinentales Klima und hat ein größeres Areal als Trauben-Eiche. Sie zieht sich vor allem weiter nach Osten. Ihre Ostgrenze reicht bis zur Steppengrenze (Ural) (Abb. 7). Sie ist ein typischer Baum der Auengebiete,

un wächst entlang der mittel-Europäischen Flüsse (Rhein, Save, Donau) und der bodenfeuchten Ebenen. Die Steileiche steigt nicht ganz so hoch wie Trauben-Eiche. In den Zentral-Alpen kommt sie bis 1000 m ü. NN (Trauben-Eiche bis 1800 m) vor. Außerdem hat sie höhere Ansprüche an Nährstoff- und Wasserverfügbarkeit als die Trauben-Eiche. Daher besiedelt sie auch bodenfeuchte und staufeuchte Standorte sowie anmoorige Böden.

Die Weiß-Tanne (*Abies alba*, MILLER)

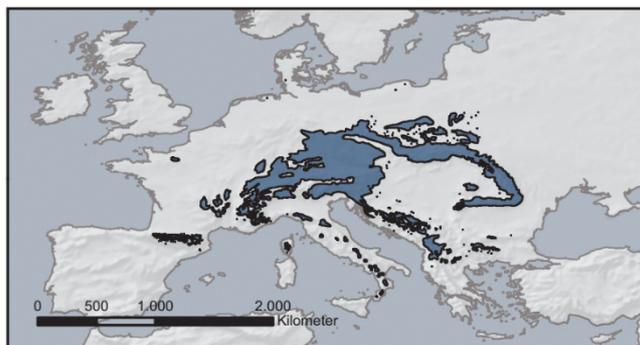


Abb. 8: Verbreitungsgebiet der Weiß-Tanne (*Abies alba*). Quelle: EUFORGEN 2009, www.euforgen.org, (EPSG: 4326).

In Deutschland findet man die Weiß-Tanne außer in den bayerischen Alpen (1500 m), dem Frankenwald sowie im Bayerischen Wald (400-1100 m) und im Schwarzwald (300-1300 m) auch im Thüringer Wald (500-800 m) und dem Erzgebirge. Über diesen Bereich hinaus kommt die Weiß-Tanne auch noch in

Kroatien, Bosnien, im Karpaten-Vorland sowie im Apennin bis nach Kalabrien vor (Abb. 8). In der vertikalen Verbreitung findet man die Weiß-Tanne im herzynisch-karpatischen Bereich in Lagen von 630 bis 1310 m ü. NN. Im westlichen Europa besiedelt sie in den französischen Seealpen und im Wallis Bereiche zwischen 100 und 2100 m ü. NN.

Allgemein ist zu beobachten, dass das Verbreitungsgebiet mit zunehmender Kontinentalität abnimmt. Die Weiß-Tanne gilt als frost- und kälteempfindlich und kann nur in Gebieten mit relativ hoher Sommerwärme und einer Vegetationszeit von mindestens 3 Monaten existieren. An den Boden stellt sie relativ hohe Feuchtigkeitsansprüche. Sehr gute Wuchsleistungen bringt sie auf frischen, nährstoffreichen und humosen Standorten. Mit trockenen Standorten kommt sie hingegen überhaupt nicht zurecht und meidet Südhänge. Dabei haben sich vor allem Standorte mit mehr als 1000 mm Jahresniederschlag als optimal erwiesen.

2 MATERIAL UND METHODEN

Auf Grundlage der Ergebnisse der drei Bundeswaldinventuren wurde die Zuwachsreaktion unter dem Einfluss des Klimas und Klimaveränderung für die Hauptwirtschaftsbaumarten Fichte (*Picea abies*), Rot-Buche (*Fagus sylvatica*), Wald-Kiefer (*Pinus sylvestris*), Traubeneiche (*Quercus petraea*), Stiel-Eiche (*Quercus robur*) und Weiß-Tanne (*Abies alba*) untersucht. Hierfür wurden statistische Modelle berechnet und Mittelwertvergleiche für den jährlichen Durchmesserzuwachs durchgeführt. Die erklärenden Variablen der Modelle waren Monatsmitteltemperatur, Niederschlagssumme und Trockenheitsindices der Vegetationsperiode (IV-IX). In multifaktoriellen Analysen wurden weitere erklärende Variablen wie z.B. Baumalter, nutzbare Feldkapazität des effektiven Wurzelraums berücksichtigt, die das Baumwachstum beeinflussen können.

Im ersten Abschnitt dieses Kapitels werden die Datengrundlage und die daraus abgeleiteten Variablen vorgestellt. Der darauf folgende Teil beschreibt die methodische Vorgehensweise der Datenprozessierung sowie die verwendeten statistischen Verfahren.

2.1 Datengrundlage

2.1.1 Klimadaten

Um die Zuwachsreaktionen der Hauptwirtschaftsbaumarten im Zusammenhang mit den klimatischen Standortbedingungen quantifizieren zu können, war es zunächst erforderlich, geeignete Klimadaten zu finden, die die räumlichen sowie zeitlichen Voraussetzungen erfüllten. Räumlich mussten sie das gesamte Untersuchungsgebiet beziehungsweise die Probepunkte (Trakte) der Waldinventuren abdecken. Auf zeitlicher Ebene war es erforderlich, dass die Daten zum einen für den gesamten Untersuchungszeitraum von 1970 bis 2011 verfügbar waren, da zur Analyse des Klimas und der Klimaveränderung drei Untersuchungsperioden betrachtet wurden. Die erste Periode P0 von 1970 bis 1986 lag vor der ersten Bundeswaldinventur und diente als Referenzperiode. P1 entsprach dem Zeitraum zwischen erster und zweiter BWI von 1989 bis 2001 und P2 umfasste den Zeitraum zwischen zweiter und dritter BWI von 2002 bis 2011. Zum zweiten mussten die Klimadaten in einer zeitlichen Auflösung vorliegen, die es ermöglichte, aus ihnen das Klima der Vegetationsperiode zu berechnen. Die

Vegetationsperiode wurde in dieser Untersuchung für den Zeitraum von April bis September definiert, da unter anderem Menzel und Fabian (1999, 2001) fanden, dass in den letzten 40 Jahren in Europa die phänologischen Frühjahrsphasen früher eingesetzt hatten. Dies führte auch zu einer Temperatur bedingten Verlängerung der Wachstumsperiode und parallel zu einem Anstieg des Durchmesserzuwachses (Hasenauer et al. 1999).

Letztlich erfüllten nur die Daten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) und der Climate Research Unit (CRU) oben genannte Kriterien. Beide Anbieter stellten die Daten für Deutschland im Rasterformat in hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung und für den erforderlichen Zeitraum zur freien Nutzung bereit. Da der Datensatz des DWD auf Grundlage von etwa 500 Messstationen basierte und somit eine genauere räumliche Auflösung lieferte als die Klimadaten der CRU, wurden die Daten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) für die Analysen gewählt.

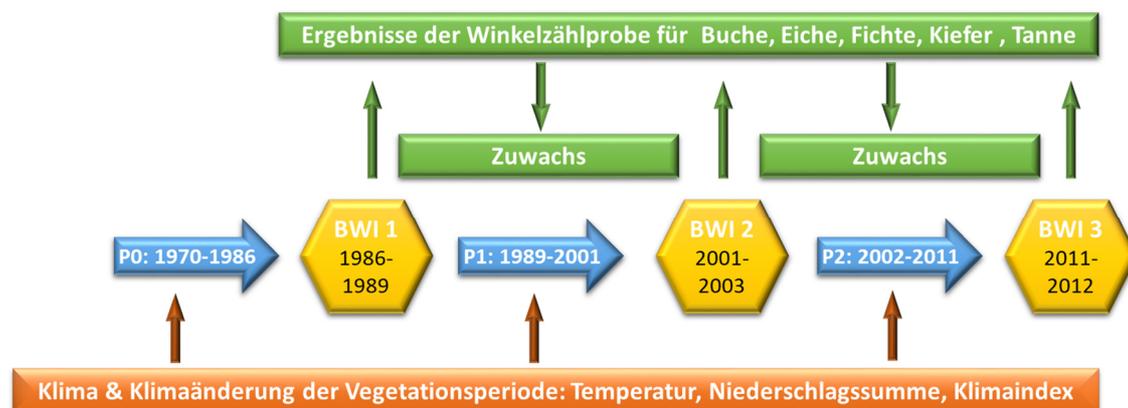


Abb. 9: Zeitachse der Waldinventuren und Einteilung der Perioden P0, P1 und P2 für die Klimafaktoren und Zuwachspenoden.

2.1.1.1 Räumliche und zeitliche Auflösung

Bei den verwendeten Klimadaten handelte es sich um Klimaraster im .ASCII –Format. Die Messwerte der Stationen wurden hierfür vom DWD in ein Raster interpoliert, das ganz Deutschland abdeckt. Es hatte eine Ausdehnung von 654 Spalten und 866 Zeilen mit einer Zellgröße von 1x1 km. Das Gitternetz war im Gauß-Krüger Koordinatensystem

(EPSG:31467) an der rechten oberen Ecke bei $x=3280414.711633467$ und $y=5237500.62890625$ eingehängt (Müller-Westermeier 1995). Die Interpolation der Klimawerte beruhte auf einer inversen Distanzgewichtung, einem nicht statistischen Verfahren, das zur einfachen Interpolation der räumlichen Abhängigkeit georeferenzierter Daten diente. Weiterhin erfolgte eine Höhenregression, um die Klimawerte für die jeweiligen Höhenstufen zu berechnen (Müller-Westermeier 1995).

Der DWD stellt Klimadaten für einen Zeitraum von 1881 bis dato in unterschiedlichen zeitlichen Auflösungen zur Verfügung. Für die Analysen wurden Klimaraster mit einer monatlichen Auflösung gewählt, da sich aus ihnen das Klima der Vegetationsperiode für den betrachteten Zeitraum einfach berechnen ließ.

2.1.1.2 Klimavariablen

Die zentralen Klimafaktoren für Pflanzenwachstum waren Temperatur, Strahlung und Niederschlag. Für die Faktoren Temperatur und Niederschlagssumme lagen Daten in der erforderlichen räumlichen und zeitlichen Auflösung vor, während Daten für die Globalstrahlung erst seit 1990 zur Verfügung standen. Daher erfolgten die klimaabhängigen Zuwachsuntersuchungen unter Berücksichtigung der beiden Faktoren Temperatur und Niederschlagssumme

2.1.1.3 Berechnung der Klimavariablen

Für die Berechnung der mittleren Temperatur der Vegetationsperiode wurden die monatlichen Temperaturen von April bis September aller Jahre addiert und durch die Anzahl der Monate einer Periode dividiert.

Um die Niederschlagssummen der Vegetationszeit einer Periode zu berechnen, waren zwei Schritte erforderlich. Zuerst wurden die monatlichen Niederschlagssummen April bis September eines einzelnen Jahres addiert und somit die Niederschlagssumme einer Vegetationsperiode berechnet. Im folgenden Schritt wurde für jede der drei Untersuchungsperioden (P1, P2, P3) aus den zuvor berechneten Werten die mittlere Niederschlagssumme der Vegetationszeit berechnet.

2.1.1.4 Trockenheitsindices

2.1.1.4.1 De Martonne Index

Aus den beiden Faktoren Temperatur und Niederschlagssumme wurden weitere Klimaindices abgeleitet, da es sinnvoll sein kann, die Niederschlagsmenge gemeinsam mit anderen klimatologischen Faktoren zu betrachten. So kann beurteilt werden, welche Relevanz der Niederschlag für Pflanzenwachstum haben kann (Müller-Westermeier 1995). Eine hierfür geeignete und in der Praxis verwendete Größe war der Trockenheitsindex nach Martonne (1926), der sich aus den Eingangsvariablen Temperatur und Niederschlagssumme berechnen lässt (Gleichung 1). Der Korrekturfaktor von 10 im Nenner der Gleichung sollte verhindern, dass der Index negative Werte erzeugt.

$$dMI = \frac{N}{(T + 10)} \quad [1]$$

Für die Betrachtung der Trockenheitsindices während der Vegetationsperiode (dMI_{veg}) wurden Monatsmitteltemperatur und Niederschlagssumme der Vegetationsperiode mit dem Quotienten aus der Anzahl der Tage eines Jahres und der Anzahl der Tage der Vegetationsperiode multipliziert (Gleichung 2).

$$dMI_{veg} = \frac{N_{veg}}{(T_{veg.periode} + 10)} * \frac{n_{Tage\ Jahr}}{n_{Tage\ veg}} \quad [2]$$

Dadurch ergeben sich Werte von 10 bis > 100, wobei 10 extrem trockene Bedingungen anzeigt und Werte >60 extrem humide Bedingungen (Tab. 1). Arten mit geringer Toleranz gegenüber Trockenheit wie die Fichte zeigen Stressanzeichen bei Werten unter 25. Bei trockenheitstoleranteren Arten, wie Wald-Kiefer oder Eichen, ist der jeweilige kritische dMI-Wert etwas geringer (Klap 2000).

Tab. 1: Ariditätsstufen des de Martonne Index nach Klapp (2000)

DMI	Ariditätsstufe
<15	trocken- arid
15 - <25	Semiarid
25- <30	mäßig arid
30 - <35	leicht humid
35 - <40	mäßig humid
40 - < 50	Humid
50 - ≤60	sehr humid
>60	extrem humid

2.1.1.4.2 Harlfinger - Knees Trockenheitsindex (HKI)

Eine häufig in der Vegetationsökologie verwendete Trockengrenze ist die von Walter und Lieth (1964) formulierte Gleichung:

$$N = 3 * T \quad [3]$$

Harlfinger und Knees (1999) leiteten daraus den nach ihnen benannten Trockenheitsindex, den Harlfinger-Knees Index (HKI) ab (Gleichung 4). Er basiert wie der dMI auf den Eingangsgrößen Temperatur und Niederschlagssumme mit dem Unterschied, dass beim HKI das Verhältnis von N und T umgekehrt ist.

$$HKI = \frac{3*T}{N} \quad [4].$$

Daher bedeuten hier größere Indexwerte Trockenheit während kleine Werte feuchte Bedingungen anzeigen. Harlfinger & Knees (1999) gaben für trockene Monate einen Grenzwert von $HKI > 1,5$ an. Legt man die Beziehung von Walter & Lieth (1960) mit $N = 3 \cdot T$ als Trockenheitsgrenze zu Grunde, gilt ein Monat bereits bei $HKI > 1$ als trocken (Döring et al. 2011). Nach Schreiber (1973) kann man die HKI-Werte durch 6 (Monate) teilen, um die Trockenheitsgrenze für die Vegetationsperiode zu erhalten. Daraus folgt $HKI > 1,5 / 6 = 0,25$ bzw. $HKI > 1 / 6 = 0,16$ als Grenzwert für die forstliche Vegetationsperiode.

2.1.1.4.3 Relative Häufigkeit von Trockenmonaten (rHTM)

Die zuvor genannten Klimafaktoren bilden das Klima der gesamten Vegetationsperiode ab. Dadurch bleiben saisonale Effekte, wie Trockenperioden, unberücksichtigt. Aber gerade solche Witterungsereignisse können sich deutlich auf das Wuchsverhalten auswirken. Um diese saisonalen Extreme einzubeziehen, wurde ein weiterer Trockenheitsindex abgeleitet: die *relative Häufigkeit von Trockenmonaten* (rHTM). Dieser

Index basierte auf der Anzahl trockener Monate während einer Untersuchungsperiode. In Anlehnung an Klap (2000) galt ein Monat bei einem Schwellenwert von $dMI < 25$ (Gleichung 5) als arid. Mit dem Werkzeug ‚*Lower than Frequency*‘ aus dem Toolset ‚*Lokal*‘ in *ArcGIS 10.5* wurde für jede Rasterzelle die Anzahl der Monate mit einem dMI -Wert < 25 einer Untersuchungsperiode gezählt und in einem Ausgaberraster zusammengefasst. Da die drei Perioden unterschiedlich lange Zeiträume hatten (vgl. Kap. 2.3.1), war ein direkter Vergleich der Werte nicht zielführend. Durch Umrechnung der absoluten Werte in *relative Häufigkeiten der Trockenmonate* in Bezug auf die Periodendauer (Gleichung 7) konnte eine gute Vergleichbarkeit der Indices erreicht werden.

$$dMI_{Monat} = \frac{NS_{Monat}}{(10 + T_{Monat})} * \frac{n_{Tage\ Jahr}}{n_{Tage\ Monat}} \quad [5]$$

$$HTM = \sum_{n=0}^i \text{Monate } dMI < 25 \quad [6]$$

$$rHTM = \sum_{n=0}^i \frac{HTM}{n_{Monate\ Periode}} \quad [7]$$

2.2 BWI-Daten und Durchmesserzuwachs

Für die Untersuchung von klimabedingten Zuwachsreaktionen eignen sich prinzipiell direkte Faktoren wie Durchmesser- und Höhenzuwachs oder daraus abgeleitete Faktoren wie Grundflächenzuwachs, relativer Durchmesser- beziehungsweise Grundflächenzuwachs oder Volumenzuwachs.

Höhenwachstum hat den Vorteil gegenüber dem Durchmesserzuwachs, dass dieser nicht oder nur in geringem Maße durch die Bestandesdichte beeinflusst wird (Dobbertin 2006). Die Baumhöhe ist im Bestand jedoch recht schwierig zu erfassen und die Messergebnisse sind oft mit einem größeren Messfehler behaftet als Durchmessermessungen, die sich millimetergenau abnehmen lassen.

Aus forstwirtschaftlicher Sicht sind besonders Grundflächen- und Volumenzuwachs von Interesse, da sie zur Abschätzung der Ertragsentwicklung verwendet werden. Der Grundflächenzuwachs steht in Verhältnis zum Ausgangsdurchmesser, wodurch eine direkte Zuwachsreaktion verzerrt wird. Beim Volumenzuwachs kommt mit der Baumhöhe

noch ein weiterer Faktor hinzu, der die Genauigkeit der Zuwachswerte vermindert, da die Baumhöhe im Bestand oft nicht präzise erfasst werden kann.

Der Durchmesser- oder Radialzuwachs kann als direkte Größe der kambialen Zellteilung des sekundären Dickenwachstums betrachtet werden. Daher gilt er als ein besonders geeigneter Indikator für ökologische Rahmenbedingungen (Hoffmann 2019) .

Durchmesserzuwächse dieser Studie sowie weitere baum- und standortbezogene Daten basierten auf den Erhebungen der drei Bundeswaldinventuren 1986 bis 1989 (BWI1), 2001 bis 2002 (BWI2) und 2011 bis 2012 (BWI3). In dieser Untersuchung wurden alle Trakte unabhängig ihrer Verdichtung berücksichtigt, das heißt, es wurden auch die Daten der verdichteten Trakte einbezogen. Die Inventurdaten wurden vom Johann Heinrich von Thünen-Institut zur Verfügung gestellt und lagen zu freien Nutzung als Microsoft® Access Datenbanken vor.

Grundlage der Zuwachsanalysen dieser Studie waren Bäume des Hauptbestandes, die in den Inventuren mit der Winkelzählprobe mit Zählfaktor 4 erfasst wurden und einen BHD von mindestens 7 cm aufwiesen. Für jeden mit der Winkelzählprobe aufgenommenen Baum wurde zusätzlich der BHD gemessen. Die Ergebnisse der Kluppungen lagen in der Tabelle *WZP_4* der Inventurdatenbanken vor.

Um die Ergebnisse der drei Inventuren miteinander berechnen und vergleichen zu können, wurden die Datentabellen der *WZP_4* der drei Inventuren in einer neuen Datenbank zusammengeführt. Die Verknüpfung der Datensätze erfolgte über die Attribute Traktnummer (TNR), Ecknummer (Enr) und Baumnummer (Bnr).

Mit der Verknüpfung der Daten ging gleichzeitig die Selektion für die Hauptbaumarten Gemeine Fichte, Rot-Buche, Wald-Kiefer, Stiel-, Trauben-Eiche sowie Weiß-Tanne einher.

2.2.1 Berechnung der Durchmesserzuwächse aus den BWI-Daten

Der Durchmesserzuwachs war als Wert nicht direkt im Datensatz der BWI enthalten und musste aus den gemessenen BHD–Werten berechnet werden [Gleichung 8]. Da jedem Baum eine Identifikationsnummer zugeordnet war, konnte über den Zeitraum der Inventuren der Zuwachs auf Einzelbaumebene für zwei Zuwachsperioden BWI1 zu BWI2 (P1) sowie BWI2 zu BWI3 (P2) berechnet werden.

$$DZ_{\text{Periode } xy} = BHD_y - BHD_x \quad [8]$$

Der zeitliche Abstand zwischen den Wiederholungsmessungen der Inventuren an den einzelnen Trakten war unterschiedlich lang. Zwischen den Wiederholungsmessungen von BWI1 und BWI2 lagen 143 bis 198 Monate und von BWI2 zu BWI3 101 bis 145 Monate. Aufgrund dieser Tatsache war ein direkter Vergleich der Durchmesserzuwächse der gesamten Zuwachsperiode nicht sinnvoll. Durch die Berechnung der jährlichen Zuwächse (jDZ) für den Einzelbaum [Gleichung 9] konnte eine Vergleichbarkeit der Werte erreicht werden.

$$jDZ = (BHD_y - BHD_x) \times \frac{12}{m} \quad [9]$$

jDZ: jährlicher Durchmesserzuwachs
m: Monate

2.3 Datenselektion

2.3.1 Räumliche Selektion

Zum Zeitpunkt der BWI1 war Deutschland noch in einen West- und Ostteil getrennt, die BWI1 erfolgte daher ausschließlich in Westdeutschland. Erst die beiden folgenden Inventuren BWI2 und BWI3 fanden für Gesamtdeutschland statt. Da diese Studie das Durchmesserwachstum auf Einzelbaumbasis untersuchte und somit nur diejenigen Bäume berücksichtigte, die in allen drei Waldinventuren erfasst wurden, bezog sich das Untersuchungsgebiet nur auf die "Alten Bundesländer". Diese nahmen mit einem Waldanteil von etwa 70% den größten Teil der der Waldfläche Deutschlands ein. Die kontinental geprägten Standorte Ostdeutschlands blieben dadurch zwar unberücksichtigt, jedoch konnte so eine zweite Zuwachsperiode in die Untersuchung einbezogen und ein längerer Zeitraum betrachtet werden.

2.3.2 Plausibilität und Selektion

Nach Berechnung der jährlichen Durchmesserzuwächse ergaben sich für etwa 2,5% der insgesamt 81.609 selektierten Bäume nicht plausible Zuwachswerte. Dies waren in

einigen Fällen negative Zuwächse oder auch unrealistisch hohe Zuwächse ($>40 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$). Da der Durchmesserzuwachs in der Regel nicht negativ sein kann, war davon auszugehen, dass entweder bei der Zuordnung der Bäume während der Feldaufnahmen der Folgeinventuren 2 und 3 diese fälschlicherweise als Wiederholungsbaum ausgezeichnet wurden oder ein Messfehler vorlag. Um die Wahrscheinlichkeit zu erhöhen, in der Untersuchung nur Wiederholungsbäume zu berücksichtigen, wurden für den Durchmesserzuwachs das obere Quartil $p=0,09$ und das untere Quartil $p=0,01$ als Grenzwert eingeführt und die Werte unterhalb beziehungsweise oberhalb dieser Grenze verworfen. Die Selektion erfolgte baumartenspezifisch.

2.3.3 Minderung des Effekts von Co-Variablen

2.3.3.1 Konkurrenz

Konkurrenz kann das Zuwachsverhalten der Bäume eines Bestandes erheblich beeinflussen und eine klimabedingte Zuwachsreaktion überlagern. Um diesen Effekt im Vorfeld zu verringern, wurde die soziale Stellung der Bäume berücksichtigt und gezielt die vorherrschenden und herrschenden Baumarten verwendet, da hier die Konkurrenzwirkung durch Nachbarn vergleichsweise gering ist. In den Waldinventuren erfolgte die Klassifizierung der Baumklassen im Hauptbestand nach Kraft (1884): 1 = vorherrschender Baum, 2 = herrschender Baum, 3 = gering mitherrschend, 4 = beherrscht. Die Baumklasse = 5 ist in der BWI nicht berücksichtigt, da diese Bäume nicht zum Hauptbestand zählen (BMELV 2011). Ein Vergleich (Wilcoxon-Test ($p=0.05$)) der Durchmesserzuwächse der herrschenden Baumklassen 1 und 2 mit denen der Klassen 3 und 4 zeigte für die Bäume der Klassen 1 und 2 einen höheren Zuwachs als für Bäume der Klassen 3 und 4 (Abb. 10). Es war anzunehmen, dass dieser Effekt auf den Einfluss von

Konkurrenz zurückzuführen war. Daher wurden für die weitere Untersuchung Bäume der Klassen 3 und 4 aus dem Datensatz entfernt.

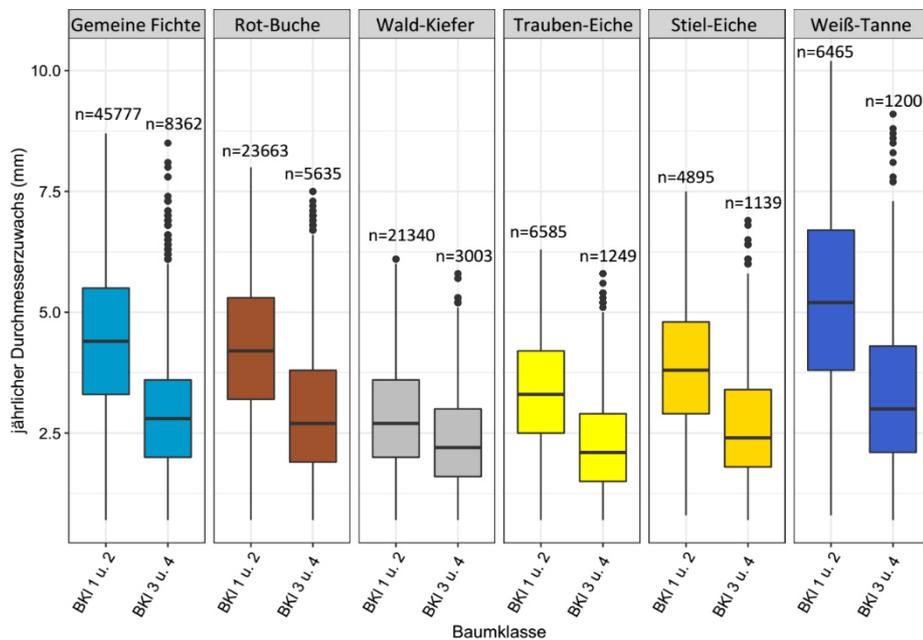


Abb. 10: Boxplots der jährlichen Durchmesserzuwächse. Vergleich der Zuwächse zwischen den Baumklassen 1 und 2 mit 3 und 4 der sechs Hauptbaumarten. BKl= Baumklasse nach Kraft (1884).

2.3.3.2 Baumalter

Die Plausibilitätsprüfung des Faktors Baumalter erfolgte durch die Berechnung der Altersänderung zwischen den Inventuren (Gleichung 10). Gemäß der Aufnahmeanweisung für die dritte Bundeswaldinventur (BMELV 2011) wurde das Baumalter aus der vorherigen Inventur fortgeschrieben. Wenn die visuelle Altersschätzung ein erheblich abweichendes Alter vermuten ließ ($>1/3$ der Altersangabe) erfolgte eine Korrektur (BMELV 2011). Die Überprüfung der Altersangaben der Bäume aller drei Inventuren ergab in einigen Fällen Unstimmigkeiten hinsichtlich der Plausibilität. Bei 1,5 % der Bäume war die Altersveränderung zwischen den Inventuren negativ, das heißt, dass bei diesen Bäumen in den BWI-Grunddaten das Alter in P2 geringer angegeben war als in P1. Ebenso war für 1,5 % der Bäume ein Alter angegeben, das deutlich größer war, als die Zeitspanne zwischen P1 und P2. Diese Stichproben wurden verworfen, um die

Plausibilität des Datensatzes zu verbessern³. Diese strenge Datenselektion diente zur Verminderung systematischer Fehlerquellen.

$$\text{Alterung}_{\text{Periode } xy} = \text{Alter}_y - \text{Alter}_x \quad [10]$$

Die Berücksichtigung der Bäume, die in allen drei Inventuren aufgenommen wurden, hatte den Vorteil, dass man so auf Einzelbaumbasis die Zuwachsreaktion über den Gesamtzeitraum erfassen konnte. Der Nachteil bestand darin, dass bei der Betrachtung von Alters- und Durchmesserklassen Neuzugänge, also Bäume die von einer Inventur zur nächsten das Kriterium $\text{BHD} > 7$ erfüllten, unberücksichtigt blieben. Dadurch verschob sich auch die Altersverteilung in den Altersklassen, sodass von Inventur zu Inventur die Anzahl

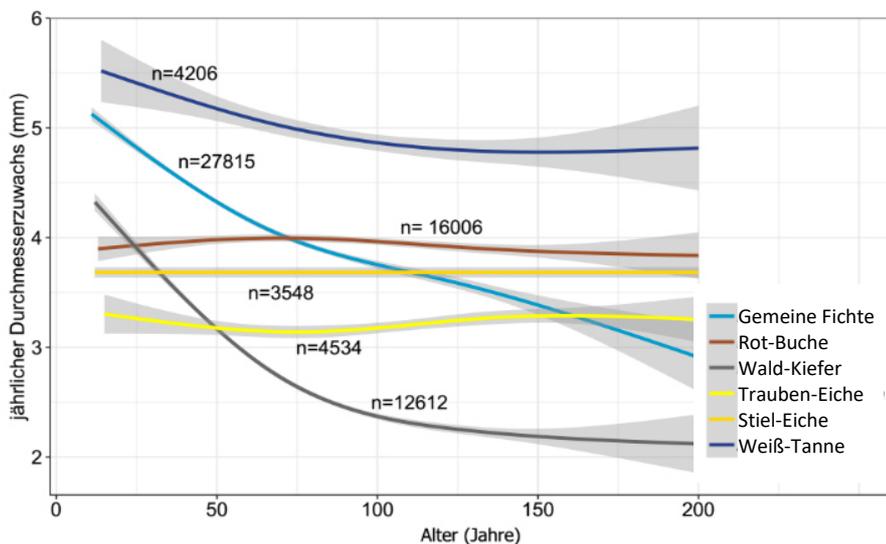


Abb. 11: Regressionskurven des jährlichen Durchmesserzuwachses in Abhängigkeit des Baumalters für den Zeitraum von BWI 1 zu BWI 3. Die Regressionsen wurden mit gam-Modellen berechnet. Die grauen Bereiche um die Regressionslinien sind die Konfidenzintervalle. n= Anzahl der Bäume. Das Alter wurde bei 200 Jahren begrenzt.

der Bäume in den unteren Altersklassen geringer wurde. Ein weiterer Faktor, der bei der Betrachtung der klimabedingten Zuwachsreaktion störenden Einfluss nehmen konnte, war die altersabhängige Dynamik von Baumwachstum. Bei einem sehr hohen Stichprobenumfang kann man davon ausgehen, dass sich die altersbedingten Wuchsunterschiede ausgleichen. Allerdings zeigte die Analyse von Zuwachskurven insbesondere bei den Nadelbäumen einen regressiven Verlauf, der etwa in den ersten 40

³ Die Abweichungen der Altersdifferenzen traten vorwiegend von P1 zu P2 auf, während die Altersangaben von P2 zu P3 plausible Ergebnisse lieferten.

Lebensjahren recht steil verlief und mit zunehmendem Alter abflachte (Abb. 11). Bei der Wald-Kiefer war die Alters-Zuwachs-Kurve am deutlichsten ausgeprägt. Die Weiß-Tanne zeigte von den drei Koniferen den geringsten Alterstrend. Bei ihr waren dafür die Konfidenzintervalle in frühem Alter bis 50 Jahre und im fortgeschrittenen Alter ab 150 Jahren größer als bei Gemeiner Fichte und Wald-Kiefer. Die Bäume über 40 Jahren hatten zwar immer noch diesen abnehmenden Zuwachstrend, er war aber deutlich schwächer als bei jüngeren Bäumen und verlief annähernd linear.

Laubbäume zeigten über die gesamte Altersspanne ein fast lineares Zuwachsverhalten. Bei hohen Lebensaltern ab etwa 150 Jahren nahm die Datenverfügbarkeit meist deutlich ab und die Streuung der Daten zu. Um den Einfluss des Baumalters auf Zuwachsreaktionen zu begrenzen, wurden für die weiteren Zuwachsuntersuchungen nur Bäume im Alter von 40 bis 140 Jahren berücksichtigt.

Nach der Datenselektion fanden mit rund 69.0000 Bäumen etwa 60 % der Bäume (im Vergleich zu BWI 1) Verwendung bei der Datenanalyse (Tab. 2).

Tab. 2: Anzahl der in den Inventuren erfassten Hauptwirtschaftsbaumarten, sowie die Anzahl der für die Berechnungen verwendeten Bäume nach der Datenbereinigung. Code nach BWI ist der in den Waldinventuren verwendete Numerische Code für die Baumarten.

Baumart	Code nach BWI	Kürzel nach BWI	BWI 1	Anzahl BWI 2	BWI 3	BWI 1 bis 3 (nach Prüfung)
Gemeine Fichte	10	pa	53.702	127.645	132.172	26.035
Rot-Buche	100	fs	21.833	77.687	138.061	14.071
Wald-Kiefer	20	ps	25.260	59.223	71.683	16.466
Trauben-Eiche	111	qp	6.478	17.780	23.774	5.108
Stiel-Eiche	110	qr	5.388	13.586	20.807	3.938
Weiß-Tanne	30	aa	6.568	10.844	12.168	3.465
Gesamt			119.229	306.765	398.665	69.083

2.3.4 Überprüfung der statistischen Verteilung

Um die für die Zuwachsanalysen passenden statistischen Verfahren wählen zu können, war es erforderlich, die Verteilung der Daten zu prüfen. Dies geschah durch Sichtung der Häufigkeitsverteilung und der Quantil-Diagramme (QQ-Plots) auf visuelle Weise (Abb.5) sowie dem Anderson-Darling-Normalverteilungstest zum Signifikanzniveau $p < 0.05$. Die Häufigkeitsverteilungen deuteten bei allen sechs Baumarten auf eine leicht rechtsschiefe Verteilung hin (Abb. 12, rechts). Sowohl die visuellen Verfahren (Abb. 12) als auch der Anderson-Darling-Test bestätigten, dass die Durchmesserzuwächse die Voraussetzungen für Normalverteilung nicht erfüllten. Logarithmieren der Daten erbrachte keine

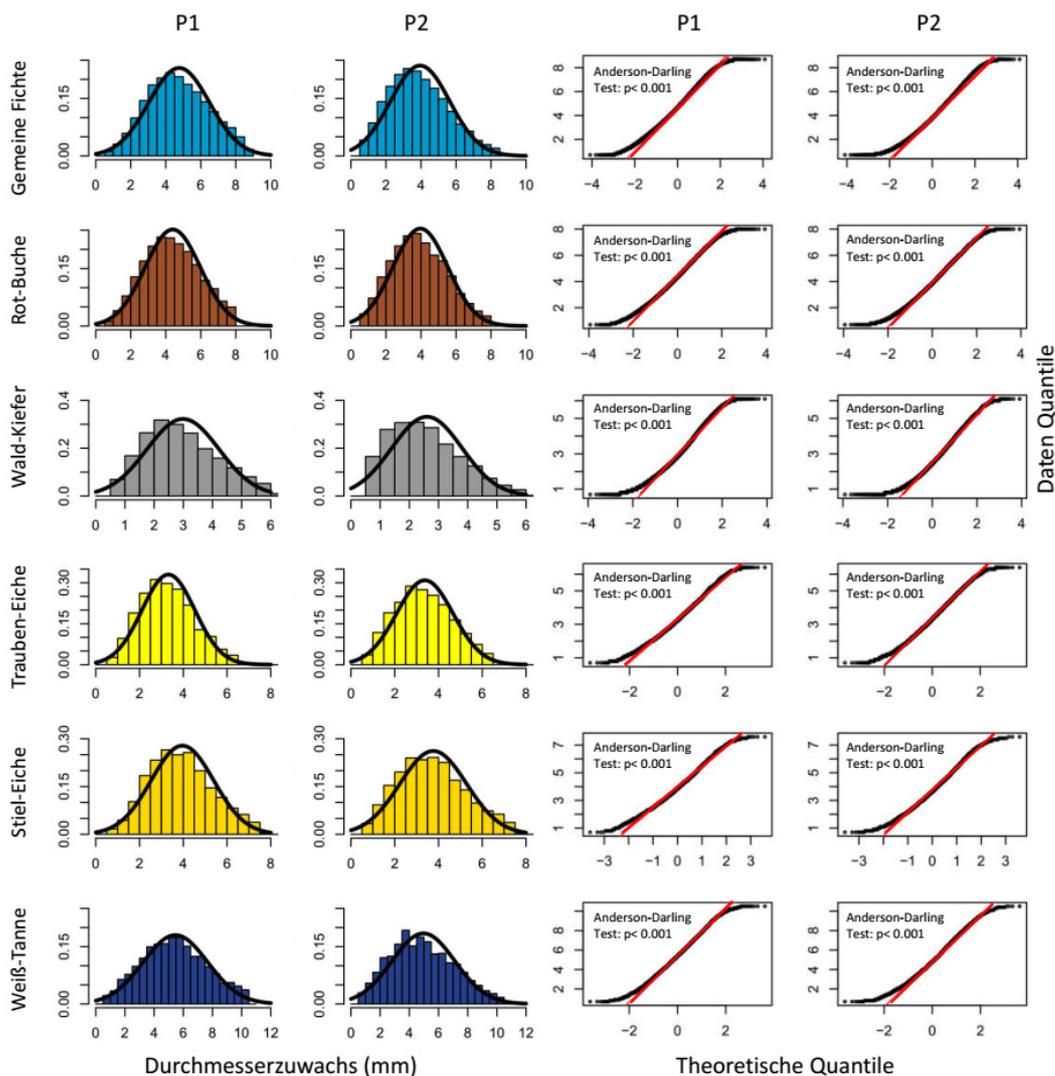


Abb. 12: Überprüfung der Normalverteilung durch Häufigkeitsverteilungen (links) und QQ-Plots (rechts). Die schwarzen Kurven in den Häufigkeitsverteilungen entsprechen den Normalverteilungskurven. Bei den QQ-Plots sind die schwarzen Punkte die Quantile, die roten Linien zeigen die Normalverteilungsgeraden. P1, P2= Zuwachsperiode.

nennenswerte Annäherung an die Normalverteilung, sodass mit untransformierten Werten gerechnet wurde.

2.3.5 Vergleich der Durchmesserzuwächse beider Zuwachsperioden

Die Durchmesserzuwächse wurden aus den BHD-Messungen der Waldinventuren auf Einzelbaumbasis berechnet und waren somit voneinander abhängig. Daher wurde für den Vergleich, ob sich die Zuwächse der Perioden P1 und P2 unterscheiden, der Wilcoxon-Test verwendet. Der Test zeigte für 5 der 6 Baumarten einen signifikanten Unterschied ($p < 0,001$) des Zuwachses zwischen den beiden Inventurzeiträumen (Tab. 3). Nur für die Trauben-Eiche war das Resultat des Wilcoxon-Tests nicht eindeutig ($p = 0,044$). Aufgrund der Ergebnisse des Wilcoxon-Tests wurden in den folgenden Untersuchungen die

Tab. 3: Ergebnisse des Wilcoxon-Tests zur Überprüfung der unterschiedlichen Durchmesserzuwächse in den Zuwachsperioden (Signifikanzniveau $p = 0,05$). $\overline{aDZ_P1}$; $\overline{aDZ_P2}$ =mittlerer jährlicher Durchmesserzuwachs der Periode 1 bzw. Periode 2.

Baumart	$\overline{aDZ_P1}$	$\overline{aDZ_P2}$	V	p-Wert	N
Gemeine Fichte	4.4	3.5	79689000	< 0,001	27855
Rot-Buche	4.0	3.6	287160000	< 0,001	16028
Wald-Kiefer	2.8	2.4	52493000	< 0,001	12633
Trauben-Eiche	3.1	3.1	4537700	0.04433	4585
Stiel-Eiche	3.6	3.4	3743600	< 0,001	3602
Weiß-Tanne	5.0	4.5	5218900	< 0,001	4244

Zuwachsdaten für die einzelnen Zuwachsperioden zwischen den Inventuren (BW11 zu BW12 und BW12 zu BW13) separat betrachtet, da die Zuwachsunterschiede in den beiden Perioden als eine Folge der Klimaänderung in Betracht kommen.

2.4 Zusammenführung der Waldinventur-, Klima- und Bodendaten

Für die weitere Analyse von Waldinventur-, Klima- sowie Bodendaten, war es erforderlich, die Datensätze miteinander zu verbinden. Die Zusammenführung der Datensätze erfolgte mit ArcGIS 10.5 mit dem Geoverarbeitungswerkzeug *Überschneiden (Intersect)*. Als Bezugspunkt diente die Mittelpunktordinate der Traktraster der BWI. Dadurch wurde der Klimawert beziehungsweise Bodenwert der im Zentrum des Traktes lag, diesem Trakt

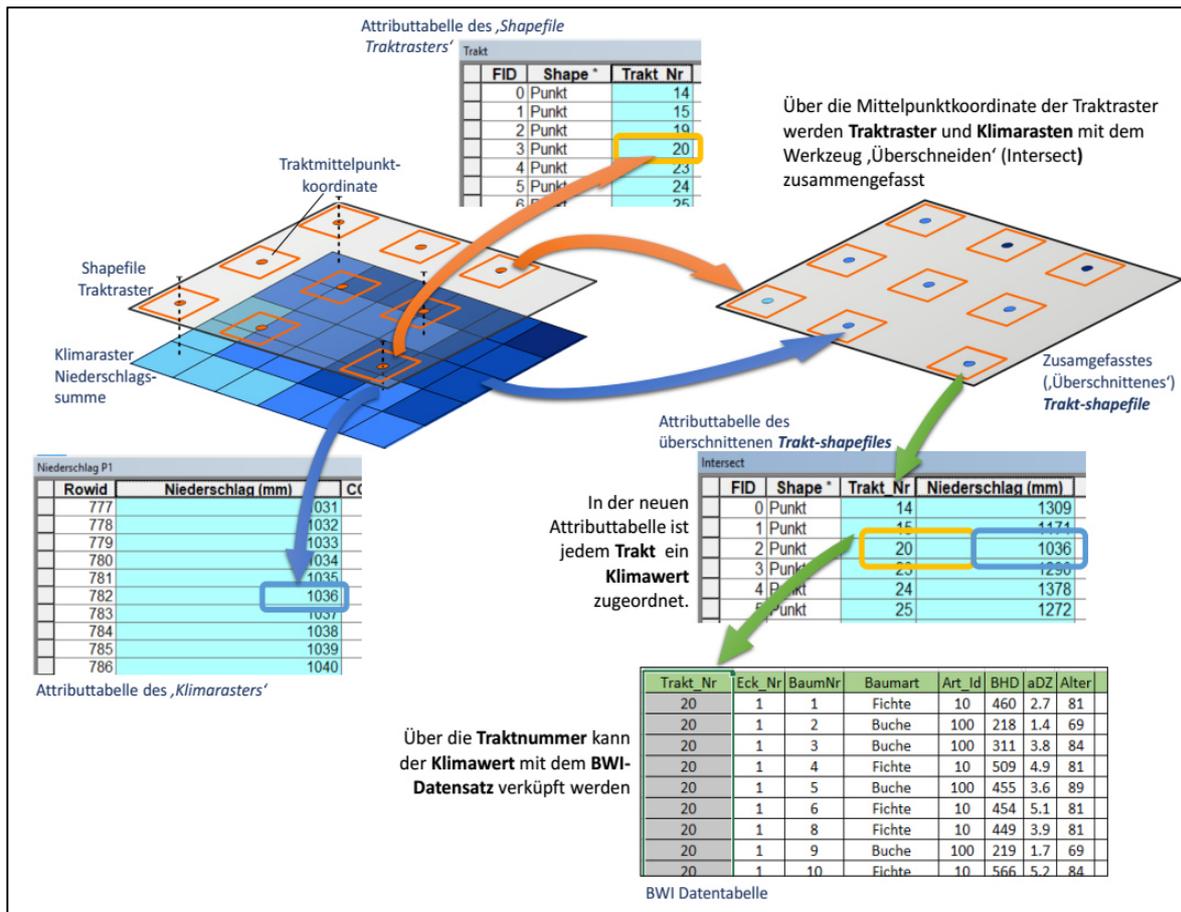


Abb. 13: Zusammenführung ('Überschneidung') von Klima- und BWI-Daten am Beispiel der Niederschlagssumme. Über die Mittelpunkte des BWI-Traktrasters erfolgt die Überschneidung von Klima- und Traktraster. Dadurch wird jeder Traktnummer der Klimawert zugeordnet, der deckungsgleich mit der Mittelpunktkoordinate des Traktrasters ist. Über die Traktnummer können die Klimadaten mit BWI-Daten verknüpft werden.

zugewiesen, sodass für jeden Trakt ein Wert für Temperatur, Niederschlag, Klimaindex sowie Bodeneigenschaft vorlagen (Abb. 13). Durch die Vereinigung der Traktraster mit dem Klimaraster entstand eine neue Attributtabelle die neben den Klima- und Bodenwerten auch die Traktnummer der BWI enthielt. Über diese wurden für die weitere Bearbeitung die Klimadaten mit den Inventurdaten verknüpft. Dazu wurde die Attributtabelle in die Access-Datenbank übernommen und mittels Selektionsabfrage mit den Inventurdaten zusammengeführt.

2.5 Datenanalyse

Die Datenauswertung dieser Studie gestaltete sich als iterativer Prozess, da Zwischenergebnisse und Erkenntnisse der Analyse dazu führten, dass Rahmenbedingungen, Berechnungseinstellungen und Schwellenwerte immer wieder zu verändern und anzupassen waren.

Die Datenanalyse erfolgte auf vier Ebenen. Ebene 1 umfasste die deskriptive Analyse der Klima und Waldinventurdaten, bei der die statistischen Lageparameter der Klima- und Inventurdaten (Kapitel 2.6.1) betrachtet wurden.

In der zweiten Ebene (Kapitel 2.6.2 bis 2.6.4) wurden die Zuwachsreaktionen der Hauptbaumarten in Abhängigkeit von Mitteltemperatur, Niederschlagssumme und Trockenheitsindices der Vegetationsperiode sowie der nutzbaren Feldkapazität des effektiven Wurzelraumes (nFKWe) untersucht.

Ebene 3 (Kapitel 2.6.5 und 2.6.6) bezog die räumliche Lage der Trakte des Untersuchungsgebietes in die Analyse ein, um so regionale Muster der Zuwachs-Klimabeziehung zu finden.

In der vierten Ebene (Kapitel 2.6.7) wurden in multifaktoriellen Regressionen ökologische Faktoren und Bestandsparameter bei den Zuwachsuntersuchungen berücksichtigt.

2.5.1 Deskriptive Analysen der Klima und Zuwachsdaten

Auf Grundlage des aggregierten Datensatzes war es nun möglich, Daten der Inventur in Beziehung zum Klima zu analysieren.

Dieser Abschnitt beschreibt die angewendeten Methoden der deskriptiven Untersuchung des Klimas und der Klimaveränderungen auf den Inventurtrakten sowie die Entwicklung der Zuwächse der Hauptbaumarten während der drei Inventuren.

2.5.1.1 Klimahüllen

Klimahüllen sind eine praktikable Möglichkeit, um die oben genannten Standortfaktoren in Bezug zueinander zu setzen, und die kombinierte Wirkung dieser Faktoren zu betrachten. Für die sechs Baumarten wurden Klimahüllen auf Basis der BWI-Trakte für die

Variablen Niederschlagssumme (x-Achse) und Monatsmitteltemperatur (y-Achse) erzeugt. Bei der Darstellung der Klimahüllen wurden neben den Klimafaktoren auch die Anzahl der Trakte durch die Darstellung ihrer Häufigkeitsdichte berücksichtigt. Die Anzahl der Bäume eines Traktes blieb dabei unberücksichtigt, das bedeutet, ein Trakt mit wenigen Bäumen wird genauso gewichtet wie ein Trakt mit vielen Bäumen. Um die Anzahl der Bäume als Wichtungsfaktor zu berücksichtigen, wurden zusätzlich Klimahüllen für die einzelnen Bäume erstellt. Das Verteilungsmuster zeigte keine sichtbaren Unterschiede zur dargestellten Variante der Trakte, abgesehen von höheren Punktdichten, daher wurden im Weiteren nur die Klimahüllen der Trakte diskutiert.

2.5.2 Klimaabhängige Zuwachsreaktionen der Hauptbaumarten

Mittels generalisierter additiver Modelle (gam) wurde baumartenspezifisch der jährliche Durchmesserzuwachs unter Berücksichtigung der Klimavariablen Temperatur, Niederschlag, de Martonne Index sowie relativer Häufigkeit von Trockenmonaten betrachtet. Für solch explorative Analysen eignen sich generalisierte additive Modelle (gam), da sie die Daten entsprechend ihrer Verteilung nachzeichnen und nicht in eine vordefinierte Form zwingen, wie es zum Beispiel bei linearen Modellen der Fall sein kann (Dormann und Kühn 2011).

Die abhängige Variable war der jährliche Durchmesserzuwachs (jDZ). Erklärende Variablen waren die vier oben genannten Klimavariablen. Die Klimaindices wurden jeweils mit Temperatur oder Niederschlag als erklärende Variable kombiniert. Diese Vorgehensweise sollte Aufschluss darüber geben, inwieweit der Einfluss der Trockenheitsindices auf den Zuwachs durch steigende Temperaturen oder geringere Niederschläge bedingt war. Daraus ergaben sich 5 Modellkombinationen, die für die beiden Zuwachsperioden und die 6 Baumarten berechnet wurden.

$$\log(jDZ) = jDZ + f_1(T) + f_2(NS) + e$$

$$\log(jDZ) = jDZ + f_1(dMIveg) + f_2(T) + e$$

$$\log(jDZ) = jDZ + f_1(dMIveg) + f_2(NS) + e$$

$$\log(jDZ) = jDZ + f_1(rHTM) + f_2(NS) + e$$

$$\log(jDZ) = jDZ + f1(rHTM) + f2(NS) + e \quad [11]$$

jDZ: jährlicher Durchmesserzuwachs
 T: Mittlere Temperatur der Vegetationsperiode (IV-IX)
 NS: Summe der Niederschläge der Vegetationsperiode (IV-IX)
 dMI: Mittlerer de Martonne Index der Vegetationsperiode (IV-IX)
 rHTM: relative Häufigkeit von Trockenmonaten
 f1, f2: thin plate splines mit Basisdimension $k = 3$
 e: Error (gamma distribution)

2.5.3 Relative Abweichung der Zuwächse vom mittleren Zuwachs

Um die Zuwachsreaktion der Baumarten auf unterschiedliche Intensität von Trockenereignissen zu untersuchen, wurden auf Grundlage der relativen Häufigkeit von Trockenmonaten fünf Kategorien, von *sehr geringer* bis *sehr häufiger* Trockenheit, definiert (Tab. 4) und deren Zuwächse miteinander verglichen. Die Einteilung der Kategorien erfolgte nach eigener Einschätzung, da bislang noch nicht geklärt war, wie sich unterschiedliche Trockenheitsfrequenzen auf die Zuwachsreaktionen bei den jeweiligen Baumarten auswirkten.

Tab. 4: Einteilung der Kategorien für Trockenheit

Kategorie Trockenheit	rHTM (%)
sehr häufig	> 40%
häufig	>30% bis 40%
mittel	>20% bis 30%
gering	10% bis 20%
sehr gering	< 10%

Die Zuwächse der fünf Kategorien wurden mit dem mittleren Zuwachs aller Bäume einer Art verglichen, um herauszufinden, ob sie vom artspezifischen Gesamtmittelwert abweichen. Da die Anzahl der Individuen in den fünf Kategorien sehr unterschiedlich war, wurden zur Berechnung des mittleren Gesamtzuwachses einer Art die mittleren Zuwächse der einzelnen Kategorien gemittelt. Diese Methodik erbrachte eine statistische Entzerrung, da so der Einfluss von Kategorien mit einer sehr großen Anzahl von Individuen auf den Gesamtmittelwert vermindert wurde (Gleichung 12).

$$\bar{x}_{\text{Gesamt}} = \frac{\bar{x}_{\text{sehr gering}} + \bar{x}_{\text{gering}} + \bar{x}_{\text{mäßig}} + \bar{x}_{\text{häufig}} + \bar{x}_{\text{sehr häufig}}}{n_{\bar{x}}} \quad [12]$$

Die Überprüfung der Signifikanz der Abweichungen der Durchmesserzuwächse der drei Kategorien vom Gesamtmittel erfolgte mit einem gepaarten Wilcoxon-Test und dem Paket `PairedData`. Mit dem Dunn – Post-hoc Test (Paket: `dunn.test`) wurde anschließend getestet, welche Mittelwerte sich voneinander unterschieden.

2.5.4 Nutzbare Feldkapazität

Die Auswirkungen des Klimas auf die Bäume stehen in direktem Zusammenhang mit dem Wasserspeichervermögen der Böden, da dieser Faktor eine bedeutende Rolle für die Wasserversorgung der Pflanzen spielt. Ein wichtiges Kriterium zur Beurteilung des Wasserhaushaltes eines Standortes ist die nutzbare Feldkapazität des effektiven Wurzelraumes, wobei es sich hier nur um den Maximalwert handelt, welcher in der Regel nur zu Beginn der Vegetationsperiode erreicht wird (Hartmann 2013).

Die nutzbare Feldkapazität des effektiven Wurzelraumes (nFKWe in mm) ist das Produkt aus der nutzbaren Feldkapazität (nFK in mm/dm) und der effektiven Durchwurzelungstiefe (We in dm). Sie beschreibt die Kapazität eines Bodens, Wasser pflanzenverfügbar zu speichern und ist über die Poreneigenschaften im effektiv durchwurzelten Boden definiert (Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden der Staatlichen Geologischen Dienste und der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe 2005). Baumartenspezifische Anpassungen der Wassernutzung wurden jedoch nicht berücksichtigt. Datengrundlage bildete die Karte der nutzbaren Feldkapazität im effektiven Wurzelraum in Deutschland, die von der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe als tiff-Datei zur Verfügung stand. Die Karte basierte auf der nutzungsdifferenzierten Bodenübersichtskarte 1:1.000.000 (BUEK1000N), mit einer Rasterzellgröße von 250 x 250 m im ETRS_1989_LCC Koordinatensystem (EPSG: 3034) (Anhang Abb.: A1). Die Zusammenführung der Inventurdaten mit den Daten der nFKWe erfolgte nach der in Kapitel 2.4 *Zusammenführung der Waldinventur-, Klima- und Bodendaten* beschriebenen Vorgehensweise. Die Klasseneinteilung erfolgte nach der Bodenkundlichen Kartieranleitung (Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden der Staatlichen

Geologischen Dienste und der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe 2005) (Tab. 5).

Um die Zuwachsreaktionen unter Berücksichtigung von nFKWe und Klima zu untersuchen, wurden die Zuwächse der einzelnen Baumarten für *häufige* und *mittlere* Trockenheit (rHTM) der Bodenfeuchteklassen nach der Bodenkundlichen Kartieranleitung (Tab. 5) betrachtet.

Tab. 5: Klasseneinteilung der nutzbaren Feldkapazität des effektiven Wurzelraumes nach der Bodenkundlichen Kartieranleitung (Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden der Staatlichen Geologischen Dienste und der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe 2005)

nFKWe [mm]	Stufe	Bezeichnung
<50	1	sehr gering
50 - <90	2	gering
90 - <140	3	mittel
140 - <200	4	hoch
200 - <270	5	sehr hoch
≥270	6	extrem hoch

Die Betrachtungen erfolgten mit einem Wilcoxon-Test und einem anschließenden Dunn-Post-hoc-Test. Die beiden Klimaklassen *sehr häufige* und *mittlere* Trockenheit basieren auf dem Klimaindex rHTM. Die Grenzwerte für die Klimaklassen wurden baumartenspezifisch festgelegt, da insbesondere Fichte und Weiß-Tanne nur selten auf Standorten mit rHTM > 40% vorkamen (vgl. Ergebnisse, Kap. 3.1.2.4 und Abb. 17). Bei Rot-Buche, Wald-Kiefer, Trauben-Eiche und Stiel-Eiche wurde der Grenzwert für *sehr häufige Trockenheit* bei rHTM>40% festgelegt. Für Gemeine Fichte wurde der Schwellenwert mit rHTM>35% definiert und bei der Weiß-Tanne mit rHTM>30%. Für die mittlere Häufigkeit von Trockenmonaten wurde für alle Baumarten bis auf die Weiß-Tanne ein rHTM von 20 bis 30% festgelegt. Für letztere galt der Bereich von rHTM von 15 bis 25% als *mittlere Trockenheit*.

2.5.5 Räumliche Zuwachsanalyse

2.5.5.1 HotSpot Cluster-Analyse

In den vorangegangenen Untersuchungen wurden die Zuwachsreaktionen in ihrer Gesamtheit analysiert. Räumliche Zusammenhänge blieben dabei unberücksichtigt. Diese spielen jedoch eine zentrale Rolle für die Vitalität und das Wachstum von Bäumen. Bei einer ersten Auswertung der räumlich verorteten Daten zeigte es sich, dass auf kleinräumiger Lage, das bedeutet in Nachbarschaft weniger Trakte, die Zuwächse der Bäume sehr deutlich variierten (siehe Anhang Abb. A1). Auch auf einzelnen Trakten kam teilweise eine große Streuung der Zuwachsdaten von bis zu 8 mm bei etwa gleichem Alter und Ausgangsdurchmesser vor. Eine hohe Variabilität kann die Ergebnisse der statistischen Berechnungen beeinträchtigen. Ein möglicher Ansatz, um räumlich homogenere Zuwachsdaten zu erhalten, war es Gebiete zu selektieren, auf denen die Zuwächse eine geringe Streuung aufwiesen. Die Identifizierung von solchen Clustern erfolgte mit der *Optimierten Hot-Spot-Analyse* in ArcGIS. Dieses Werkzeug berechnete mit Hilfe der Getis-Ord G_i^* -Statistik (Getis und Ord 1992; Ord und Getis 1995) eine Karte mit statistisch signifikanten hohen und niedrigen Werten.

Die Methode basierte auf der Nachbarschaftsanalyse von Einzelbäumen, bei der für jeden

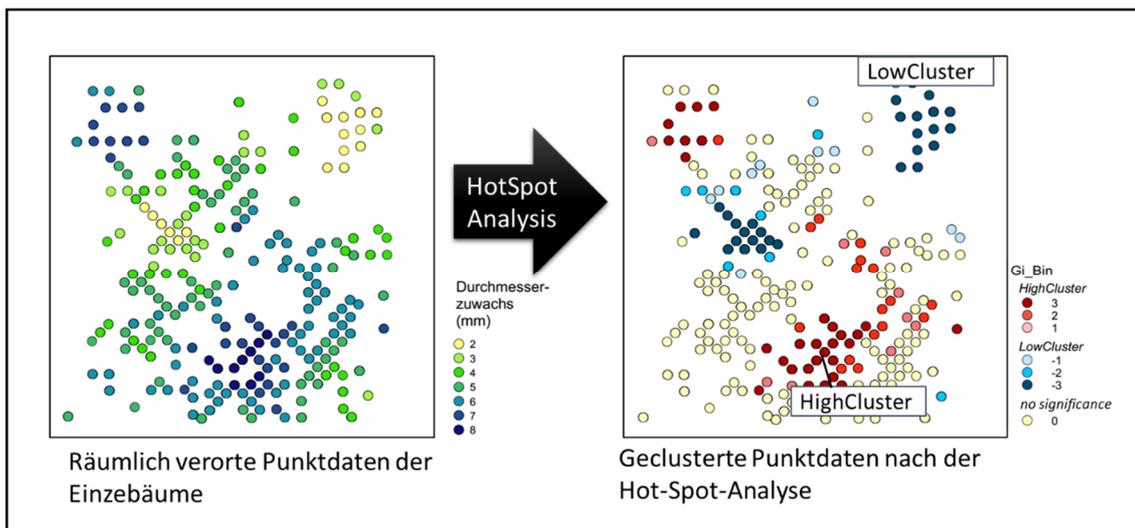


Abb. 14: Schema der HotSpot Analyse in ArcGIS. Die Abbildung zeigt einen willkürlich gewählten Ausschnitt aus dem Traktraster der BWI. Jeder Punkt repräsentiert einen Baum. Für jeden Datenpunkt wird in einer festgelegten Entfernung die Ähnlichkeit eines Merkmals mit benachbarten Punkten verglichen. Ähneln sich die Werte, werden alle Punkte dieser Nachbarschaft als Cluster gekennzeichnet (rechts). Sind die Werte im Vergleich zur Umgebung hoch, liegt ein HighCluster vor, sind sie niedrig ein LowCluster. Die Stärke der Signifikanz eines Clusters wird durch G_i Bin Werte ausgedrückt. Diese Werte können Werte von ± 1 , ± 2 und ± 3 annehmen, wobei positive Werte für HighCluster stehen und negative für Low Cluster. Ist die Variation der Werte in der festgelegten Umgebung sehr hoch, ist kein Cluster (nicht signifikant) vorhanden.

Baum im Umkreis einer zuvor festgelegten Umgebung der Zuwachs mit dem der Nachbarbäume verglichen wurde. Waren in dieser Umgebung die Zuwächse ähnlich, wurden die Bäume als Cluster zusammengefasst. Streuten die Zuwachswerte in der betrachteten Umgebung, erfolgte keine Gruppierung (Abb. 14). Weiterhin untersucht die Optimierte Hot-Spot-Analyse, ob die Zuwachswerte eines Clusters im Verhältnis zur Nachbarschaft hoch oder niedrig waren. Statistisch signifikant hohe Werte werden als HighCluster bezeichnet und niedrige Werte als LowCluster. Der Test basierte auf einer NULL-Hypothese, die die zufällige räumliche Verteilung (Complete Spatial Randomness, CSR) eines Datenpunktes (Events) selbst untersuchte oder die Verteilung von Werten, die mit diesem Datenpunkt verknüpft waren. Die Musteranalysewerkzeuge gaben Z-Werte (Standardabweichungen) und p-Werte zurück, aufgrund derer die NULL-Hypothese abzulehnen war oder nicht. Ein räumliches Clustering von hohen Werten (HighCluster) ist bei hohem Z-Wert und einem kleinen p-Wert gegeben. Niedrige negative Z-Werte und kleine p-Werte wiesen auf ein räumliches Clustering von niedrigen Werten (LowCluster) hin. Je größer (oder kleiner) der Z-Wert war, umso höher ist die Intensität der Cluster-Bildung. Lagen die Z-Werte nahe 0, bedeutete dies, dass offensichtlich keine räumliche Cluster-Bildung (nicht signifikant) gegeben war (Tab. 6). Die statistische Signifikanz der Cluster wurde mit einem sogenannten Gi-Bin-Wert ausgedrückt, der das Konfidenzniveau widerspiegelte. Ein Wert von ± 3 -Bins gab ein Konfidenzniveau von 99 Prozent an, Features mit ± 2 -Bins ein Konfidenzniveau von 95 Prozent und ± 1 -Bin bedeuteten ein Konfidenzniveau von 90 Prozent. Gi_Bin Werte von 0 zeigten, dass kein signifikantes Muster, also kein Cluster, vorhanden war (Tab. 6), da in diesem Fall die Werte der Zielvariablen sehr stark streuten (Mitchell 2005). Die Bestimmung der Umgebungsdistanz (Entfernungsband) für die Clusterberechnungen erfolgte unter zu Hilfenahme des Werkzeuges *Entfernungsband anhand der Nachbarn berechnen* (ArcGIS 10.5). Das Werkzeug bestimmte die minimale, mittlere und maximale Distanz zum angegebenen n-ten Nachbarn.

Die Entfernungen wurden für den 25. Nachbarn mit der Euklidischen Entfernung getestet. Es ergab sich eine mittlere Distanz von ± 12 km. Die Entfernung von 12 km wurde als Entfernungsband für die Clusteranalysen gewählt.

Tab. 6: Klassifizierungsmatrix der HotSpot-Analyse

Z-Wert (Standardabweichung)	p-Wert (Wahrscheinlichkeit)	Konfidenzniveau	Gi –Bin Wert	
			High Cluster	LowCluster
< +1,65 oder > -1,65	< 0,10	90%	+1	-1
< +1,96 oder > -1,96	< 0,05	95%	+2	-2
< +2,58 oder > -2,58	< 0,01	99%	+3	-3
> +1,65 oder < -1,65	> 0,10	Nicht signifikant	0	0

Die Ergebnisse der *Optimierten Hot-Spot-Analyse* wurden als Karten ausgegeben, in denen die Datenpunkte der *HighCluster* (standardmäßig) rot dargestellt sind und die *LowCluster* blau. Abstufungen der Farbintensität gaben das Konfidenzniveau beziehungsweise den Gi_Bin Wert an. Datenpunkte ohne räumliches Cluster (Gi_Bin Wert=0) wurden grau angezeigt (Abb. 14).

2.5.6 Analyse der Zuwachsdaten auf Basis der Ergebnisse der Clusteranalysen

Für die Teildatensätze der High- und LowCluster wurde der Einfluss des Klimas auf den Zuwachs mit Regressionsanalysen untersucht. In den Modellen war die abhängige Variable der jährliche Durchmesserzuwachs und die Klimafaktoren Temperatur, Niederschlag, dMI, relative Häufigkeit von Trockenmonaten gingen als erklärende Variablen ein, wobei jede Klimavariablen separat gegen die abhängige Variable betrachtet wurde. Die Gruppierung der Zuwachsdaten erfolgte nach Baumart (6), Periode (2) und Cluster (2), was für jede Klimavariablen 24 Regressionen ergab. Die Berechnung erfolgte mit generalisierten additiven Modellen in R Core mit dem Paket *mgcv* für die Grundgleichung

$$\log(jDZ) = jDZ + f1(Klim_x) + e \quad [13]$$

- *jDZ*: jährlicher Durchmesserzuwachs
- *Klim_x*: Klimavariablen, *x* = *T*, *NS*, *dMI_{veg}* oder *rHTM*
- *f1, f2*: thin plate splines mit Basisdimension *k* = 4
- *e*: Fehlerterm (Gamma-Verteilung)

Für den Fehlerterm wurde die Gamma-Verteilung gewählt, da die Datensätze nicht normalverteilt waren.

Die Ergebnisse der Regressionen wurden als Antwortkurven der Klimavariablen gegen den

Durchmesserzuwachs geplottet, um anhand des Kurvenverlaufs Rückschlüsse auf deren Beziehung zu erhalten.

2.5.7 Multifaktorielle Regressionsanalyse

Nachdem die Hotspotanalyse aufzeigte, wo sich signifikante Cluster mit homogenen Zuwachsmuster befanden, sollte nun mit einer räumlichen Regressionsanalyse untersucht werden, welche Faktoren den Zuwachs erklären und welchen Anteil die Klimafaktoren dabei einnehmen. Möglicherweise können andere, nicht klimabezogene Faktoren, die Wirkungen des Klimas überdecken. Das heißt, es könnten Zuwachsmuster dem Klima zugeschrieben werden, obwohl andere Faktoren bedeutender waren. Um die Intensität beziehungsweise den Anteil des Klimas am Zuwachs zu verifizieren, können multifaktorielle Modelle helfen, da hier neben Klimafaktoren weitere Variablen in der Analyse berücksichtigt werden können. Die folgenden erklärenden Variablen gingen in das *globale Modell* ein:

- Temperatur (T_{veg}),
- Niederschlag (NS_{veg}),
- de Martonne Index (dMI_{veg}),
- relative Häufigkeit von Trockenmonaten ($rHTM_{veg}$)
- Niederschlagsveränderung (ΔN_{veg})
- Alter zu Beginn der Messung
- BHD zu Beginn der Messung
- Bodentyp-Nährstoffklassen
- Nutzbare Feldkapazität des effektiven Wurzelraumes ($nFKWe$)
- Exposition
- Neigung
- Mittlere Bestandesgrundflächenhaltung
- Breitengrad
- Längengrad

2.5.7.1 Charakterisierung der standörtlichen und standörtlichen Faktoren

Im folgenden Abschnitt werden die Variablen und ihre Quellen beschrieben, die in den multifaktoriellen Regressionen verwendet wurden.

2.5.7.1.1 Mittlere Bestandesgrundflächenhaltung

Die mittlere Bestandesgrundflächenhaltung ist das über die Periodenlänge gewichtete Mittel der Bestandesgrundflächen der Inventuren (Pretzsch 2002). Die Grundfläche (GF) ist das Produkt aus Anzahl der Bäume pro Plot (N), der Zählbreite (Z) und dem Hangkorrekturfaktor (K_{Hang}) und hat die Dimension $m^2 ha^{-1}$.

$$GF = N * Z * K_{Hang} \quad [14]$$

Aus Gleichung 14 berechnete sich dann die mittlere Bestandesgrundflächenhaltung (mGF):

$$mGF = \frac{\frac{xGF_1 + yGF_1}{2} * Per_1 + \frac{xGF_2 + yGF_2}{2} * Per_2 + \dots + \frac{xGF_n + yGF_n}{2} * Per_n}{Per_1 + Per_2 + \dots + Per_n} \quad [15]$$

mGF: mittlere Bestandesgrundflächenhaltung
 xGF: Grundfläche zum Zeitpunkt x
 yGF: Grundfläche zum Zeitpunkt y
 Per : Zeitperiode (Monate oder Vegetationsperioden) zwischen zwei Inventuren.

2.5.7.1.2 Boden

Bodeneigenschaften geben Aufschluss über die Nährstoffversorgung sowie den Wasserhaushalt. Die verwendeten Bodendaten waren an die Bodenübersichtskarte BÜK 5000 angelehnt, die auf 20 Legendeneinheiten aus der BÜK 1000 zusammengefasst ist. Die BÜK 5000 stammt von der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) und wurde von der Internetseite im Shapefile-Format heruntergeladen. Das Referenzsystem ist ETRS_1989_LCC Koordinatensystem (EPSG: 3034). Zur Vereinfachung wurden die 20 Einheiten zu 6 Einheiten aggregiert (Tab. 7), die die Nährstoffversorgung des Bodens widerspiegeln. Die Zusammenführung der Inventurdaten und der Bodenklassen erfolgte nach der in Kapitel 2.4 Zusammenführung der Waldinventur-, Klima- und Bodendaten beschriebenen Vorgehensweise.

2.5.7.1.3 Neigung, Exposition und Höhe

Hanglage, Exposition und Höhenlage beeinflussen die klimatischen Gegebenheiten sowie die Standorteigenschaften auf lokaler Ebene. Die Daten für Hangneigung und Exposition stammen aus der Datentabelle der Traktecken (b_ecke) des Waldinverturdatensatzes. Die Hangneigung ist in Neigungsprozent (%) angegeben und die Exposition in 8-Geländeexpositionsclassen (N, NO, O, SO, S, W, SW, W und NW). Die Geländehöhe wurde nicht als separater Faktor in das Modell einbezogen, da sie bei der Interpolation der Klimadaten berücksichtigt wurde.

Tab. 7: Aggregierte Bodenklassen aus 19 Bodentypen der Bodenübersichtsklasse BÜK 5000. Bk_id = Identifikationsnummer der Bodenklasse, buek_ID= Identifikationsnummer nach BÜK 5000.

Bodenklasse	bk_id	buек_ID	Bodentyp nach BÜK 5000
Nährstoffreiche kalkhaltige Böden	1	19	Geschiebelehm und Geschiebemergel
		26	Geschiebelehm und Geschiebemergel mit sandiger Deckschicht
		49	Kalk- Mergel- und Dolomitgestein
		51	Mergel- und Tongestein
Nährstoffreiche, kalkfreie Böden	2	8	Flussauen
		13	Flussterrassen und Hochflutsedimente
		36	Schwarze Lössböden
		53	Böden aus basischen und intermediären magmatischen und metamorphen Gesteinen
		60	Ton- und Schluffschiefern
mittlere Böden	3	18	lössvermischten Tertiärablagerungen
		42	Braune Lössböden Sandlöss und lössähnliche Sedimente
		55	Böden aus sauren bis intermediären magmatischen und metamorphen Gesteinen
Nährstoffarme Böden	4	17	Niederungen und Urstromtäler
		61	kalkfreien Sedimentgesteinen und Quarziten
Sonderstandorte	5	31	Trockene Sandböden
		43	Staunasse Lössböden
		68	Hochgebirge
Extremstandorte	6	4	Marschböden
		7	Hoch- und Niedermoorböden

Die Berechnung der Modelle erfolgte mit dem Werkzeug *Regressionsanalyse* in ArcGis 10.5 aus dem Toolset *Modelling Spatial Relationships*. Das Werkzeug diente dazu, räumliche Beziehungen zu modellieren, zu überprüfen oder zu erkunden und die Faktoren hinter beobachteten räumlichen Mustern zu erklären. Die Anwendung führt die Berechnungen auf Grundlage des Prinzips der kleinsten Quadrate (Ordinary least squares, OLS) und der räumlichen Morans I Autokorrelation (Moran 1950) durch. Bei dieser Methode wird nicht nur die Beziehung zwischen abhängiger und erklärender Variablen berücksichtigt, sondern auch die räumliche Lage der Daten einbezogen. Die Regressionsanalyse basierte auf dem Prinzip der schrittweisen Regression. Allerdings wurde bei der Regressionsanalyse nicht nur nach Modellen mit hohen adjustierten R^2 -Werten gesucht, sondern auch nach Modellen, die alle Anforderungen und Annahmen der Ordinary least square-Methode erfüllten. Dies waren Jarque-Bera-Test (JB) für normal verteilte Residuen, räumliche Autokorrelation (SA), Koenkers (BP)-Test und Varianz Inflation Faktor (VIF).

Der Jarque-Bera-Test überprüfte die Normalverteilung der Residuen. Eine Normalverteilung der Residuen war bei einem p-Wert größer als 0,05 für ein Konfidenzniveau von 95% gegeben. Waren die Residuen nicht normal verteilt, wies dies auf ein verzerrtes Modell hin. Bestand zusätzlich eine statistisch signifikante räumliche Autokorrelation (SA), lag die Ursache für die Verzerrung möglicherweise daran, dass eine oder mehrere wichtige erklärende/n Variable/n in dem Modell fehlt/en. Eine statistische Signifikanz des Jarque-Bera-Test kann aber auch bedeuten, dass eine nicht lineare Beziehung zwischen abhängiger und erklärender Variable im Modell vorliegt, die Daten einflussreiche Ausreißer enthalten oder eine Varianzungleichheit (Heteroskedastizität) vorhanden ist.

Die räumliche Autokorrelation (SA) überprüft die zufällige Verteilung der Residuen im Raum (p-Wert größer als 0,05). Liegt eine statistisch signifikante Clusterbildung (p-Wert < 0,05) von hohen oder niedrigen Residuen vor, deutet dies darauf hin, dass eine oder mehrere wichtige erklärende Variablen fehlen.

Die Koenker (BP) Statistik (Koenkers t-verteilte Breusch-Pagan-Statistik) gibt Aufschluss darüber, ob die erklärenden Variablen im Modell eine konsistente Beziehung zur abhängigen Variable sowohl im geographischen Raum als auch im Datenbereich besitzen. War das Modell im geographischen Raum konsistent, verhalten sich die durch die

erklärenden Variablen dargestellten räumlichen Prozesse genauso wie im übrigen Untersuchungsgebiet, das heißt, die Prozesse sind stationär.

War das Modell im Datenbereich konsistent, liegt keine Heteroskedastizität im Modell vor. Ein p-Wert kleiner als 0,05 deutet auf Heteroskedastizität und/oder Nichtstationarität hin. Lag er darüber, waren die Voraussetzungen für das Modell erfüllt.

Der Varianz Inflations Faktor (VIF) überprüft Redundanzen unter erklärenden Variablen und zeigt Kolinearität zwischen Variablen an. Wenn die VIF-Werte zwischen erklärenden Variablen größer als ca. 7,5 waren, sollten diese Variablen (einzeln) vom Regressionsmodell entfernt werden (Mitchell 2005).

Die Regressionsanalyse ist ein iteratives Verfahren, bei der jede mögliche Kombination der erklärenden Variablen für die Modelle berechnet wurde. Die minimale und maximale Anzahl der Variablen, die die Modelle enthalten sollten, konnte zuvor festgelegt werden. Vorstudien ergaben, dass die *Besten Modelle* meist zwischen 7 und 10 Variablen enthielten. Daher wurde die Anzahl der Variablen für die Berechnungen auf mindestens 5 und maximal 12 erklärenden Variablen begrenzt. Für jede Anzahl der definierten Variablen wurden die drei Modelle mit den besten Bestimmtheitsmaßen (adjustiertes R^2) und dem geringsten *Akaike Informationskriterium* (AICc) (Akaike 1974) in einer Ergebnistabelle zusammengefasst. Als *Bestes Modell* galt immer das Modell mit dem kleinsten AICc. Für den Vergleich der Modelle wurde die Differenz des AICc zwischen dem *Besten Modell*, und den folgenden Modellen betrachtet. Modelle mit einem Δ AICc kleiner 2 zum *Besten Modell* galten als gleichwertig. Als weiteres Kriterium wurde in diesem Fall die Anzahl der erklärenden Variablen betrachtet. Das Modell, das die geringste Anzahl der Variablen aufwies, wurde als *Bestes Modell* gewählt (Occam's Razor-Prinzip). War bei mehreren Modellen der Δ AIC kleiner 2 und die Anzahl der Variablen minimal, galten diese Modelle gleichsam als akzeptiert.

Neben der Tabelle mit den jeweils *Besten Modellen* je Variablenanzahl wurde weiterhin eine Signifikanzmatrix ausgegeben, die über alle berechneten Modelle betrachtet, die Wichtigkeit der einzelnen Variablen bezüglich ihrer Beziehung zur abhängigen Variablen auflistet und zusätzlich anzeigt, zu welchem Anteil der Einfluss positiv oder negativ ist. Bei einem ersten Regressionsdurchlauf stellte sich eine Multikollinearität ($VIF > 7,5$) zwischen Temperatur, Niederschlagssumme und dMI_{veg} heraus. Diese Beziehung war zu

erwarten, da der Klimaindex ein Quotient aus Temperatur und Niederschlag ist. Der dMI_{veg} wurde deshalb aus dem globalen Modell entfernt, sodass das *Globale Modell* 14 erklärende Variablen umfasste.

Aus den Regressionsergebnissen wurde für jedes der 24 Modellansätze (6 Baumarten x 2 Perioden x 2 Cluster (High und Low)) das jeweils *Beste Modell* nach den oben genannten Kriterien herausgesucht und innerhalb der Baumarten hinsichtlich der Bedeutung der Variablen verglichen.

3 ERGEBNISSE

3.1 Deskriptive Analyse der Klima und Zuwachsdaten

3.1.1 Klima und Klimaveränderung auf dem Gebiet der Waldinventuren

Die räumliche Ausprägung des Klimas und der Veränderung von Temperatur, Niederschlagssumme, dMI (de Martonne Index) und rHTM (rel. Häufigkeit trockener Monate) der Vegetationsperiode (IV-IX) der drei Untersuchungsperioden wird in Klimakarten mit einer Zellgröße von 1x1km abgebildet. Auf den Karten Abb. 15 und 16 sind zusätzlich die Grenzen der forstlichen Wuchsgebiete nach (Gauer und Kroiher 2012) eingezeichnet, um die räumliche Orientierung zu vereinfachen. Eine gesonderte Übersichtskarte, auf der die Wuchsgebiete benannt sind, befindet sich im Anhang (Abb. A2). Die zugehörigen Identifikationsnummern werden im laufenden Text hinter den Wuchsgebietsnamen in Klammern vermerkt. Dies soll das Auffinden in der Übersichtskarte erleichtern.

3.1.1.1 Temperatur

Die mittlere Temperatur der Vegetationsperiode betrug in P0 (1970- 1986) für Westdeutschland 13,5°C ($\pm 1^\circ\text{C}$). Mittlere Temperaturbereiche von 12,5°C bis 14,5°C lagen vorwiegend in den planaren bis kollinen Zonen Nord- und Süddeutschlands (Abb. 15A). In den höheren Lagen der Wuchsgebiete Harz (36), Sauerland (40), Schwarzwald (73) sowie den Mittelgebirgen waren die Temperaturen mit 9-11°C ($\pm 1^\circ\text{C}$) deutlich unterhalb der mittleren Temperaturen. In den Alpen und dem südlichen Schwarzwald konnten die Temperaturen in der bewaldeten Zone auch unter 9°C betragen.

Die wärmsten Gebiete befanden sich in der Westfälischen Bucht (16), dem Niederrheinischen Tiefland (42), der Niederrheinischen Bucht (43), dem Mittelrheintal (46), dem Oberrheinischem Tiefland und Mainebene (65) sowie im Zentrum von Neckarland (75). In P0 erreichten dort die Temperaturen während der Vegetationsperiode 15-16,3°C ($\pm 1^\circ\text{C}$).

In den folgenden beiden Untersuchungszeiträumen P1 und P2 nahm die Temperatur jeweils zwischen 0,5 und 1 C pro Periode (P1: 15 Jahre, P2: 12 Jahre) im gesamten

westlichen Bundesgebiet zu (Abb. 15, B u. C). In Nord-, Nordwest- sowie Mitteldeutschland war der Temperaturanstieg in P1 etwas geringer als im Durchschnitt.

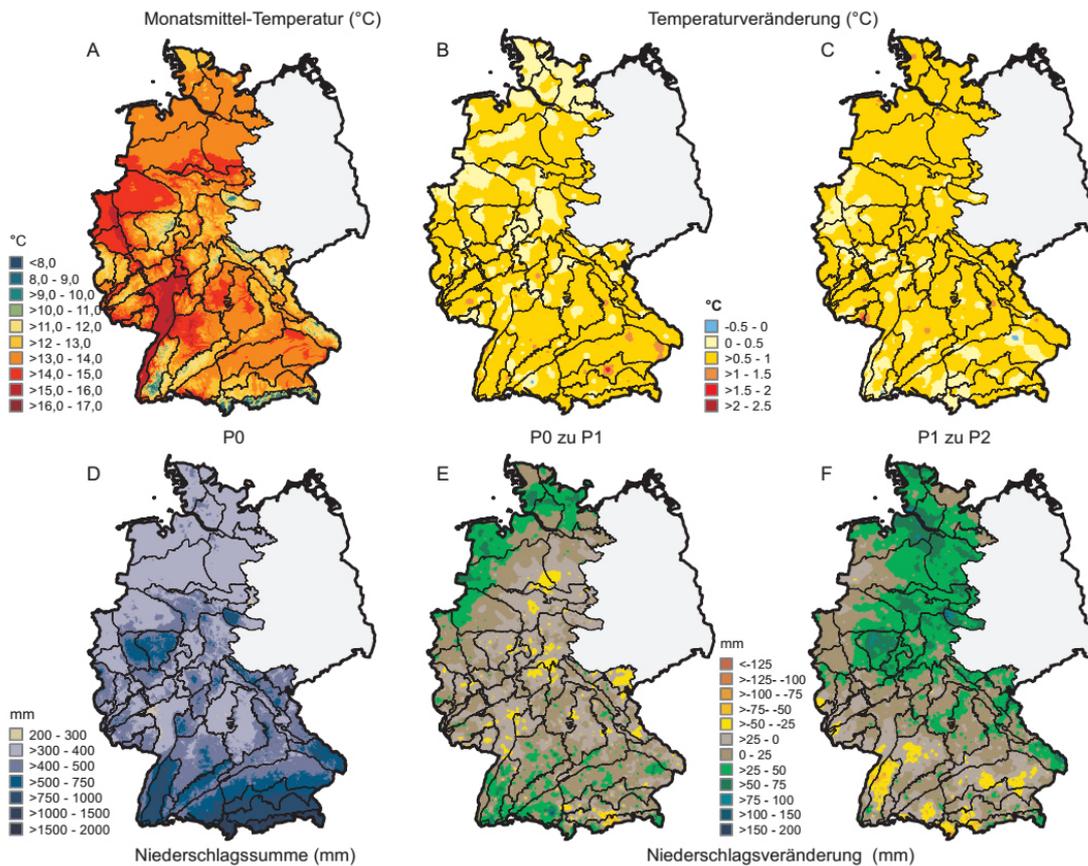


Abb. 15: Übersichtskarten von Temperatur (A) und Niederschlag (D) für den Zeitraum P0 (1971 bis 1986) und den Änderungen von Temperatur (B u. C) und Niederschlag (E u. F) jeweils zur Vorperiode (von P0 zu P1 und von P1 zu P2).

3.1.1.2 Niederschlag

In West-Deutschland betrug die mittlere Niederschlagssumme während der Vegetationsperiode (IV-IX) in P0 etwa 440 mm (± 140 mm). Durchschnittliche Niederschläge zwischen 400 und 500 mm fielen in den Randbereichen der Mittelgebirge, des Schwarzwaldes (73), der Schwäbischen-Alb (76) und des Alpenvorlandes (77) (Abb. 15D). Die Niederschlagsmenge nahm mit zunehmender Höhenstufung zu. In den kollinen bis submontanen Bereichen erreichten sie bis 750 mm. In den Hochlagen der Mittelgebirge (37, 38, 40), Schwarzwald (77), Schwäbischer-Alb (76) waren es bis zu 1000 mm, in den Alpen (82) auch über 1500 mm.

In der Norddeutschen Tiefebene, Niederrheinebene (42, 43), der Rhein-Main-Ebene und Franken (62, 63) war es mit Niederschlägen unterhalb von 400 mm deutlich trockener.

In P1 (1989-2001) nahmen die Niederschläge im Vergleich zur P0 vor allem in Nord-, Nordwest- sowie Südwest-Deutschland um 25 bis 75 mm (=5 bis 10%) zu (Abb. 15 E) ab. In den Wuchsgebieten Ostniedersächsisches Tiefland (13), Mittelwestniedersächsisches Tiefland (15) und Nordwestdeutsche Berglandschwelle (18) sowie im Mitteldeutschen Trias-Berg- und Hügelland (37) und Vogelsberg (50) verringerten sich die Niederschläge um 25 bis 50 mm. In den Bayrischen Alpen betrug die Abnahme lokal bis 75 mm.

In P2 (2003-2011) nahm der Niederschlag zur Vorperiode P1 von Nord- bis Mitteldeutschland und entlang der Deutsch-Tschechischen Grenze um 25 bis 50 mm zu (Abb. 15 E). Im Bereich der Elbmündung (3,14), Hochharz (36), Sauerland (40), Weserbergland (17) und Bayrischer Wald (79) war eine Zunahme zwischen 50 und 100 mm zu beobachten.

Ein Rückgang des Niederschlags von P1 zu P2 war vorwiegend in Süddeutschland zu verzeichnen. In den Wuchsgebieten Schwarzwald (73), Alpenvorland (77) und den Bayrischen Alpen (82) fielen etwa 25 bis 75 mm weniger Niederschlag in der Vegetationsperiode. In den höheren Alpenregionen betrug der Rückgang bis zu 130 mm.

3.1.1.3 De Martonne Index

Die trockensten Regionen Westdeutschlands befanden sich in den Wuchsgebieten Rhein-Main-Ebene(65) und Fränkische Platte (62). Hier erreichte der dMI in P0 (Abb. 16, A) Werte unterhalb des für trockenheitssensitive Arten kritischen Wertes von 25. Weniger trockene Bedingungen mit dMI-Werten zwischen 25 bis 35 waren im Norddeutschen Tiefland und am Niederrhein zu beobachten, wobei es an den Küstenregionen der Nordsee tendenziell weniger trocken war als im Binnenland und der Ostseeküste. Mit zunehmender Höhenlage zeigte der dMI humidere Bedingungen an. In den Hochlagen von Harz (36), Schwarzwald (73) und Alpen (82) erreichte er Werte von über 300. In P1 (Abb.: 16, B) veränderte sich der dMI im gesamten Gebiet überwiegend nur geringfügig um ± 5 . Größtenteils zeigte sich eine Tendenz zu zunehmender Trockenheit. Im Norddeutschen Küstenraum und Südwest Deutschland tendierte der Trend zu feuchteren Bedingungen.

In P2 (Abb. 16, C) war die Situation ähnlich wie zuvor. Der dMI zeigte eine geringe Veränderung zur Vorperiode. Allerdings wurde es in P2 von Nord- bis Mitteldeutschland tendenziell feuchter, abgesehen vom äußersten Westen. Dort sowie in weiten Teilen Süddeutschlands wurde es trockener. Deutlichere Veränderungen gab es lokal im Niedersächsischen Küstenraum (14), Hochharz (36) und Sauerland (40), wo der dMI humidere Bedingungen im Vergleich zu Vorperiode anzeigte. Im Nordschwarzwald und den Alpen (82) wurde es kleinräumig trockener. Die dMI- Werte waren hier zwischen 5-15 geringer als in P1.

Über die beiden Zeiträume P1 und P2 (Abb. 16 B und C) betrachtet wurde es besonders in den trockenen Gebiete der Rhein-Main-Ebene (65) und Fränkischen-Platte (63) noch trockener, wodurch das Dürreerisiko hier besonders zunahm.

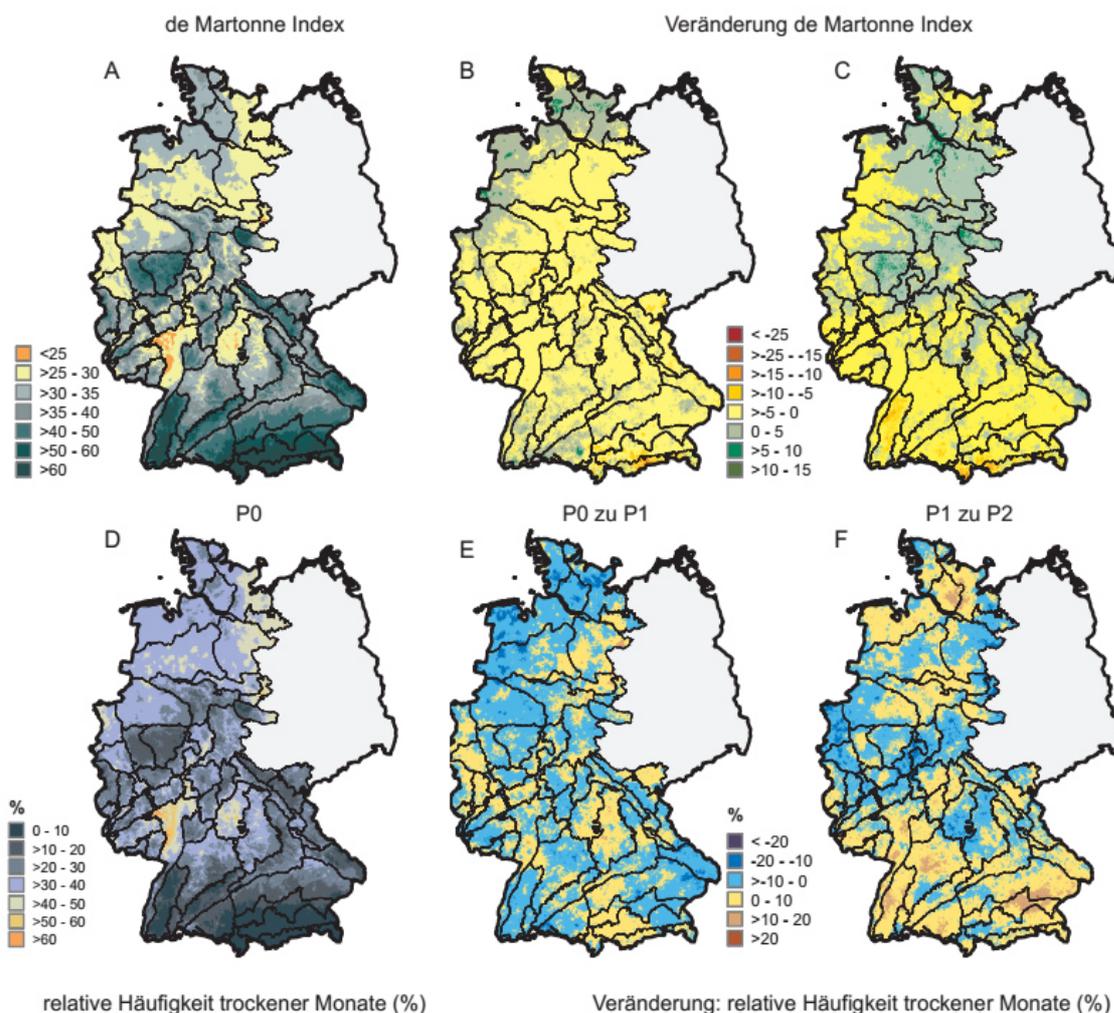


Abb. 16: Übersichtskarten von de Martonne Index (A) und relativer Häufigkeit von Trockenmonaten (D) für den Zeitraum P0 (1971 bis 1986) und den Änderungen von de Martonne Index (B u. C) und relativer Häufigkeit von Trockenmonaten (E u. F) jeweils zur Vorperiode (von P0 zu P1 und von P1 zu P2).

3.1.1.4 Harlfinger-Kness Index

Der Harlfinger-Knees Index hatte ein nahezu identisches räumliches Verteilungsmuster wie der dMI und Δ dMI. Auch in den folgenden Analysen lieferten dMI und HKI nahezu identische Ergebnisse. Da die Darstellung redundanter Ergebnisse wenig zum Erkenntnisgewinn beitrug, wurde auf eine Darstellung und Diskussion der Ergebnisse für den Harlfinger-Knees Index verzichtet. Die Entscheidung zu Gunsten des dMI erfolgte auch aus dem Grund, dass der Index häufiger für forstliche Fragestellungen verwendet (z.B. (Mitscherlich 1950a, 1950b; Kohn 2013) wurde als der HKI und somit die Ergebnisse besser mit anderen Studien verglichen werden konnten.

3.1.1.5 Relative Häufigkeit trockener Monate

Die Häufigkeit von trockenen Monaten war in den Regionen höher, in denen auch der dMI trockenere Bedingungen anzeigte (Abb. 16, D). Die häufigsten Trockenereignisse traten in der Rhein-Main-Ebene (65) und der Fränkischen Platte (62) auf. Hier hatten in P0 über 50% der Monate einen dMI unter 25.

In den Hochlagen der Mittelgebirge (37, 38, 40) und Harz (36) sowie dem Schwarzwald (73) und den Alpen (82) kam es am seltensten zu Trockenperioden. Hier lag die relative Häufigkeit unter 10 %. Mittlere Häufigkeit von Trockenmonaten zwischen 20 % und 40 % kamen in der Norddeutschen Tiefebene (1, 2, 3, 14, 15, 16) am Niederrhein (42, 43) und den kollinen Zonen der Mittelgebirge (37, 38, 40) sowie im Neckarland (75) und Franken (62, 63) vor. Sehr häufige Trockenereignisse von über 40 % traten in der Rhein Mainebene (65) und lokal auf der Fränkischen Platte (62) auf.

Die Veränderung der relativen Häufigkeit von Trockenmonaten von P0 zu P1 (Abb. 16, E) war regional recht unterschiedlich und bedeutete für den größeren Teil des Gebietes eine geringere Anzahl trockener Monate von 10 % im Vergleich zur Vorperiode. In Norddeutschland im Raum Nord-Schleswig-Holstein (1, 2, 3) und dem Niedersächsischen Küstenraum (14) war eine Abnahme von bis zu 20 % zu beobachten. Eine Zunahme der Trockenmonate erfolgte im Ostniedersächsischen Tiefland (13), am Niederrhein (42, 43), in der mittleren Rhein Main Ebene (65), in Franken (61, 62) und im Bayrischen Wald (79). Von P1 zu P2 waren besonders Nord- und Süddeutschland von einem Anstieg der Häufigkeit von Trockenmonaten betroffen. Am deutlichsten fiel die Zunahme in

Schleswig-Holstein Südwest (3), Schwarzwald (73), Neckarland (75) und der Schwäbisch-Bayerische Altmoränenlandschaft (80) im Südosten Deutschlands, mit einer Zunahme von 5 bis 20% aus. Weniger häufig trocken wurde es im Nordosten des Ostniedersächsischen Tieflandes (13) und den darunter grenzenden Wuchsgebieten sowie im Niederrheinischen Tiefland (42), dem nördlichen Hessischen Schiefer Gebirge (39) und der südlichen Fränkischen Platte (62).

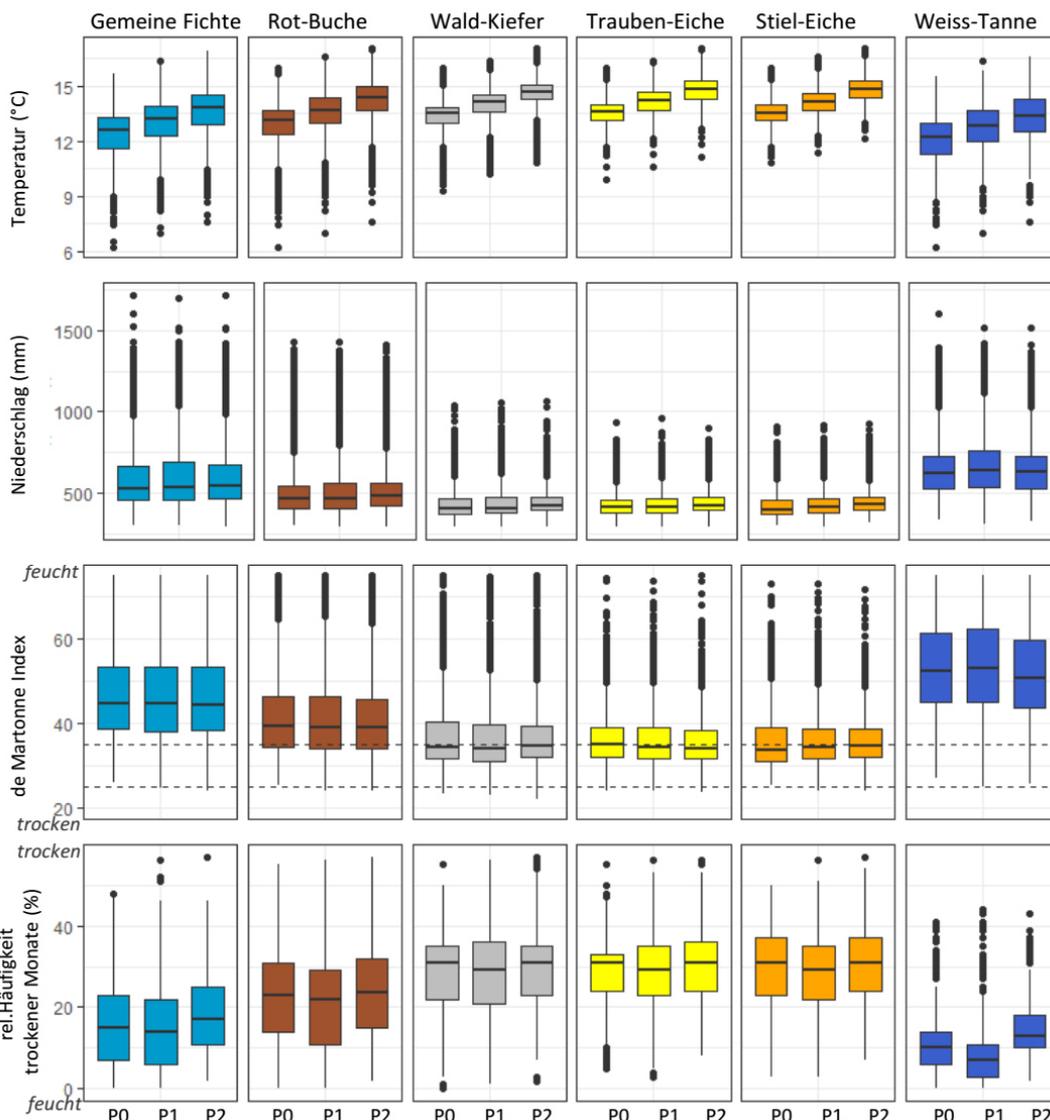


Abb.17: Boxplots der Klimafaktoren für die Trakte der Bundeswaldinventuren für Deutschland (Alte Bundesländer). P0=Zeitraum von 1971 bis 1985, P1=Zeitraum von 1989 bis 2000, P2=Zeitraum von 2001 bis 2011. --- Grenze für geringes (dMI=35) und hohes Trockenstressrisiko (dMI=25).

3.1.2 Klima und Klimaveränderungen der Inventurtrakte unter Berücksichtigung der Baumarten

Für die Analyse des klimabedingten Zuwachses war es von Interesse, das Klima auf den Trakten der Hauptbaumarten zu betrachten. Auf Grundlage ihrer klimatischen Präferenzen konnten den sechs Baumarten drei Standorttypen zugeordnet werden. Fichte und Weiß-Tanne kamen bevorzugt auf den kühleren und feuchteren Arealen vor. Wald-Kiefer und beide Eichenarten waren eher auf warmen und trockeneren Bedingungen zu finden und die Rot-Buche besiedelte bevorzugt Areale mit mittlerem Klima (Abb. 17 und Tab. 8 bis 11)

3.1.2.1 Temperatur

Wald-Kiefer, Trauben- und Stiel-Eiche kamen vorwiegend auf Standorten mit Mitteltemperaturen oberhalb von 13°C in P0 vor. In P3 stieg die mittlere Temperatur auf diesen Standorten auf knapp 15°C an. Weiß-Tanne und Gemeine Fichte waren auf den kühleren Trakten mit mittleren Temperaturen von etwa 12°C in P0 zu finden. In P3 erreichten die Temperaturen hier maximal 13,6°C. Dies bedeutete einen Anstieg der Monatsmitteltemperaturen von 1,3°C über den gesamten Zeitraum hinweg.

Tab. 8: Übersicht der Monatsmitteltemperaturen und –änderungen (IV-IX) der Inventur-Trakte für die einzelnen Baumarten während der drei Inventuren. Min.= Minimum, 1stQu.=25% Quantil, MW=Mittelwert, 3rdQu.=75% Quantil, Max.= Maximum, SD=Standardabweichung, Änderung MW= Änderung des Mittelwertes zur Vorperiode, P0=1970-1986, P1=1989-2001, P2=2002-2011.

Monatsmittel-Temperatur der Vegetationsperiode (IV-IX) (°C)									
Baumart	Periode	Min.	1st Qu.	Median	MW	3rd Qu.	Max.	SD	Änderung MW
Gemeine Fichte	P0	6.2	11.6	12.6	12.3	13.2	15.7	1.2	
	P1	7.0	12.3	13.2	13.0	13.9	16.4	1.2	+0.7 (+6%)
	P2	7.6	12.9	13.8	13.6	14.5	16.9	1.2	+0.6 (+5%)
Rot-Buche	P0	6.2	12.4	13.1	13.0	13.7	16	1.1	
	P1	7.0	13	13.7	13.6	14.3	16.6	1.1	+0.6 (+5%)
	P2	7.6	13.6	14.3	14.2	14.9	17.1	1.1	+0.6 (+4%)
Wald-Kiefer	P0	9.3	13.1	13.5	13.4	13.8	16	0.8	
	P1	10.2	13.7	14.1	14.1	14.5	16.4	0.8	+0.7 (+5%)
	P2	10.8	14.4	14.8	14.7	15.1	17.1	0.8	+0.6 (+4%)
Trauben-Eiche	P0	9.9	13.1	13.5	13.5	14	16	0.7	
	P1	10.6	13.7	14.2	14.1	14.6	16.4	0.7	+0.6 (+4%)
	P2	11.1	14.3	14.8	14.8	15.2	17.1	0.7	+0.7 (+5%)
Stiel-Eiche	P0	10.8	13.2	13.6	13.6	14	16	0.7	
	P1	11.4	13.7	14.2	14.2	14.6	16.6	0.7	+0.6 (+4%)
	P2	12.1	14.4	14.8	14.9	15.3	17.1	0.7	+0.7 (+5%)
Weiß-Tanne	P0	6.2	11.5	12.3	12.2	13.1	15.5	1.2	
	P1	7.0	12.1	12.9	12.9	13.8	16.4	1.2	+0.7 (+6%)
	P2	7.6	12.6	13.5	13.4	14.3	16.6	1.2	+0.5 (+4%)

Von P0 zu P1 nahm die Monatsmitteltemperatur um 0,7 °C und von P1 zu P2 um 0,6 °C zu (Tab. 8). Fichte und Weiß-Tanne standen auf den kühleren Trakten im Bereich von 11,6 °C bis 13,2 °C (Interquartilabstand Q1–Q3, P0) und einem Temperaturmittel von 12,3 °C. Auf den Trakten von Rot-Buche, Wald-Kiefer, Trauben- und Stiel-Eiche war die Temperatur etwa 0,7 °C bis 1 °C wärmer (Tab. 8) als bei den beiden zuvor genannten Arten. Allerdings lag der mittlere Temperaturbereich der Buche etwa 0,5°C unterhalb der Mitteltemperaturen von Wald-Kiefer, Trauben- und Stiel-Eiche. Die drei letztgenannten Arten haben einen engeren Temperaturbereich (~0,8°C, Interquartilabstand) im Vergleich zu Fichte, Rot-Buche und Weiß-Tanne mit einer Temperaturpanne von 1,3°C (Rot-Buche) bis 1,6°C (Fichte und Weiß-Tanne). Weiterhin fielen die Temperaturen auf den Trakten von Wald-Kiefer, Trauben- und Stiel-Eiche nicht unter 9°C. Auf den Standorten von Fichte, Rot-Buche und Weiß-Tanne konnten die Temperaturen auch bis zu 6°C erreichen. In den einzelnen Inventurperioden P1 und P2 wurde es auf den Standorten aller Baumarten um rund 0,6 °C wärmer. Über beide Inventurperioden betrachtet nahm die Temperatur im Durchschnitt 1,2 °C im Vergleich zu P0 zu.

3.1.2.2 Niederschlag

Im betrachteten Untersuchungszeitraum fielen auf den Inventurtrakten im Mittel etwa 500 mm(± 125) Niederschlag in der Vegetationszeit. Das entsprach etwa 40 bis 60% der Jahresniederschlagssumme für Westdeutschland. Mit einem Minimum von 300 mm und einem Maximum von etwa 1700 mm. Die beiden Eichenarten und die Wald-Kiefer hatten ihr Hauptvorkommen auf den trockeneren Standorten mit Niederschlagssummen zwischen 375 und 475 mm (25% und 75% Quantil) in der Vegetationsperiode. Die untere Niederschlagsgrenze lag bei 300 mm, die obere Grenze bei etwa 1100 mm, allerdings betraf dies einzelne, wenige Trakte. Auf den Fichtenstandorten fielen zwischen 450 und 700 mm Niederschlag auf 50% der Trakte. Die Niederschläge auf den Hauptstandorten der Weiß-Tannen lagen mit ca. 550 bis 780 mm in der Vegetationsperiode noch über denen der Fichtengebiete. Das Maximum erreichte hier bis 1600 mm. Die Buchenareale befanden sich im mittleren Niederschlagsbereich von etwa 400 bis 570 mm (25% und 75% Quantil). Aber auch sie kamen auf Standorten mit bis zu 1500 mm Niederschlagssumme

vor. Zwischen den einzelnen Perioden war keine nennenswerte Veränderung der Niederschlagssummen bei den einzelnen Baumarten zu beobachten. Bei Fichte, Rot-Buche, Wald-Kiefer und beiden Eichen war eine schwache Tendenz zunehmender Niederschläge auf den Trakten erkennbar. Auffälliger war, dass der Interquantilabstand des Niederschlags von Fichte und Weiß-Tanne (~200 mm) deutlich größer war, als bei den

Tab. 9: Übersicht der Niederschlagssummen und -änderungen der Inventur-Trakte für die einzelnen Baumarten in den drei Inventuren. Min.=Minimum, 1stQu.=25% Quantil, MW=Mittelwert, 3rdQu.=75% Quantil, Max.=Maximum, SD=Standardabweichung, Änderung MW=Änderung des Mittelwertes zur Vorperiode, P0=1970-1986, P1=1989-2001, P2=2002-2011.

Niederschlagssumme der Vegetationsperiode (IV-IX) (mm)									
Baumart	Periode	Min.	1st Qu.	Median	MW	3rd Qu.	Max.	SD	Änderung MW
Gemeine Fichte	P0	307	462	532	591	667	1717	194	
	P1	301	469	545	604	697	1695	197	+13 (+2%)
	P2	294	479	552	606	682	1710	187	+2 (-)
Rot-Buche	P0	304	402	461	500	539	1426	153	
	P1	296	407	464	509	558	1426	156	+9 (+2%)
	P2	294	424	479	519	562	1413	149	+10 (+2%)
Wald-Kiefer	P0	296	374	399	425	449	1035	82.7	
	P1	292	373	403	428	447	1059	89.8	+3 (+1%)
	P2	297	393	420	441	463	1063	77.8	+13 (+3%)
Trauben-Eiche	P0	305	367	390	414	447	910	74.2	
	P1	295	382	408	426	451	919	77	+12 (+3%)
	P2	320	400	426	442	464	928	70.4	+16 (+4%)
Stiel-Eiche	P0	296	376	412	426	454	935	72.4	
	P1	296	377	412	430	460	958	79.2	+4 (+1%)
	P2	294	394	421	439	467	900	73.9	+9 (+2%)
Weiß-Tanne	P0	334	523	622	647	707	1602	176	
	P1	315	541	642	668	740	1517	174	+21 (+3%)
	P2	331	533	630	652	712	1515	169	-16 (-2%)

Arten der trockeneren Standorte wie Wald-Kiefer, Trauben- und Stiel-Eiche (~75 mm). Der Interquantilabstand der Buche lag mit 140 mm im mittleren Bereich (Tab. 9).

3.1.2.3 De Martonne Index

Nach Klapp (2000) kann ein dMI unter 35 bei trockenheitssensitiven Arten zu leichten Trockenstresssymptomen führen. Ist er kleiner als 25, sind deutliche Trockenstresssymptome zu erwarten. Die Trakt-Standorte aller sechs Baumarten lagen fast vollständig oberhalb dieses Grenzwertes (Abb. 17). Die Trakte der trockenheitssensitiven Fichte befanden sich auch deutlich oberhalb von dMI 35. Die Weiß-Tanne hatte ihre Hauptverbreitung auf Arealen mit dMI >45. Die trockenheitstoleranteren Arten Wald-Kiefer, Stiel- und Trauben-Eiche standen überwiegend auf Standorten mit dMI-Werten

zwischen 30 und 40, während die Buchenareale klimatisch betrachtet zwischen den drei trockenheitstoleranteren Arten und den beiden humiden Arten Fichte und Tanne lagen. Zwischen den Perioden war kaum eine Veränderung der Klimaindices zu erkennen. Nur

Tab. 10: Übersicht des de Martonne Index und -änderungen der Inventur-Trakte für die einzelnen Baumarten in den drei Inventuren. Min.= Minimum, 1stQu.=25% Quantil, MW=Mittelwert, 3rdQu.=75% Quantil, Max.= Maximum, SD=Standardabweichung, Änderung MW= Änderung des Mittelwertes zur Vorperiode, P0=1970-1986, P1=1989-2001, P2=2002-2011.

De Martonne Index der Vegetationsperiode (IV-IX)									
Baumart	Periode	Min.	1st Qu.	Median	MW	3rd Qu.	Max.	SD	Änderung MW
Gemeine Fichte	P0	25.8	40.4	47.2	53.8	61.0	208.2	20.8	
	P1	24.6	39.8	47.4	53.3	61.0	196.0	20.3	-0.5 (-0.9%)
	P2	23.8	39.4	46.6	52.1	59.0	190.0	19.0	-1.1 (-2.1%)
Rot-Buche	P0	25.2	34.4	39.8	44.1	47.8	154.6	16.0	25.2
	P1	24.0	34.0	39.2	43.6	47.8	148.0	15.5	-0.5 24.0
	P2	23.8	34.2	39.4	43.4	47.0	147.0	14.7	-0.2 23.8
Wald-Kiefer	P0	23.4	31.4	34.0	36.5	38.8	98.6	8.2	
	P1	23.0	30.6	33.4	35.7	37.6	98.0	8.4	-0.8 (-2.1%)
	P2	22.0	31.6	33.8	35.8	37.8	93.8	7.3	+0.1 (0.3%)
Trauben-Eiche	P0	23.8	31.8	34.8	36.3	38.8	94.0	6.7	
	P1	23.8	31.2	34.2	35.7	38.6	93.0	6.7	-0.6 (-1.7%)
	P2	23.6	31.6	33.8	35.5	38.2	85.4	6.2	-0.2 (-0.5%)
Stiel-Eiche	P0	25.2	30.8	33.0	35.1	38.2	79.6	6.6	
	P1	23.8	31.4	33.8	35.3	37.4	77.4	6.9	+0.1 (+0.3%)
	P2	24.0	31.8	34.2	35.7	38.0	77.2	6.5	+0.4 (+1.2%)
Weiß-Tanne	P0	27.0	46.6	54.6	58.9	65.4	181.0	19.1	
	P1	24.8	46.4	55.2	59.0	66.6	164.0	18.2	+0.1 (+0.1%)
	P2	25.6	44.8	52.6	56.2	62.8	158.6	17.4	-2.7 (-4.7%)

auf den Standorten der Weiß-Tanne verringerte sich der dMI-Wert in P2 im Vergleich zu den beiden vorherigen Perioden.

3.1.2.4 Relative Häufigkeit von Trockenmonaten (rHTM)

Auf den Standorten mit häufiger Trockenheit kamen am ehesten Wald-Kiefer und beide Eichenarten vor, mit 20 bis 40 % trockener Monate (rHTM) während der Vegetationsperiode (25 % und 75 % Quantil), bei Extremwerten von 0 % bis 60 %. Ihnen folgten die Buchenareale mit 10 % bis 30 % rHTM. Die Fichtenstandorte hatten eine Häufigkeit von 5% bis 25%. Der geringsten Anzahl von Trockenmonaten war die Weiß-Tanne ausgesetzt mit 5 % bis knapp 20 %. Sie hatte auch den engsten Interquantilabstand. Bei allen anderen Arten war der Interquantilabstand deutlich breiter (Abb. 17). Die rHTM zeigte zwischen den Perioden eine größere Dynamik als der dMI. Bei allen sechs

Baumarten verringerte sich die mittlere rHTM von P0 zu P1. Das bedeutete, dass die Anzahl der Trockenmonate in der ersten Zuwachsperiode geringer wurde. Von P1 zu P2

Tab. 11: Übersicht der relativen Häufigkeit von Trockenmonaten der Inventur-Trakte für die einzelnen Baumarten in den drei Inventuren. Min.= Minimum, 1stQu.=25% Quantil, MW=Mittelwert, 3rdQu.=75% Quantil, Max.= Maximum, SD=Standardabweichung, Änderung MW= Änderung des Mittelwertes zur Vorperiode, P0=1970-1986, P1=1989-2001, P2=2002-2011.

Relative Häufigkeit trockener Monate (%)									
Baumart	Periode	Min.	1st Qu.	Median	MW	3rd Qu.	Max.	SD	Änderung MW
Gemeine Fichte	P0	0.0	7.0	14.0	15.3	22.0	48.0	9.7	
	P1	0.0	5.0	14.0	14.0	21.0	56.0	9.9	-1.4
	P2	2.0	11.0	17.0	17.6	24.0	57.0	9.0	+3.6
Rot-Buche	P0	0.0	14.0	23.0	22.5	31.0	55.0	10.6	
	P1	0.0	12.0	22.0	21.4	30.0	56.0	11.2	-1.0
	P2	2.0	15.8	24.0	23.6	32.0	57.0	10.1	+2.1
Wald-Kiefer	P0	0.0	23.0	31.0	28.7	35.0	55.0	9.2	
	P1	1.0	22.0	31.0	28.7	36.0	56.0	10.7	+0.0
	P2	2.0	25.0	32.0	30.2	35.0	57.0	8.5	+1.5
Trauben-Eiche	P0	5.0	24.0	31.0	28.7	33.0	55.0	8.8	
	P1	3.0	24.0	29.0	28.8	36.0	56.0	9.6	+0.1
	P2	8.0	24.0	31.0	29.9	36.0	56.0	8.2	+1.1
Stiel-Eiche	P0	3.0	24.0	32.0	30.3	37.0	50.0	8.3	
	P1	3.0	24.0	29.0	28.8	35.0	56.0	9.6	-1.5
	P2	7.0	25.0	32.0	30.2	37.0	57.0	8.2	+1.4
Weiß-Tanne	P0	0.0	6.0	10.0	10.9	14.0	41.0	6.6	
	P1	0.0	3.0	7.0	8.2	11.0	44.0	6.5	-2.7
	P2	2.0	10.0	13.0	14.2	18.0	43.0	6.4	+6.0

nahm die Häufigkeit wieder zu. Dieser Effekt war baumartenspezifisch unterschiedlich stark ausgeprägt. Am deutlichsten trat er bei der Weiß-Tanne hervor.

3.1.3 Klimahüllen der Inventurtrakte

Die Klimaveränderung im etwa 25jährigen Inventurzeitraum wird über die Verschiebung der Klimahüllen für Temperatur und Niederschlagssumme während der drei Perioden deutlich (Abb. 18). Insbesondere die dargestellte Häufigkeitsdichte zeigt die Anzahl der Trakte, die durch die Veränderungen betroffen waren. Die roten Flächen (Abb. 18) weisen auf eine große Dichte von Trakten im Klimabereich hin, die über den Farbverlauf zu grün hin abnimmt. Es handelt sich hierbei um Dichtewerte, die die Gesamtzahl der Trakte in einem Klimabereich einer Baumart zeigt. Da es sich nicht um absolute Werte handelt, können die Dichtebereiche der Arten nicht direkt miteinander verglichen werden. Die

grauen Punkte zeigen einzelne Traktpunkte außerhalb der Dichtematrix. Die schwarzen Linien in Abb. 18 markieren die Medianwerte für Niederschlag und Temperatur in der Periode P0 und dienen als Orientierungshilfe, um Verschiebungen der Dichtebereiche in den drei Perioden besser erkennen zu können. Auf die Ausdehnung der Klimahüllen bezogen lassen sich drei Gruppen erkennen. Die Klimahülle der Weiß-Tanne hatte die größte Ausdehnung. Sie deckt den größten Klimabereich ab, obwohl sie mit 1084 Trakten nur etwa ein Viertel so viele Standorte besiedelt wie Fichte und Buche. Beide folgen mit einer etwas geringeren Ausdehnung. Deutlich kleiner sind die Klimahüllen von Wald-Kiefer, Trauben- und Stiel-Eiche. In P0 befinden sich die Dichtezentren (rot und orange) der Klimahüllen von Fichte, Rot-Buche, Wald-Kiefer und beiden Eichenarten nahe der Mittleren Temperatur- und Niederschlagssumme. Das Dichtezentrum der Weiß-Tanne dagegen lag oberhalb der mittleren Niederschlagssumme (auf der x-Achse in Abb. 18 nach rechts versetzt). In den folgenden beiden Perioden verschoben sich die Klimahüllen aller sechs Baumarten hin zu höheren Temperaturen (pro Periode etwa um 0,6 C). Damit einhergehend verschoben sich auch die Dichtezentren.

Die Niederschlagssumme hingegen veränderte sich kaum. Tendenziell nahm der Niederschlag der Vegetationsperiode etwa 20-40 mm pro Inventurperiode zu. Für Gemeine Fichte, Rot-Buche, Wald-Kiefer und beide Eichenarten trat dieser Trend vor allem in P2 deutlicher hervor. Bei der Weiß-Tanne blieb die Niederschlagsmenge weitgehend unverändert.

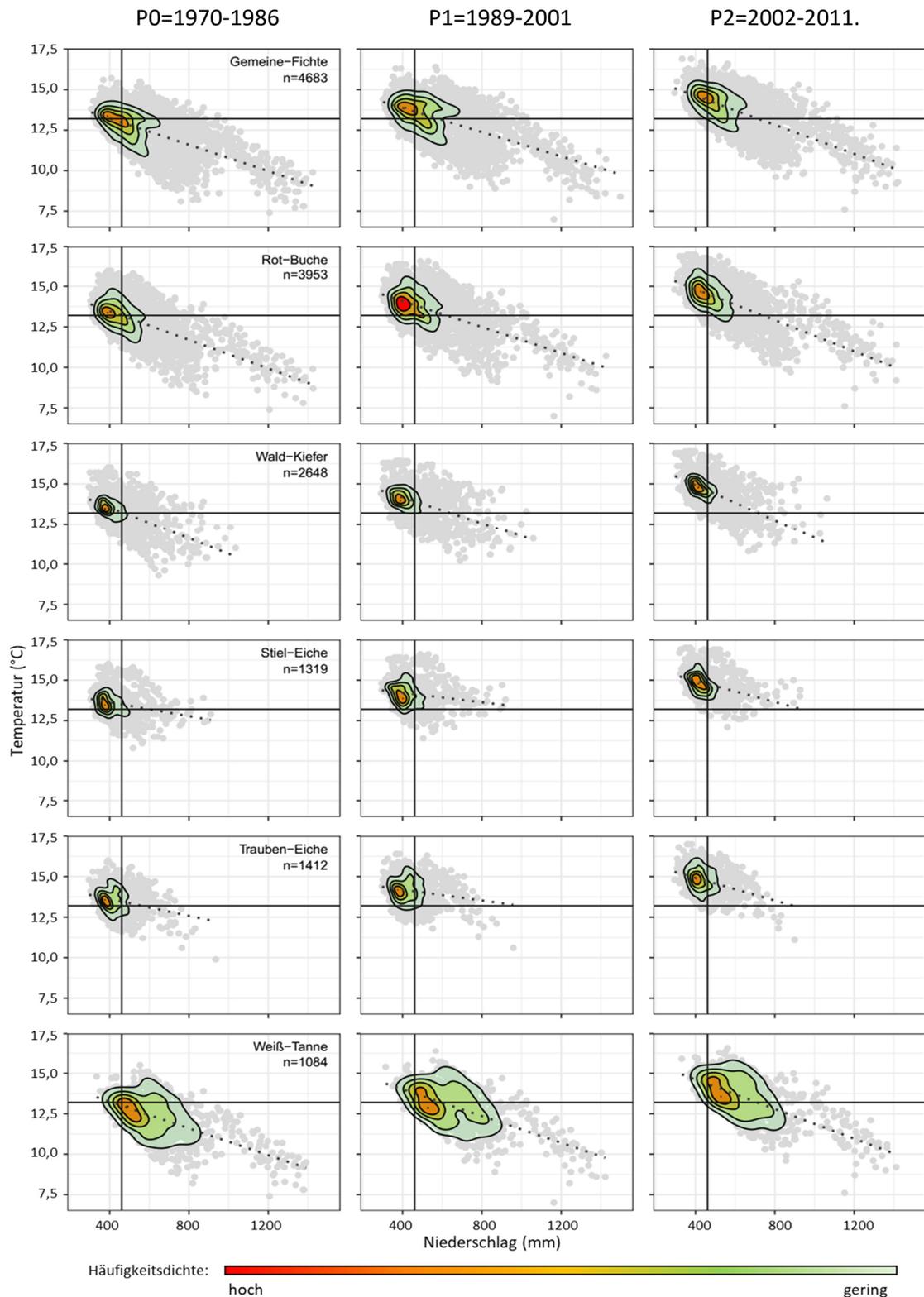


Abb. 18: Dichteverteilung der Trakte in Abhängigkeit von Niederschlag und Temperatur. Die roten Flächen weisen auf eine große Dichte von Takten in dem Klimabereich hin, die über den Farbverlauf zu Grün hin abnimmt. Es handelt sich hierbei um Dichteverteilungen, die in Abhängigkeit der Gesamtzahl der Trakte einer Baumart berechnet wurden. Die grauen Punkte zeigen einzelne Traktunkte. Die schwarzen Linien markieren die Mittelwerte für Niederschlagssumme und Temperatur in der Periode P0 (1970 bis 1986) und dienen als Orientierungshilfe, um Verschiebungen der Dichtebereiche zu erfassen. n= Anzahl der Trakte.

3.1.4 Jährlicher Durchmesserzuwachs der Hauptbaumarten

Am wüchsigsten, über den Gesamtzeitraum (BW11 zu BW13) betrachtet, zeigte sich die Weiß-Tanne mit einem mittleren jährlichen Zuwachs von $5 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ und einem Maximum von $11 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$, gefolgt von Fichte mit $4,5 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ und $9 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ mittleren beziehungsweise maximalen Zuwächsen. Die Rot-Buche stand mit $4 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ mittlerem und $8 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ maximalem Zuwachs vor den beiden Eichenarten Stiel-Eiche ($3,8 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ und $7,6 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$) und Trauben-Eiche ($3,2 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ und $6,4 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$) auf dem dritten Rang. Die geringste Zuwachsleistung hatte die Wald-Kiefer mit $2,9 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ mittleren und $7,6 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ maximalem jährlichen Zuwachs (Abb. 19, Tab. 12).

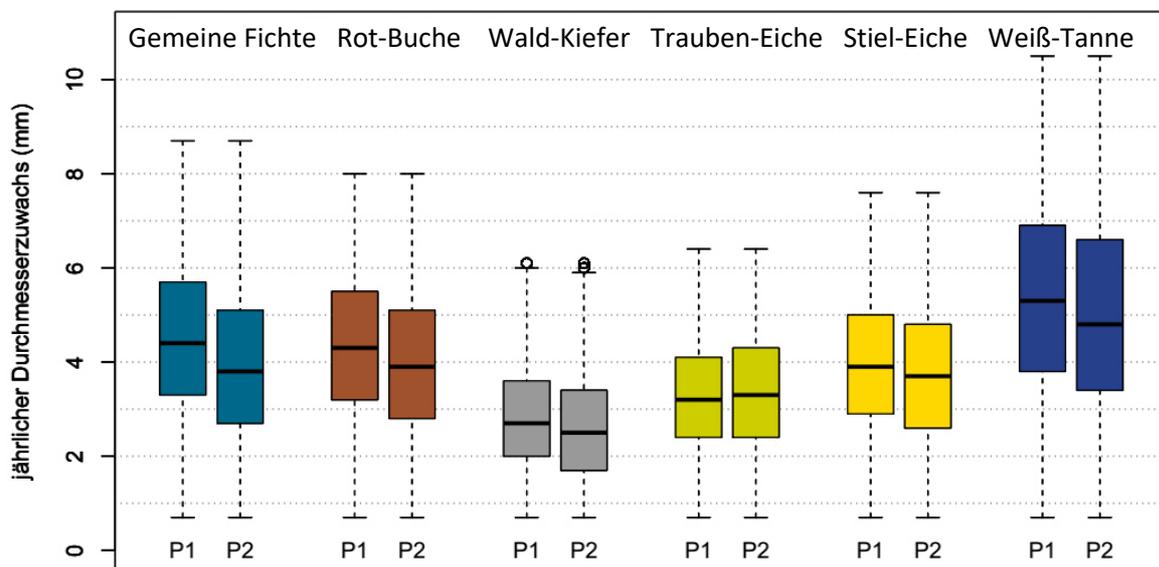


Abb. 19: Boxplot der jährlichen Durchmesserzuwächse der beiden Zuwachsperioden.

Der Vergleich der Durchmesserzuwächse der beiden Inventurperioden P1 und P2 ergab für alle Baumarten einen signifikant höheren Zuwachs in P1 gegenüber P2 (Wilcoxon-Test, $p < 0,05$). Allerdings fiel der Test für die Trauben-Eiche mit $p = 0,0443$ recht knapp aus, sodass hier ein Unterschied nicht eindeutig erkennbar war. Die größte Abweichung der Zuwächse in den Perioden hatte die Weiß-Tanne mit 20 %. Darauf folgte die Kiefer mit 14 % Unterschied. Bei Rot-Buche und Weiß-Tanne betrug die Abweichung der Zuwächse 10 %. Am geringsten war der Unterschied des Zuwachses zwischen P1 und P2 bei der Stiel-Eiche mit 5 %.

Tab. 12: Jährliche Durchmesserzuwächse (mm) der Hauptwirtschaftsbaumarten mit ihren statistischen Kennzahlen. MW=Mittelwert, SD=Standardabweichung, Var=Varianz

Baumart	Period	25%.	Median	MW	75%	SD	Var
Gemeine Fichte	P1	3.2	4.5	4.4	5.8	1.8	3.2
	P2	2.4	3.7	3.5	4.9	1.7	3.0
Rot-Buche	P1	2.8	4.1	4.0	5.3	1.7n	2.8
	P2	2.5	3.8	3.6	4.9	1.6	2.7
Wald-Kiefer	P1	2.0	2.9	2.8	3.8	1.2	1.5
	P2	1.6	2.5	2.4	3.3	1.2	1.5
Trauben-Eiche	P1	2.2	3.2	3.1	4.0	1.3	1.6
	P2	2.2	3.2	3.1	4.2	1.4	1.8
Stiel-Eiche	P1	2.7	3.8	3.6	4.8	1.5	2.2
	P2	2.3	3.5	3.4	4.6	1.6	2.5
Weiß-Tanne	P1	3.3	5.1	5.0	6.7	2.3	5.3
	P2	3.0	4.7	4.5	6.3	2.2	4.9

3.2 Untersuchungen der Zuwachsreaktion der Hauptbaumarten auf Klima und Klimaveränderungen

3.2.1 Klimaabhängige Zuwachsreaktion der Hauptbaumarten

Die Zuwachs-Hüllen (Abb. 20) für die klimaabhängigen Zuwachsreaktionen ließen drei unterschiedliche Muster erkennen. In acht Fällen war der Zuwachs bei kühlen und sehr feuchten Bedingungen am geringsten und nahm tendenziell mit steigenden Temperaturen und abnehmenden Niederschlägen zu, wie beispielsweise bei der Rot-Buche.

In zwei Fällen, bei Fichte und Weiß-Tanne in P2, war der Zuwachs bei feuchten und warmen Temperaturen am geringsten und bei trockenen und warmen Bedingungen am höchsten (Abb. 20, B u. L).

Die Wald-Kiefer zeigte ein abweichendes Muster. Sie wuchs bei Niederschlägen zwischen 500 und 700 mm und Temperaturen unterhalb 12°C am geringsten. Den größten Zuwachs erreichte sie bei hohen Temperaturen und geringen Niederschlägen. Allerdings wuchs sie auch bei höheren Niederschlägen stärker zu als bei mittleren Niederschlägen. Die Abbildungen 21a und 21b zeigen den Zuwachs im Zusammenhang mit der relativen Häufigkeit von Trockenmonaten (x-Achse) sowie für Niederschlag beziehungsweise Temperatur (y-Achse). Die Hüllen für Niederschlag und Klimaindex hatten eine abfallende

Tendenz. Dies bedeutet, dass bei hohen Niederschlägen die Häufigkeit von Trockenheit geringer war. Umgekehrt hatten die Hüllen für Temperatur und Klimaindex tendenziell einen steigenden Verlauf. Hierdurch wurde deutlich, dass sowohl Niederschlag als auch Temperatur in einem gerichteten Zusammenhang mit dem Klimaindex stehen⁴.

Die Zuwachsreaktionen für die relativen Häufigkeiten von Trockenmonaten waren variabler als bei den Niederschlags-Temperaturhüllen.

Bei der **Fichte** waren die Zuwachsmuster in den Perioden P1 und P2 unterschiedlich (Abb. 20, A u. B). In P1 hatte sie ihre beste Wachstumsleistung oberhalb 14 °C und Niederschlägen zwischen 400 bis 700 mm. Am geringsten wuchs sie bei extrem hohen Niederschlägen und geringen Temperaturen unter 12°C. In P2 war der höchste Zuwachs unterhalb 15 °C bei geringen bis sehr geringen Niederschlägen.

Die Klimahüllen für die relative Häufigkeit von Trockenmonaten ergaben in P1 einen hohen Zuwachs bei leichter bis mäßiger Trockenheit zwischen 5% und 35% (Abb. 21a, A). Die optimalen Niederschlagsmengen lagen zwischen 400 und 600 mm und Temperaturen oberhalb von 13 °C (Abb. 21a, C). In P2 folgte der Zuwachs einem Trockenheitsgradienten. Die Zuwachshüllen für Klimaindex und Niederschlag (Abb. 21a, B) sowie für Klimaindex und Temperatur (Abb. 21a, D) haben steigende Zuwächse bei zunehmender Trockenheit. Am geringsten waren die Zuwächse bei hohen Niederschlägen und sehr hohen Temperaturen.

Die Zuwachsreaktionen der **Rot-Buche** waren in beiden Zeiträumen bei allen Klima-Projektionen sehr ähnlich. Sie wuchs am besten bei Niederschlägen zwischen 400 und 650 mm und Temperaturen oberhalb von 13 °C zu (Abb. 20, C u. D). Am geringsten war der Zuwachs bei hohen bis sehr hohen Niederschlägen oberhalb von 700 mm und Temperaturen unterhalb von 12°C.

Bei geringer Trockenheit in Kombination mit hohen Niederschlägen (Abb. 21a E u. F) oder Temperaturen unter 12 °C (Abb. 21a G u. H) verringerte sich die Zuwachsleistung.

⁴ Bei den Klimahüllen für den de Martonne Index und die beiden Klimafaktoren Temperatur und Niederschlag (nicht gezeigt) beeinflusste vor allem der Niederschlag den de Martonne Index. Die Temperatur hatte hier nur eine geringe Wirkung.

Die **Wald-Kiefer** hatte in beiden Perioden ein ähnliches Zuwachsmuster (Abb. 20, E u. F). Es unterschied sich von denen der anderen Baumarten dadurch, dass sowohl bei geringen als auch hohen Niederschlagssummen (> 800 mm) die Zuwächse durchschnittlich bis hoch waren, während sie bei mittleren Niederschlägen zwischen 550 und 700 mm am geringsten ausfielen. Weiterhin war ein Temperatureinfluss zu beobachten. Mit steigenden Temperaturen nahm der Durchmesserzuwachs zu. Dieses Zuwachsmuster konnte auch bei den Zuwachsreaktionen von Klimaindex und Niederschlag in P1 beobachtet werden (Abb. 21a, I). In P2 nahm der Zuwachs von geringer Trockenheit zu sehr häufiger Trockenheit zu (Abb. 21a, J). Häufige Trockenheit und hohe Temperaturen führten bei der Waldkiefer zu einem hohen Durchmesserwachstum (Abb. 21a, K u. L).

Die beiden **Eichenarten** wiesen ein ähnliches Zuwachsmuster mit hohen Zuwächsen bei niedrigen bis mittleren Niederschlägen und Temperaturen oberhalb von 14°C sowie bei hohen Niederschlägen und steigenden Temperaturen unter 14°C auf. Wobei die Trauben-Eiche ihr Zuwachsoptimum bei Niederschlägen zwischen 400 und 600 mm hatte (Abb. 20, G u. H), während die Stiel-Eiche bei Niederschlägen unter 400 mm den höchsten Zuwachs erzielte (Abb. 20, I u. J). Dieser Trend war auch bei den Zuwachshüllen für relative Häufigkeit von Trockenmonaten und Niederschlag zu beobachten (Abb. 21b M, N u. R, S). Die Trauben-Eiche hatte ihren optimalen Zuwachsbereich zwischen 15 % bis 55 % Häufigkeit von Trockenmonaten und mittleren Niederschlägen. Bei geringer Trockenheit unter 15 % und Niederschlägen über 700 mm war ihr Zuwachs am geringsten (Abb. 21b M u. N). Auch die Diagramme für Klimaindex und Temperatur folgten diesem Muster. Die Trauben-Eiche zeigte bei seltener Trockenheit und niedrigen Temperaturen ein geringes Zuwachsvermögen. Mit zunehmenden Temperaturen fiel ihr Zuwachs höher aus (Abb. 21b; O u. P).

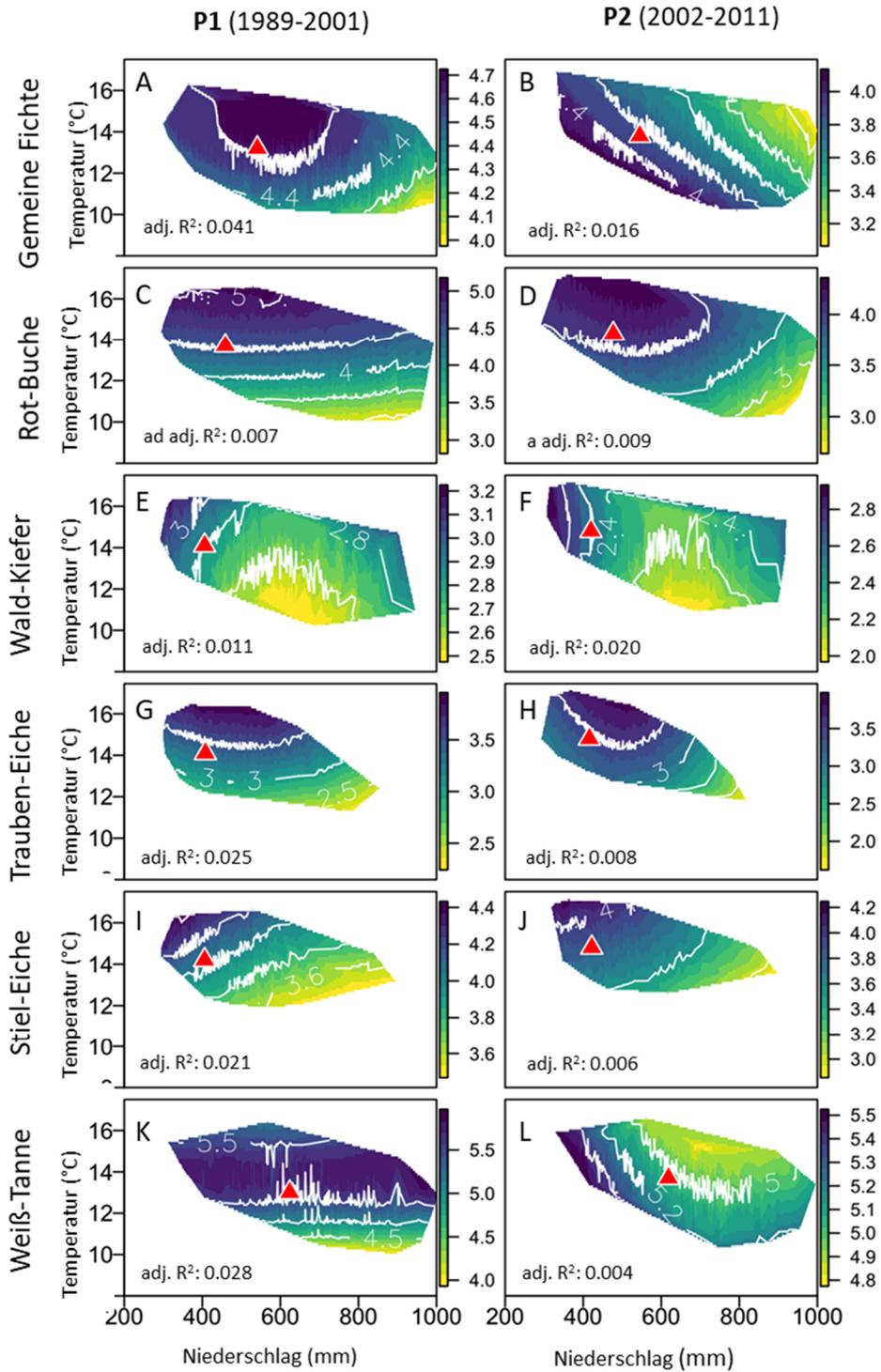


Abb. 20: Jährlicher Durchmesserzuwachs in Abhängigkeit von Temperaturmittel und Niederschlagssumme der Vegetationsperiode (IV-IX) in P1 und P2. Der Farbgradient wird mit steigendem Zuwachs dunkler. Das rote Dreieck in den Diagrammen zeigt den Median von Niederschlagssumme und Temperatur.

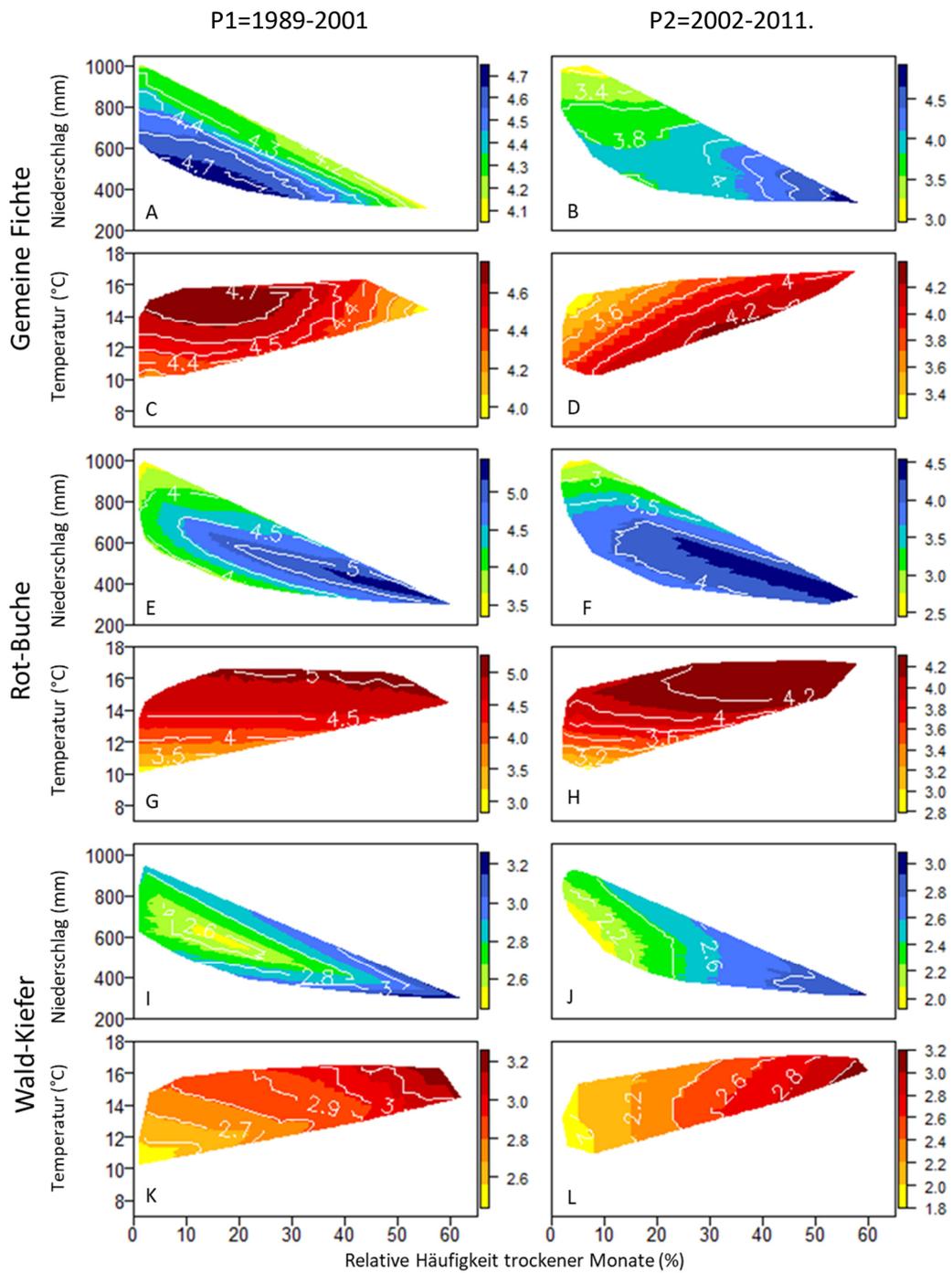


Abb. 21a: Jährlicher Durchmesserzuwachs in Abhängigkeit von der Relativen Häufigkeit Trockener Monate und Temperaturmittel bzw. Niederschlagssumme der Vegetationsperiode (IV-IX) für Gemeine Fichte, Rot-Buche und Wald-Kiefer.

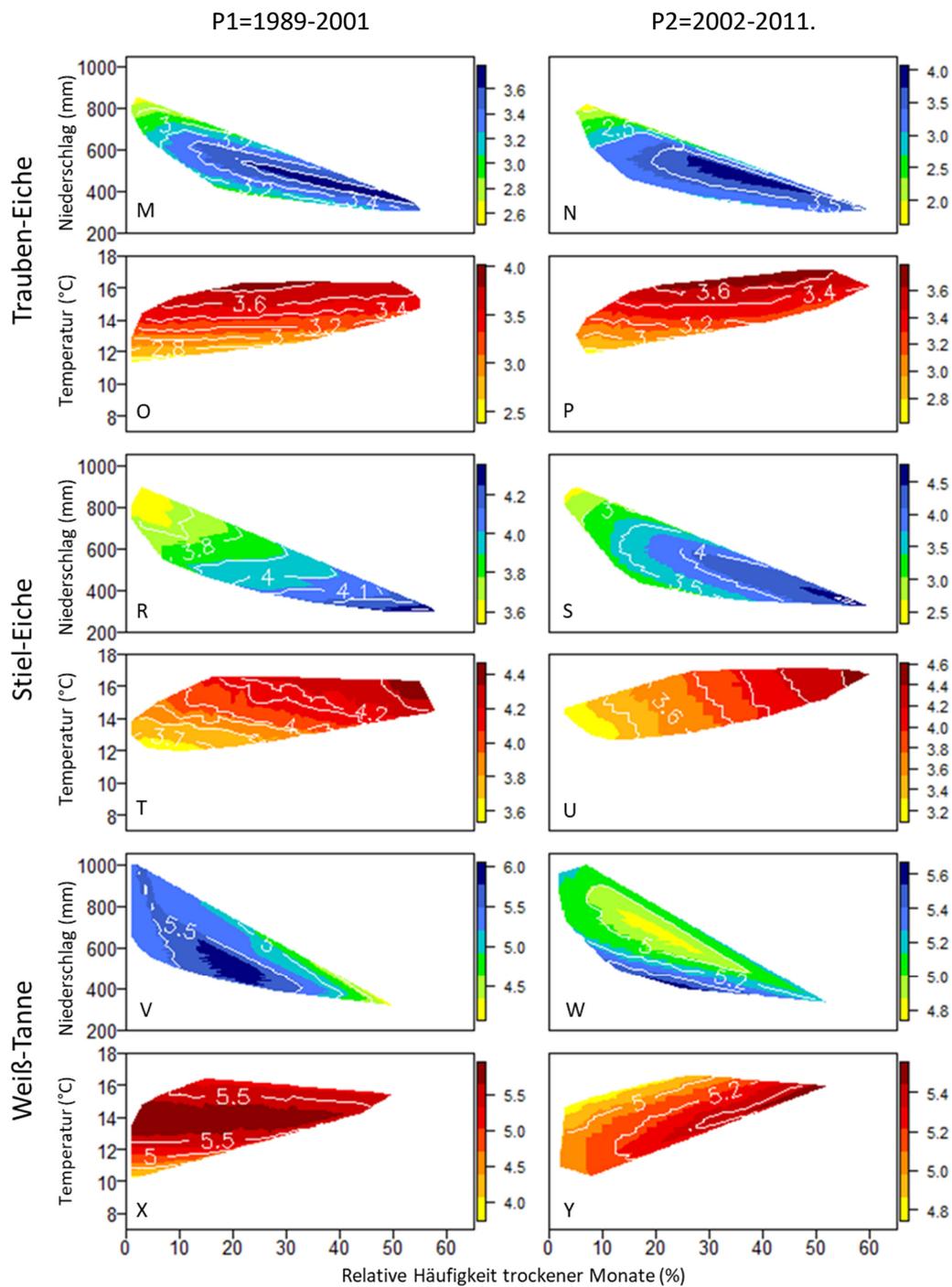


Abb. 21b: Jährlicher Durchmesserzuwachs (mm) in Abhängigkeit von der Relativen Häufigkeit Trockener Monate und Temperaturmittel bzw. Niederschlagssumme der Vegetationsperiode (IV-IX) für Trauben-Eiche, Stiel-Eiche und Weiß-Tanne.

Bei der Stiel-Eiche folgte der Zuwachs einem Trockenheits-Niederschlagsgradienten. Er war bei hoher Trockenheit und geringen Niederschlägen am höchsten und nahm mit geringer werdender Feuchte und zunehmendem Niederschlag ab (Abb. 21b R u. S).

Die Zuwachshülle für den Klimaindex und Temperatur zeigte diesen Trend in P2 (Abb. 15b U). In P1 war er nicht eindeutig nachvollziehbar (Abb. 21b T).

Die **Weiß-Tanne** hatte in den beiden Perioden unterschiedliche Zuwachsmuster. In P1 war der Zuwachs bei einem Temperaturbereich von 12 °C bis 15 °C und über das gesamte Niederschlagsspektrum hoch. Oberhalb von 15°C war der Zuwachs geringer (Abb. 20, K u. L). Bei niedrigen Temperaturen und hohen Niederschlägen, wie sie im alpinen Bereich auftraten, wuchs die Weiß-Tanne am schwächsten zu. In P2 war eine ähnliche Veränderung des Zuwachsverhaltens wie bei der Fichte zu beobachten, mit geringen Zuwächsen bei warmen (>15°C) und feuchten bis nassen Bedingungen und guter Wüchsigkeit bei trockenen und warmen Klima.

Die Zuwachsmodelle für relative Häufigkeit von Trockenmonaten und Niederschlag zeigten für beide Perioden ein ähnliches Muster. Das Zuwachsoptimum befand sich bei 10% bis 40% trockener Monate und Niederschlägen unterhalb von 800 mm Niederschlag⁵ (Abb. 21b, V bis Y).

3.2.2 Vergleich humider und arider Standorte

Abbildung 22 zeigt den Vergleich der Zuwächse zwischen den fünf Kategorien *sehr seltene*, *seltene*, *mittlere*, *häufige* und *sehr häufige* Trockenmonate (rHTM) und mit dem mittleren Gesamtzuwachs. In 8 von 12 Fällen war der durchschnittliche Zuwachs der Kategorien *häufige* und *sehr häufige* Anzahl von Trockenmonaten geringer als der mittlere Zuwachs. Der Zuwachs der Kategorien *häufige* und *sehr häufige* Trockenmonate hingegen fiel vor allem in der zweiten Zuwachsperiode (P2) überdurchschnittlich aus. In vielen Fällen stieg der mittlere Zuwachs entlang des Gradienten von *sehr seltener* Trockenheit nach *sehr häufiger* Trockenheit an. Besonders ausgeprägt war dieser Trend bei Fichte, Trauben-

⁵ Der visuelle Eindruck, dass sich beide Perioden unterscheiden kann durch die unterschiedliche Skalierung entstehen.

3.2.3 Zuwachsreaktionen unter Berücksichtigung des Klimas und der nutzbaren Feldkapazität des effektiven Wurzelraumes (nFKWe)

Betrachtet man die Zuwachsreaktionen der Hauptbaumarten im Kontext der nutzbaren Feldkapazität des effektiven Wurzelraumes (nFKWe) und der Häufigkeit von Trockenmonaten, ließ sich bei häufiger Trockenheit ein Zusammenhang zwischen Zuwachs und nFKWe erkennen. Bei mittlerer Häufigkeit von Trockenmonaten war in den meisten Fällen der Zuwachs zwischen den einzelnen Klassen der nFKWe nicht signifikant unterschiedlich (Abb. 23).

In der Kategorie *häufige Trockenmonate* konnten zwei unterschiedliche Typen von Zuwachsreaktionen beschrieben werden. Bei Gemeiner Fichte, Rot-Buche, Trauben-Eiche und Weiß-Tanne waren die Zuwächse bei *sehr geringer* nFKWe niedriger als bei *geringer* bis *sehr hoher* nFKWe (Abb. 23). Der Trend war in beiden Zuwachsperioden (P 1 und P 2) ähnlich. Bei Wald-Kiefer und Stiel-Eiche waren die Zuwachswerte bei *sehr geringer* nFKWe und *häufiger* Trockenheit gleich hoch oder tendenziell höher als bei den übrigen nFKWe-Klassen. Dieser Unterschied war jedoch nicht statistisch signifikant.

Für Gemeine Fichte und Weiß-Tanne war bei *häufiger* Trockenheit ein Zuwachsanstieg mit zunehmender nFKWe zu beobachten. Auch bei der Rot-Buche war dieser Zusammenhang erkennbar, jedoch weniger deutlich ausgeprägt. Bei der Auswertung ist aber zu beachten, dass, die Anzahl der Einzelbäume in der Klasse *sehr geringe* und *sehr hohe* nFKWe bei allen Baumarten in den meisten Fällen geringer als in den übrigen nFKWe-Klassen waren. Bei der Weißtanne waren in der Kategorie *häufige* Trockenmonate insgesamt wenige Bäume vertreten, obwohl für sie *häufige* Trockenmonate bereits mit $r_{HTM} > 30\%$ definiert war. Für die übrigen Baumarten galt *häufige* Trockenheit ab $r_{HTM} > 40\%$ (bei Fichte ab $r_{HTM} > 35\%$). Bei der Wald-Kiefer fiel bei der Klasse *mittlere Häufigkeit* von Trockenmonaten auf, dass der Zuwachs neben den Standorten mit *sehr geringer* nFKWe auch auf Arealen mit *sehr hoher* nFKWe hoch ist. Rot-Buche, Wald-Kiefer und Trauben-Eiche waren zu über 50 % auf Standorten mit *sehr geringer* und *geringer* nFKWe verbreitet (Abb. A5 im Anhang), während Fichte, Stiel-Eiche und Weiß-Tanne nur zu etwa 40 % auf trockenen Standorten vorkamen. Zum überwiegenden Teil waren die drei Arten auf Arealen mit *mittlerer* und *hoher* nFKWe zu finden.

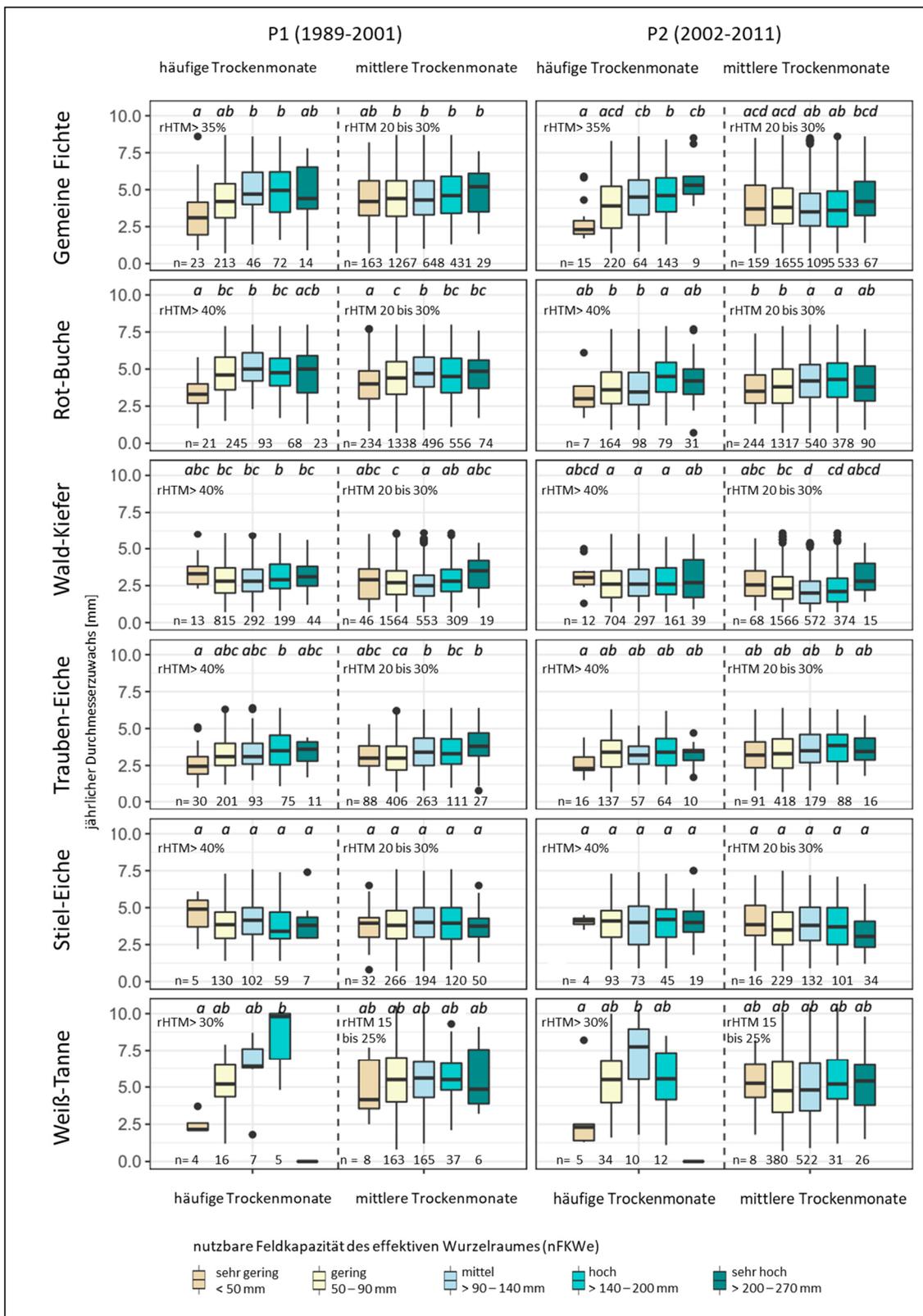


Abb. 23: Boxplot des jährlichen Durchmesserzuwachses der Hauptbaumarten in Abhängigkeit der Wasserspeicherkapazität (nutzbare Feldkapazität des effektiven Wurzelraumes) für häufige und mittlere Trockenhäufigkeit (rHTM). Die Abbildung zeigt beide Zuwachsperioden P 1 (links) und P2 (rechts). Ziffern (n) unter den Boxplots geben die Anzahl der jeweiligen Einzelbäume pro nFKWe-Klasse an. Die Buchstaben oberhalb des Boxplots zeigen die Resultate des Dunn-Post-Hoc Tests. Die Klassifizierung der nutzbaren Feldkapazität des effektiven Wurzelraumes erfolgte nach (Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden der Staatlichen Geologischen Dienste und der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe 2005).

3.2.4 Hotspot-Analyse

Die HotSpot-Analysen ergaben in den meisten Fällen für beide Perioden und alle Baumarten betrachtet für über 50 % der Einzelbäume keine Clusterung in Bezug auf den Zuwachs. Das heißt, dass in den meisten Regionen die Zuwächse der Einzelbäume sehr stark variierten, sodass kein räumliches Muster vorlag. Nur Rot-Buche und Weiß-Tanne hatten in P2 eine höhere Clusterrate (Tab. 13). Bei allen übrigen Gruppen lag der Anteil nicht signifikanter Individuen zwischen 51 % (Stiel-Eiche P1) und 72 % (Stiel-Eiche P2). Das Verhältnis von signifikanten High- und LowClustern war in den meisten Gruppen zu gleichen Anteilen verteilt. Nur bei der Weiß-Tanne war der Unterschied zwischen der Anzahl der High- und LowClustern sehr groß. In P1 waren 129 (4 %) Einzelbäume in HighClustern und 1205 (41 %) LowClustern zugeordnet, in P2 waren es 118 (8 %) High- und 1145 (81 %) LowCluster.

Tab 13: Ergebnisse der HotSpot Analyse mit ArcGis.

Baumart	P1		P2		Cluster-Typ
	Anzahl	(%)	Anzahl	(%)	
Gemeine Fichte	3246	(19)	3107	(15)	high
	4247	(24)	4308	(21)	low
	9767	(57)	13153	(64)	nicht signifikant
Rot-Buche	2164	(20)	3031	(30)	high
	2572	(24)	2697	(27)	low
	6037	(56)	4395	(43)	nicht signifikant
Wald-Kiefer	1529	(17)	1849	(19)	high
	2598	(27)	2407	(24)	low
	5154	(56)	5638	(57)	nicht signifikant
Trauben-Eiche	548	(19)	534	(20)	high
	772	(27)	664	(25)	low
	1557	(54)	1423	(55)	nicht signifikant
Stiel-Eiche	507	(24)	261	(14)	high
	538	(25)	279	(14)	low
	1117	(51)	1397	(72)	nicht signifikant
Weiß-Tanne	129	(4)	118	(9)	high
	1205	(41)	1145	(81)	low
	1643	(55)	149	(10)	nicht signifikant

Für die **Fichte** konnten zwei größere Cluster mit höheren Zuwächsen im Südwesten Deutschlands von Nordschwarzwald (73) bis zum südwestdeutschen Alpenvorland (77) und entlang der Deutsch-Tschechischen-Grenze vom Frankenwald (57) bis zum Bayrischen Wald (79) lokalisiert werden (Abb. 24a, A).

Die Cluster mit geringen Zuwächsen lagen im Bereich des Südlichen Schwarzwaldes (73)

und den Bayerischen Alpen. In Mittel- und Norddeutschland gab es nur kleinräumige Cluster, hier war der Zuwachs auf lokaler Ebene variabler.

In Periode 2 ließen sich drei größere Gebiete mit HighClustern und drei mit LowClustern erkennen. Ein HighCluster erstreckte sich vom Niederrhein (42, 43) bis ins Sauerland (40). Ein weiteres befand sich im Harz (36). Dieses war zwar räumlich nicht sehr groß, wies aber eine hohe Signifikanz auf. Das dritte HighCluster lag im Bereich der Schwäbischen Alb (76) und dem Alpenvorland (77). In Norddeutschland war eine kleinräumige Clusterbildung erkennbar (Abb. 24a, B).

Die drei LowCluster lagen im südlichen bis mittleren Schwarzwald (73), im Voralpen- und Alpenraum (82) sowie entlang der Deutsch-Tschechischen-Grenze (57, 58, 79).

Zwischen den beiden Zuwachsperioden konnten zum Teil recht deutliche Veränderungen des Zuwachses beobachtet werden (Abb. 24a, C). Am auffälligsten war eine Abnahme des Zuwachses entlang der Deutsch-Tschechischen-Grenze und im mittleren Schwarzwald (73). In Mitteldeutschland (37) und insbesondere am Harz (36) war eine lokale Zuwachszunahme von P1 nach P2 zu beobachten.

Für die **Rot-Buche** gab es in P1 (Abb. 24a, D) ein größeres HighCluster im Bereich Odenwald (64) und Neckarland (75). In drei Gebieten waren Cluster mit geringen Zuwächsen zu finden. Sie lagen in den Mittelgebirgen, im Gebiet vom südlichen Schwarzwald (73) bis Schwäbische Alb (76) und in den Bayerischen Alpen (82).

In der zweiten Zuwachsperiode (P2) (Abb. 24a, E) waren drei markantere HighCluster und fünf LowCluster zu erkennen. Das größte HighCluster befand sich wie in P1 im Bereich von Odenwald (64) und Neckarland (75). Die beiden anderen HighCluster lagen in Nordschleswig Holstein (2) und im Harz (36). Die drei LowCluster waren wie auch schon in der Periode zuvor in den Mittelgebirgen (37), im südlichen Schwarzwald (73) und in den Bayerischen Alpen (82) zu finden.

Die Zuwachsänderungen von P1 zu P2 (Abb. 24a, F) wiesen lokal gesehen eine Ähnlichkeit mit denen der Fichte auf. Bedeutende Zunahmen waren besonders in Ost-Schleswig-Holstein (2), dem Harz (36) und der Schwäbischen Alb (76) zu beobachten. Zuwachsrückgänge gab es vor allem in Süddeutschland. Am auffälligsten waren sie im Bereich vom Nordschwarzwald (73) bis zum Spessart (63) sowie im Wuchsgebiet Südwestdeutsches Alpenvorland (70).

Die **Wald-Kiefer** hatte in beiden Perioden ein großes Cluster mit hohen Zuwächsen im Bereich des Niedersächsischen Tieflandes und zwei kleinflächigere Cluster in Mittel- und Süddeutschland (Abb. 24b, G u. H). In Süddeutschland war der Zuwachs der Kiefer jedoch überwiegend gering. Der Zuwachs verringerte sich von P1 nach P2 (Abb. 24b, I) großräumig in Norddeutschland und entlang der Deutsch-Tschechischen Grenze vom Tertiären Hügelland (78) über den Bayrischen Wald (79) bis zum Frankenwald (57). Im Odenwald (64), dem Fränkischen Keuper nahm der Zuwachs von P1 zu P2 zu.

Bei der **Trauben-Eiche** waren die Cluster hoher Zuwächse eher in Mittel- bis Süddeutschland vornehmlich zwischen Spessart (63), Odenwald (64) und Nordschwarzwald (73) zu finden (Abb. 24c; M). Cluster niedriger Zuwächse gab es im Gebiet von Eifel (44, 45) bis Westerwald (47), im Taunus (48) sowie im Grenzbereich von Fränkischer Platte (62) und Neckarland (75) (Abb.:24c, M, N).

Die **Stiel-Eiche** zeigte vor allem im Norddeutschen Tiefland hohen Zuwachs (Abb. 24c, P), ähnlich der Wald-Kiefer, wobei sich das Cluster bei der Stiel-Eiche bis nach Nord Schleswig-Holstein (1, 2, 3) erstreckte. Signifikant niedrige Zuwachscluster waren im Gebiet um das Sauerland (40) und Westerwald (47) sowie im Bereich nordöstliches Neckarland (75) und Fränkische Platte (62) verteilt. In P2 war die Zuwachssituation ähnlich, wobei die High- und LowCluster kleiner ausfielen als in P1 (Abb. 24c, Q). Bei der Stiel-Eiche wiesen die Zuwachsänderungen nur eine geringfügige Clusterung auf.

Die **Weiß-Tanne** hatte ihren Verbreitungsschwerpunkt in Süddeutschland von den Alpen bis zum Odenwald. Hier kam sie in Gebirgslagen wie Schwarzwald, Alpenvorland und den Alpen vor (Abb. 24b, L). Im Nordschwarzwald und dem Alpenvorland zeigte sie in beiden Perioden hohe Zuwächse. Im Südschwarzwald und den Bayrischen Alpen wuchs sie geringer zu (Abb. 24b, J, K). Allerdings nahm der Zuwachs hier von P1 zu P2 zu, während er im mittleren und nördlichen Schwarzwald geringer wurde (Abb. 24b, L).

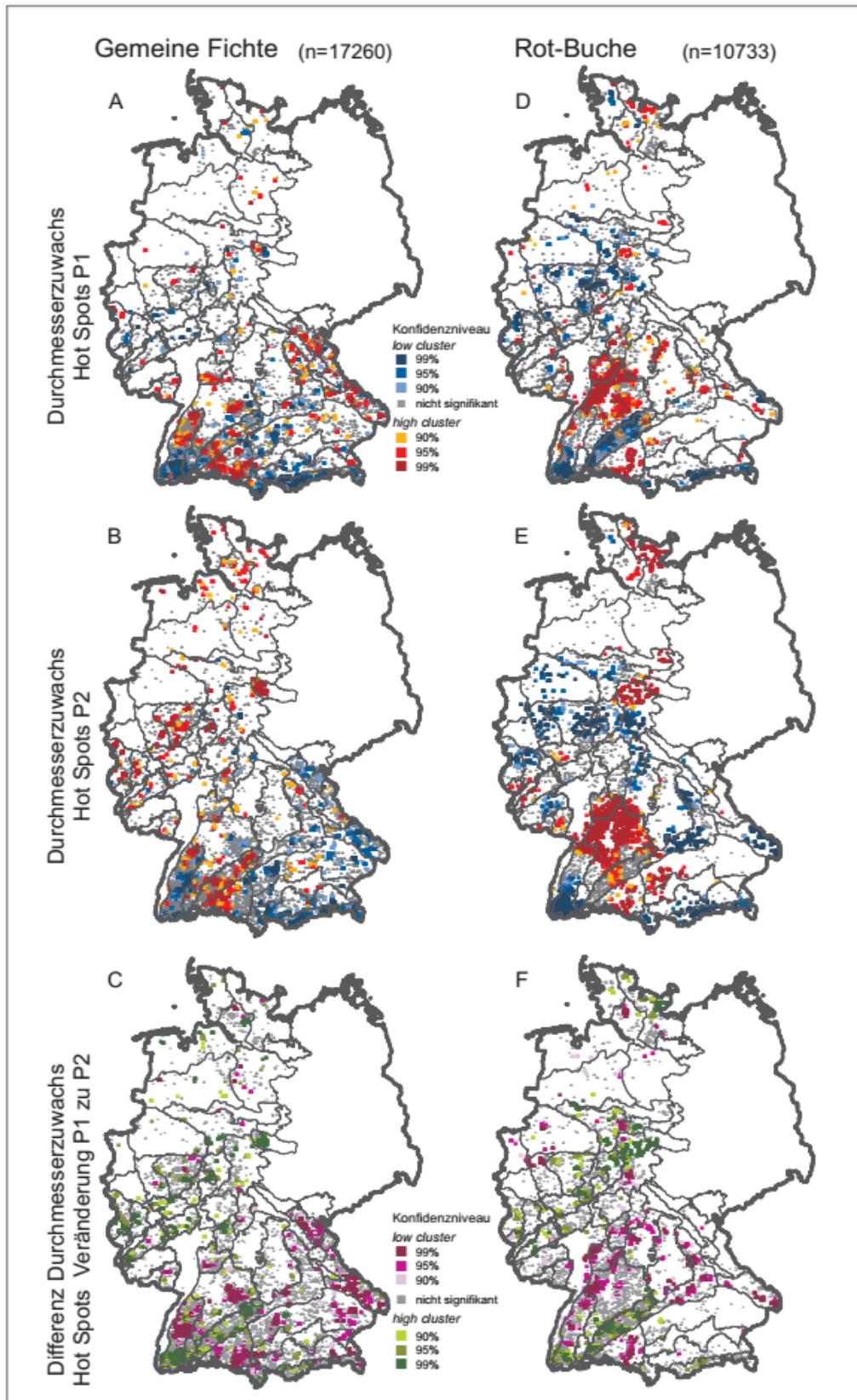


Abb. 24a: Ergebnisse der räumlichen Clusteranalysen von Fichte und Rot-Buche. Für die Durchmesserzuwächse P1 und P2 (A-E) sind die HighCluster in rot und die LowCluster in blau abgebildet. Für die Veränderung des Durchmesserzuwachses beider Zuwachsperioden (C u. F) sind HighCluster in grün und die LowCluster in violett dargestellt. Die Abstufungen der Farbintensität geben das 99%, 95% und 90% Konfidenzniveau wider.

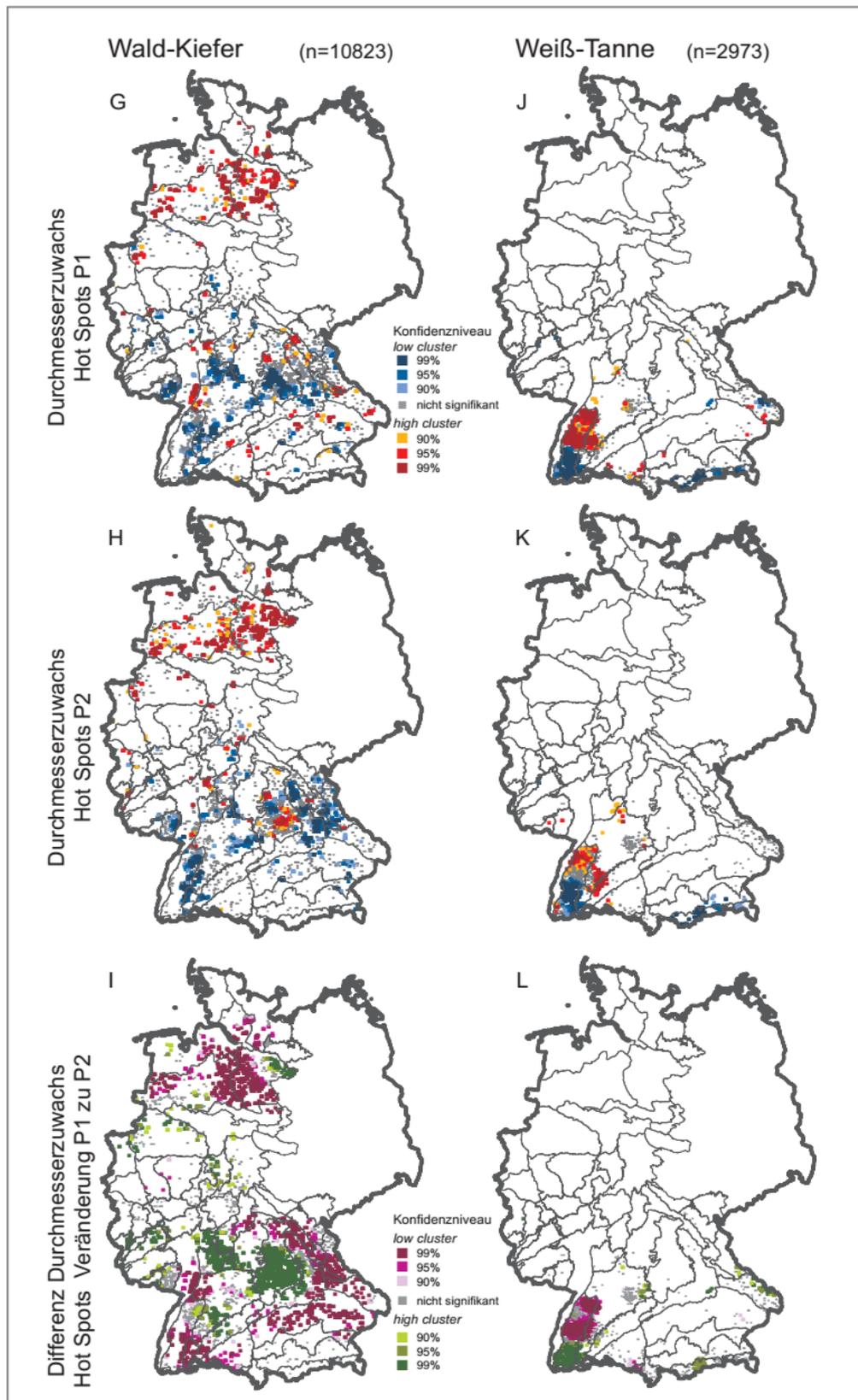


Abb. 24b: Ergebnisse der räumlichen Clusteranalysen von Wald-Kiefer und Weiß-Tanne. Für die Durchmesserzuwächse P1 und P2 (G-K) sind die HighCluster in rot und die LowCluster in blau abgebildet. Für die Veränderung des Durchmesserzuwachses beider Zuwachsperioden (I u. L) sind HighCluster in grün und die LowCluster in violett dargestellt. Die Abstufungen der Farbintensität geben das 99%, 95% und 90% Konfidenzniveau wider.

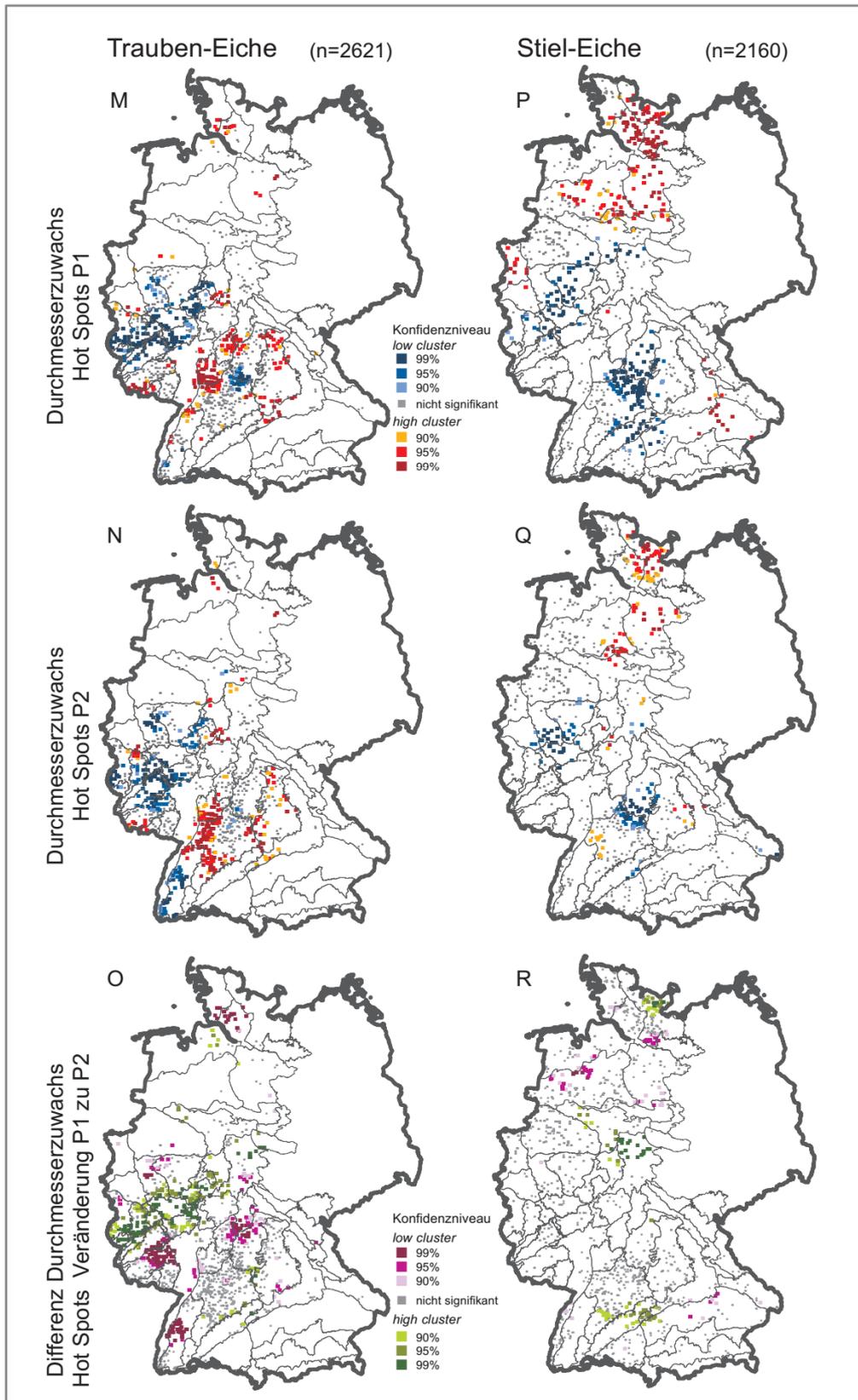


Abb. 24c: Ergebnisse der räumlichen Clusteranalysen von Trauben-Eiche und Stiel-Eiche. Für die Durchmesserzuwächse P1 und P2 (M-Q) sind die HighCluster in rot und die LowCluster in blau abgebildet. Für die Veränderung des Durchmesserzuwachses beider Zuwachsperioden (O u. R) sind HighCluster in grün und die LowCluster in violett dargestellt. Die Abstufungen der Farbintensität geben das 99%, 95% und 90% Konfidenzniveau wider.

3.2.5 Verteilung der High- und LowCluster

Die Verteilungsdiagramme (Abb. 25) der HighCluster (○) und LowCluster (○) in Abhängigkeit von Niederschlag (x-Achse) und Temperatur (y-Achse) zeigten für alle Baumarten eine gute Wüchsigkeit bei Temperaturen oberhalb von 12°C. Bei Fichte, Buche und Tanne war der Durchmesserzuwachs bei 400 bis 800 mm Niederschlag hoch, während Wald-Kiefer und die beiden Eichenarten im Niederschlagsbereich zwischen 400 und 550 mm hohe Zuwächse erzielten. Die LowCluster ließen allerdings keinen Rückschluss auf einen klimabedingten Zusammenhang erkennen, da sie über den

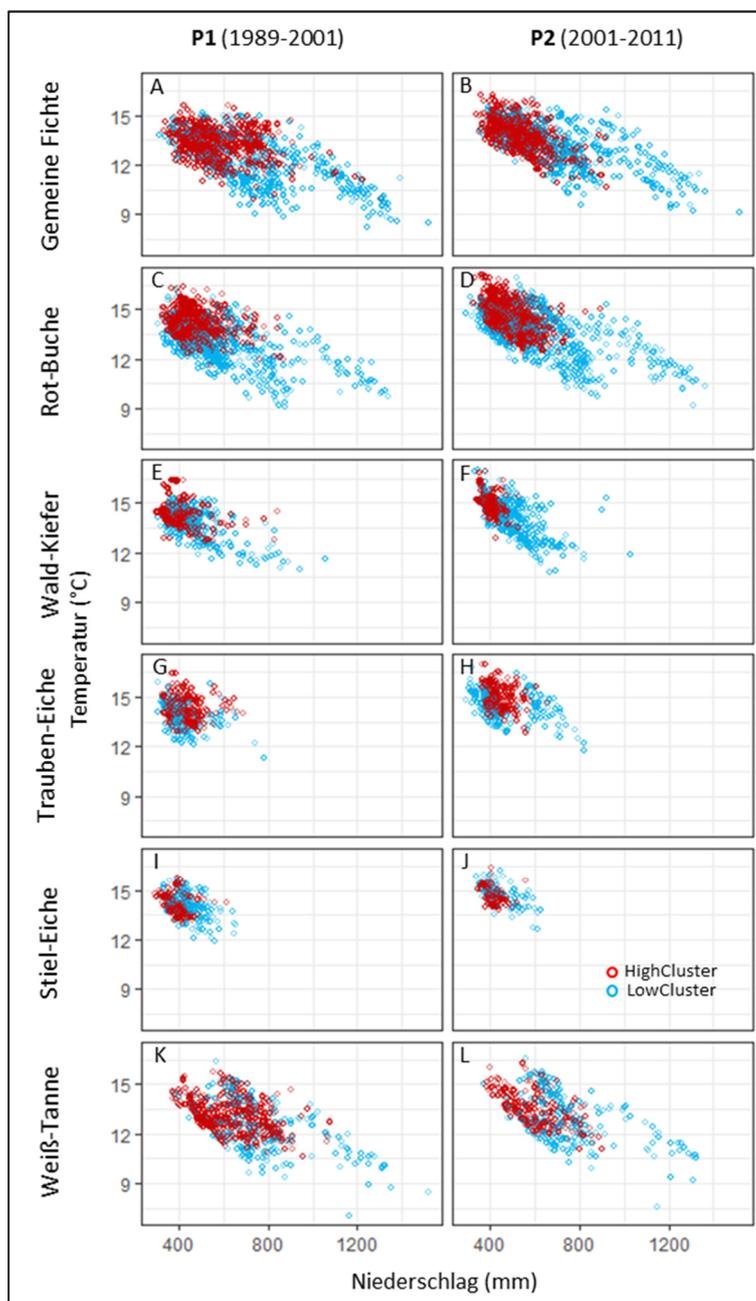


Abb. 25: Scatter-Plot der Verteilung der Cluster in Abhängigkeit von Temperatur (X-Achse) und Niederschlag (Y-Achse).

gesamten Klimabereich verteilt lagen. Bei der Fichte (Abb. 25 B) fiel in P2 auf, dass sie auch bei warmen Temperaturen mit hohen Niederschlägen (> 600 mm) geringer zuwuchs. Fichte und Buche (Abb. 25, B u. D) hatten in P2 auch bei steigenden Temperaturen und geringen Niederschlägen eine gute Wuchsleistung. Für die Trauben-Eiche war wegen der variablen Verteilung von High- und LowClustern keine klimatische Präferenz zu erkennen. In P2 war das HighCluster etwa zwischen 400 und 600 mm Niederschlag etwas dichter. Bei der Stiel-Eiche befanden sich die HighCluster eher im unteren Niederschlagsbereich. Dieses Zuwachsmuster zeigte eine ähnliche Ausprägung wie die Zuwachsregressionen (Abb. 25, G bis I). Die Verteilung der High- und LowCluster der Weiß-Tanne ließ keinen Zusammenhang von Klima und Zuwachs erkennen, da beide Cluster über den gesamten Klimabereich streuten. Lediglich bei Temperaturen unter 10°C und Niederschlägen oberhalb von 800 mm waren die Zuwächse überwiegend gering.

3.2.6 Klimaabhängige Zuwachsreaktionen der High- und LowCluster

Anhand der Regressionskurven (Abb. 17 a bis d) ließen sich unterschiedliche Zuwachstrends der Bäume in den High- und LowCluster im Bezug zu den Klimavariablen erkennen. Die Bäume der HighCluster hatten bei allen Modellen einen höheren Zuwachs als die der LowCluster.

Vor allem für Fichte und Rot-Buche konnten die Trends aller Modelle als recht zuverlässig erachtet werden, da hier die Konfidenzintervalle relativ eng waren. Bei Stiel-Eiche und Weiß-Tanne waren die Modellprognosen am wenigsten genau. Besonders in den oberen und unteren Wertebereichen zeigte sich eine starke Prognoseunsicherheit. Wald-Kiefer und Trauben-Eiche variierten in ihrer Modelgüte je nach Klimafaktor.

Die Regressionskurven von Niederschlag und de Martonne Index hatten ein sehr ähnliches Verlaufsmuster. Zwischen den Baumarten war nur bei Trauben- und Stiel-Eichen ein annähernd gleichartiger Verlauf der Regressionskurven zu beobachten. Die übrigen Baumarten zeigten überwiegend einen individuellen Zuwachstrend.

Bei der **Fichte** verliefen die Regressionskurven für High- und LowCluster entgegengesetzt. Die Bäume des HighCluster hatten einen steigenden Zuwachs bei wärmeren Temperaturen. Bei den Bäumen innerhalb der LowCluster stieg der Zuwachs bis etwa

12,5 °C an und fiel dann mit zunehmenden Temperaturen ab (Ab. 26a). Bei der Niederschlagssumme verlief die Zuwachskurve entgegengesetzt zur Temperaturkurve. Mit zunehmender Niederschlagsmenge verringerte sich der Zuwachs bei den Bäumen innerhalb der HighCluster.- Bei den Bäumen der LowCluster nahm der Zuwachs mit zunehmenden Niederschlägen größer. Während er in P2 eine stetige Zunahme beobachtet werden konnte, trat in P1 ab ca. 550 mm Niederschlag eine Zuwachsstagnation auf. Die Zuwachsreaktionen für die beiden Trockenheitsindices de Martonne Index und relative Häufigkeit von Trockenmonaten bestätigten diesen Trend. Bei den HighCluster Bäumen nahm der Zuwachs mit zunehmender Trockenheit zu.

Bei den **Buchen** innerhalb der HighCluster konnte für die verwendeten Modelleinstellungen nur ein Model für P2 berechnet werden. Hier stieg der Zuwachs bis etwa 15 °C an und verringerte sich mit steigenden Temperaturen (Abb. 25a). Die Bäume des LowClusters zeigten einen über das gesamte Temperaturspektrum leicht steigenden Trend. Niederschlag und de Martonne Index (Abb. 25a, 25b) ergaben für die HighCluster einen unterschiedlichen Zuwachstrend in den beiden Perioden. In P1 war der Zuwachs bis 500 mm Niederschlag bzw. dMI 50 gleichbleibend und stieg dann mit zunehmender Feuchte an. In P2 verlief der Zuwachs ebenfalls bis 500 mm Niederschlag bzw. dMI 50 gleichbleibend, fiel dann aber ab. Der Verlauf der Zuwachskurven für die relative Häufigkeit von Trockenmonaten hatte einen ähnlichen Verlauf wie bei Niederschlag und dMI. Dieser fiel aber weniger intensiv aus.

Bei der **Wald-Kiefer** war für die meisten Cluster kein Effekt des Klimas auf den Zuwachs zu beobachten (Abb. 25a, 25b), da die Regressionskurven annähernd horizontal verliefen. Nur bei der Temperatur und dem de Martonne Index (Abb. 25b) zeigten die Kiefern innerhalb der HighCluster in P2 eine Zuwachsreaktion. Steigende Temperaturen hatten einen abnehmenden Zuwachstrend zur Folge. Für Niederschlag und de Martonne Index ergaben die Modelle tendenziell einen steigenden Zuwachstrend bei feuchteren Bedingungen.

Die beiden **Eichenarten** zeigten bei fast allen Regressionen einen ähnlichen Zuwachstrend (Abb. 25a, 25b). Die Stiel-Eiche hatte jedoch tendenziell einen höheren Zuwachs als die Trauben-Eiche.

In P1 war bei der Trauben-Eiche bei steigenden Temperaturen keine Zuwachsreaktion zu beobachten. Die Stiel-Eiche zeigte innerhalb der HighCluster eine leicht steigende Zuwachstendenz. In P2 war bei beiden Arten ein verringerter Zuwachs bei steigenden Temperaturen zu erkennen. Auffällig war, dass der Zuwachs in P2 bei geringeren Temperaturen zunächst höher war als in P1. Bei hohen Temperaturen fiel er unter den Zuwachs von P1 zurück. Die Regressionsgeraden schneiden sich bei beiden Baumarten bei ca. 14,5 °C.

Die Eichen innerhalb der LowCluster zeigten in beiden Perioden steigenden Zuwachs bei zunehmenden Temperaturen.

Für den Faktor Niederschlag und beide Klimaindices ergaben die Modelle einen ähnlichen Wachstumstrend. Die Bäume der HighCluster wuchsen bei feuchten Bedingungen besser zu als unter trockenen Verhältnissen. Bei den Bäumen der LowCluster verringerte sich der Zuwachs bei zunehmender Feuchte. Allerdings nahm bei der Stiel-Eiche die Aussagekraft der Regressionen bei hoher Feuchte ab.

Die Regressionen für die **Weiß-Tanne** zeigten über die betrachteten Baumarten hinweg die höchste Prognoseunsicherheit (Abb. 25a, 25b). Dadurch ließen sich kaum zuverlässige Aussagen der Zuwachstrends treffen. Die Weiß-Tannen der HighCluster wuchsen bei höheren Temperaturen besser zu als bei kühlem Klima. Für Niederschlag und den Martonne Index war kein Effekt auf den Zuwachs erkennbar. Bei der relativen Häufigkeit von Trockenmonaten war bei den HighClustern nur in P2 eine Zuwachsreaktion erkennbar. Bis etwa 20% rHTM lag der Zuwachs bei etwa 5 mm und nahm von da an mit steigender Trockenheit zu. Bei den LowClustern war bei zunehmender Trockenheit, ein Rückgang des jährlichen Durchmesserzuwachses in beiden Perioden, zu beobachten. Für Temperatur, Niederschlagssumme und den Martonne Index zeigten die Zuwachskurven der LowCluster in beiden Perioden einen unterschiedlichen Verlauf. In P1 war die Kurve konvex gekrümmt. Der Zuwachs nahm zunächst mit steigender Temperatur bzw. Feuchte zu. Ab etwa 13°C und 600 mm Niederschlag (dMI 50) verringerte sich der Zuwachs tendenziell. In P2 war der Zuwachs bei geringeren Temperaturen am höchsten und nahm mit steigenden Temperaturen ab. Bei Niederschlag und dem Martonne Index nahm er mit zunehmender Feuchte zu.

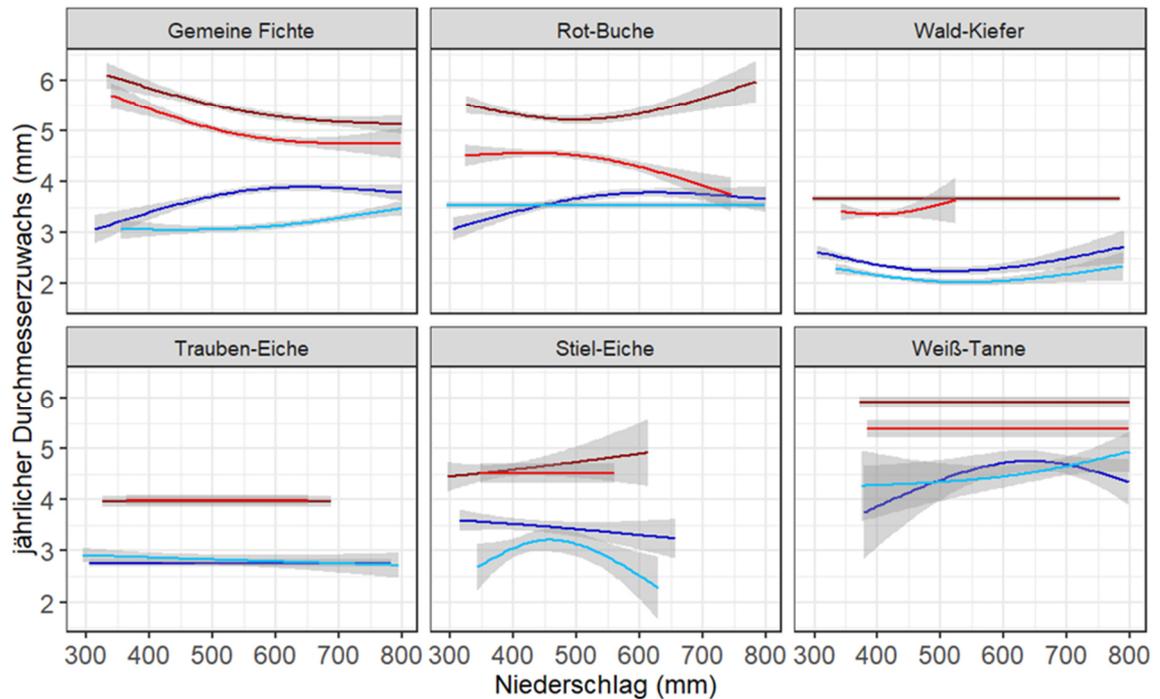
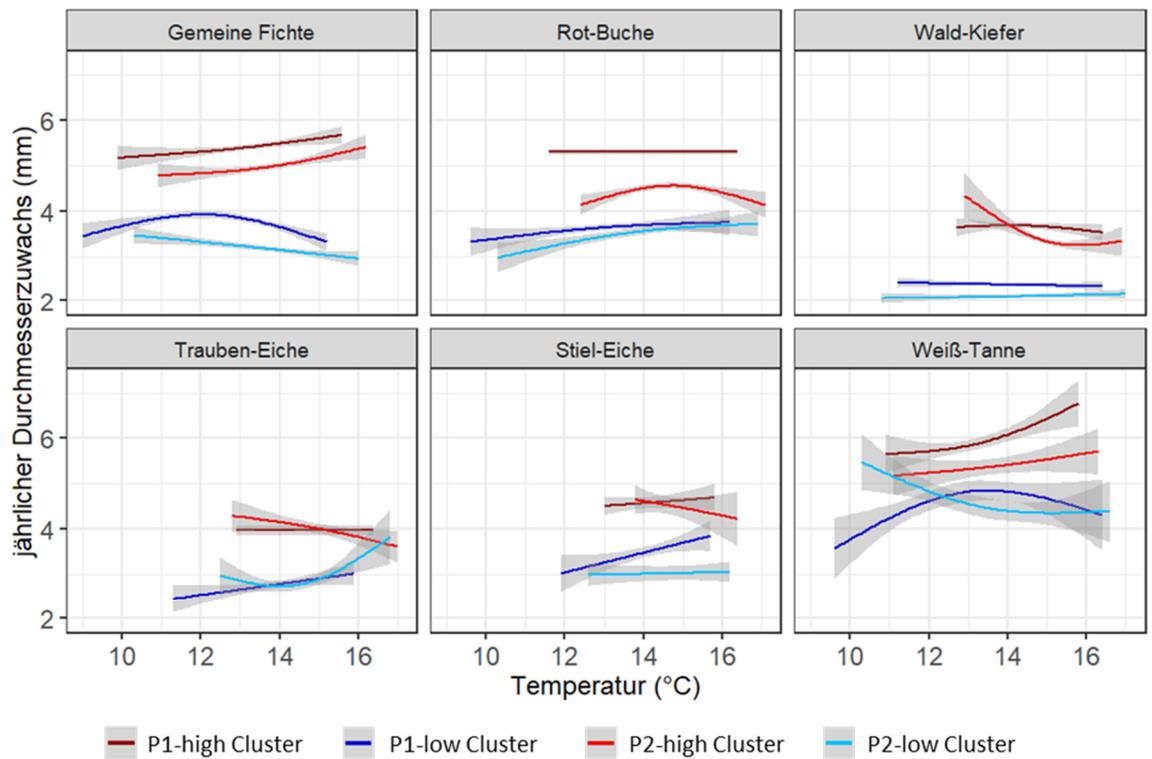
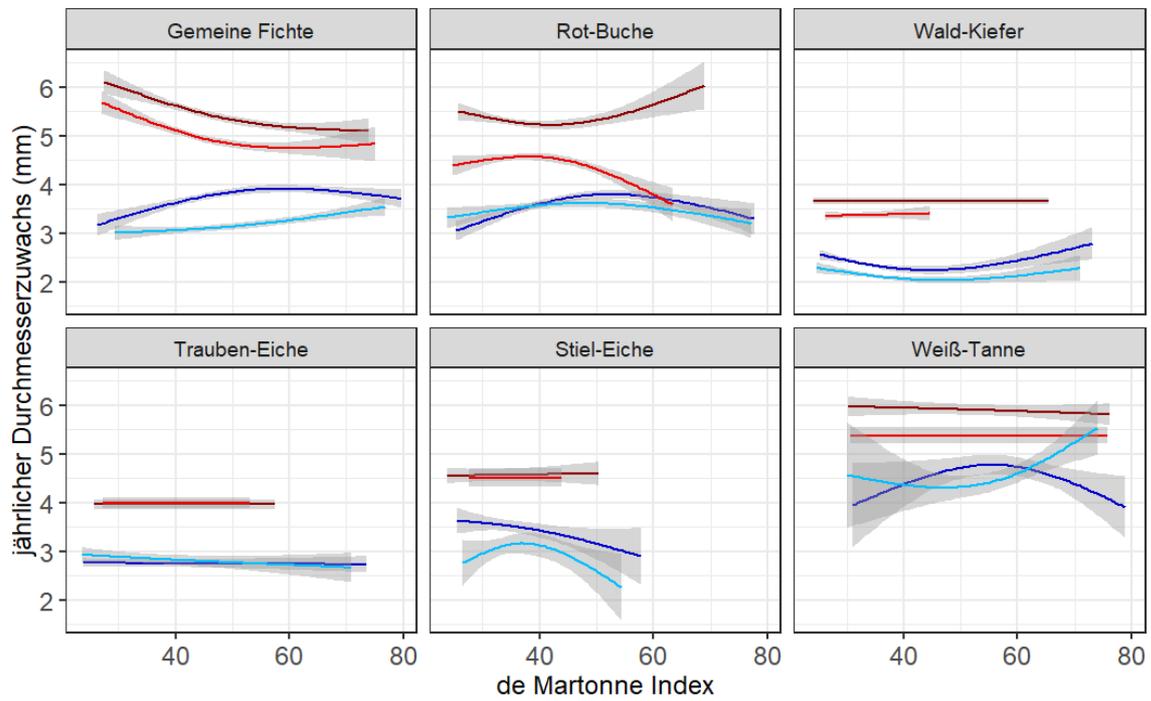


Abb. 26a: Klimaabhängigen Zuwachskurven der High- und LowCluster. Die Berechnungen erfolgten mit Generalisierten Additiven Modellen (gam)



■ P1-high Cluster
 ■ P1-low Cluster
 ■ P2-high Cluster
 ■ P2-low Cluster

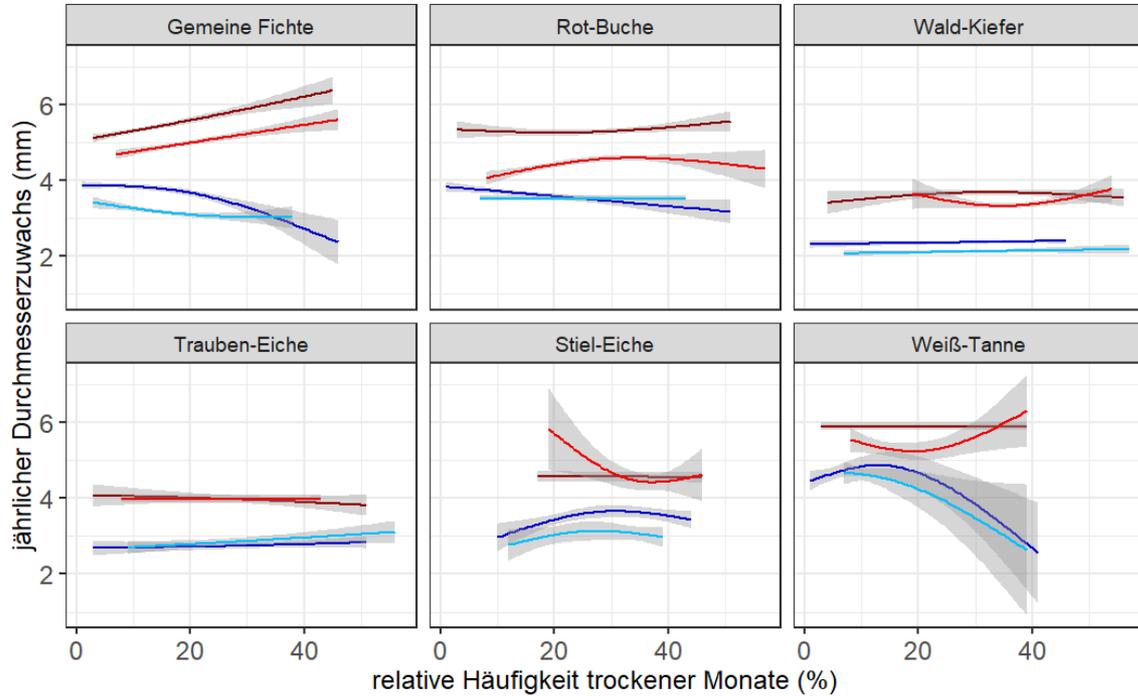


Abb. 26b: Klimaabhängigen Zuwachskurven der High- und LowCluster. Die Berechnungen erfolgten mit Generalisierten Additiven Modellen (gam)

3.3 Multifaktorielle Regressionsanalyse

Nachdem mit den HotSpot-Analysen die räumliche Lage von Cluster mit ähnlichen Zuwachsmustern identifiziert werden konnte, ermöglichten es die räumlichen Regressionsanalysen, Faktoren zu finden, die den Zuwachs maßgeblich beeinflussten. Die Übersichtstabelle (Tab. 14) zeigt für jede Baumart das Beste Model für die Periode und Cluster. Die Bestimmtheitsmaße lagen zwischen 0,17 (Abies alba, P1, LowCluster) und 0,07 (Quercus robur, P1, LowCluster). Nur drei der sechsundzwanzig Modelle (in Tabelle 14 grau hinterlegt) konnten als zuverlässig betrachtet werden. Zunächst fiel die hohe Bedeutung der Faktoren: BHD zu Beginn der Periode (BHD_{Start}), Alter, mittlere Grundflächenhaltung (mGFH) und Neigung auf, die bis auf wenige Ausnahmen für alle Gruppen einen hohen Einfluss hatten. Während der BHD positiv korreliert war, hatten die drei anderen Faktoren einen negativen Einfluss auf den Zuwachs. Von den Klimavariablen hat die Temperatur den größten Anteil als erklärende Variable. Sie war bei 14 Modellen (54%) von Relevanz. Allerdings ließ sich kein Trend ihrer Bedeutung erkennen, da sie je zur Hälfte positiv oder negativ wirkte (Abb. A7, detaillierte -Ergebnisse der Regressionsanalysen im Anhang). Auf Rang 2 der Klimafaktoren lag der Niederschlag, der in 10 Modellen (38%) als erklärende Variable vorkam, gefolgt von Niederschlagsänderung (9, 34%), Temperaturänderung (8, 31%) und relativer Häufigkeit trockener Monate, die in 6 (23%) Modellen vorkam. Wie bei der Temperatur waren auch hier keine klaren Trends erkennbar, da die Faktoren den Zuwachs sowohl positiv als auch negativ beeinflussten. Diese Heterogenität vollzog sich innerartlich, als auch innerhalb der Cluster und Perioden. Die nutzbare Feldkapazität hatte für die trockenheitssensitiveren Arten Gemeine Fichte, Rot-Buche und Weiß-Tanne einen eher positiven Effekt, das heißt, bei höherer nFKWe war das Wachstumspotential in der Regel größer. Bei den trockenheitstoleranteren Arten Waldkiefer, Trauben- und Stiel-Eiche war der Zusammenhang teilweise negativ. Diese Arten hatten auch bei geringer Feldkapazität gute Zuwachsleistungen.

Tab. 14: Übersicht der „Besten“ Modelle der Multifaktoriellen Regression. Die Asterics zeigen die Signifikanz der Koeffizienten: *: $p \leq 0,10$; **: $p \leq 0,05$; ***: $p \leq 0,01$. Grün= positiver Effekt, Rot=negativer Effekt, Grau= keine Richtung (kategoriale Variable). AdjR²=adjustiertes Bestimmtheitsmaß, AICc= Aikaike's Informationskriterium, JB=Jarque-Bera-Statistik für Normalverteilte Residuen ($p > 0,1$), K(BP)= Koenerks t-verteilte Breusch-Pagan-Statistik zum Test der Konsistenz der Beziehung zur abhängigen Variable im geographischem Raum und im Datenbereich ($p > 0,05$), VIF=Varianz Inflations Faktor ($< 7,5$), SA= räumliche Autokorrelation ($p > 0,1$). ΔN= Änderung des Niederschlags von einer Periode zur Folgenden. ΔT= Änderung der Temperatur von einer Periode zur Folgenden, rHTM= relative Häufigkeit trockener Monate.

Baumart	Periode	Cluster	AdjR ²	AICc	JB	K(BP)	VIF	SA	BHD Start	Alter	Niederschlag	ΔN	Temperatur	ΔT	rHTM	Grundfläche/ha	nFKwe	Boden NV	Breitengrad	Längengrad	Neigung	Exposition	
Gemeine Fichte	1	High	0,14	11901,81	0,00	0,01	2,76	0,00	***	***	***	***	***		***	***			***		***	**	
	1	Low	0,16	14987,72	0,00	0,00	1,86	0,00	***	***					***	***	**		***	***	***		
	2	High	0,13	11529,20	0,00	0,00	1,75	0,00	***	***		***			***	***			***	***	***		
	2	Low	0,15	14706,55	0,00	0,00	1,82	0,00	***	***		***	***	***	***	***	***	**		***	***	***	
Rot-Buche	1	High	0,08	7531,33	0,00	0,28	4,49	0,00	***	***	**				***	***		**	***	***	***	**	
	1	Low	0,16	8706,81	0,00	0,00	2,80	0,00	***	***	***		***	***	***	***			***	***	***	***	
	2	High	0,13	10812,91	0,00	0,17	1,92	0,00	***	***				***	***	***		**	***	***	***	***	
	2	Low	0,17	9370,37	0,00	0,00	2,17	0,00	***	***	***	***	***	***	***	***	***			***	***	***	***
Wald-Kiefer	1	High	0,14	4537,82	0,01	0,34	1,50	0,00	***	***	***	***				***					**		
	1	Low	0,15	6930,62	0,00	0,00	2,68	0,00	***	***	**		***			***					***		
	2	High	0,13	5771,55	0,00	0,00	1,54	0,00	***	***	***		***			***					***	**	
	2	Low	0,11	6528,83	0,00	0,00	1,98	0,00	***	***	***	***	***	**		***	*		***	***			
Trauben-Eiche	1	High	0,08	1723,38	0,12	0,07	3,64	0,41	***	***	*				**	***					***	***	
	1	Low	0,17	2134,01	0,00	0,00	1,94	0,01	***	***	***		***			***	***	*			***	***	
	2	High	0,13	1682,25	0,01	0,13	2,07	0,74	***	***	***		***			***	***				***	***	
	2	Low	0,22	1983,78	0,00	0,00	1,87	0,00	***	***	***	***				***	***		**	***	***	***	
Stiel-Eiche	1	High	0,11	1745,59	0,03	0,36	2,58	0,00	***	***	***		***	***		***				***	***	***	
	1	Low	0,07	1764,03	0,00	0,02	1,99	0,00	***	***			***				***					**	
	2	High	0,14	946,51	0,23	0,27	2,41	0,99	***	***	*	***	***	***	***	***	***	***		***	***	***	
	2	Low	0,16	906,76	0,00	0,49	1,25	0,52	***	***	***	*				***	***	***			***	***	
Weiß-Tanne	1	High	0,12	6464,01	0,01	0,00	1,80	0,00	***	***	***	***	***	***	***	***			***	***	***	***	
	1	Low	0,17	3735,79	0,00	0,00	1,46	0,00	***	***	***		***			***	***			***	***	***	
	2	High	0,13	2728,92	0,02	0,00	1,66	0,00	***	***	***		***			***	***			***	***	***	
	2	Low	0,16	3299,66	0,00	0,00	1,30	0,00	***	***	***	***	***	***	***	***	***			***	***	***	

4 DISKUSSION

Die Datengrundlage von Waldinventuren wird derzeit zur Analyse von Wachstumsuntersuchungen noch wenig genutzt (Benito-Garzón et al. 2013; Brandl et al. 2014; Märkel und Dolos 2017). Für die Hauptwirtschaftsbaumarten wurden auf Basis der drei Bundeswaldinventuren die Zuwachsreaktionen unter Berücksichtigung des Klimas und der Klimaänderung betrachtet. Im ersten Abschnitt dieses Kapitels werden zunächst die Ergebnisse diskutiert. Der zweite Teil der Diskussion setzt sich mit den verwendeten Daten und angewandten Methoden auseinander. Die erste Forschungsfrage lautete:

Sind Daten der Bundeswaldinventuren eine geeignete Grundlage zur Untersuchung von klimabedingten Zuwachsreaktionen. Welche Möglichkeiten bieten die Inventurdaten und wo sind die Grenzen der Aussagefähigkeit?

Sie wird allerdings erst am Ende der Diskussion behandelt, da die vorhergehenden Ergebnisse und Diskussionspunkte zur Beantwortung dieser Frage beitragen.

4.1 Deskriptive Analyse der Klima und Zuwachsdaten

4.1.1 Klima

4.1.1.1 Temperatur

Der kontinuierliche Temperaturanstieg von etwa 1,0 °C in der Vegetationszeit innerhalb des 30-jährigen Zeitraums für nahezu das gesamte Untersuchungsgebiet kann als deutlicher Hinweis auf die gegenwärtige Klimaerwärmung gedeutet werden. Ein Vergleich mit Literaturwerten ist aber nur bedingt möglich, da die Stärke des Trends durch den Startzeitpunkt der Berechnungen sowie der Länge des betrachteten Zeitraums beeinflusst werden (Brasseur et al. 2017).

Aber die Ergebnisse entsprechen den Trends einschlägiger Klimaanalysen (DWD 2017; Pachauri 2016; Brasseur et al. 2017). Nach aktuellem Stand der Klimaforschung ist in den vergangenen Jahren die Durchschnittstemperatur in Deutschland kontinuierlich gestiegen. Dieser Trend wird sich auch in den kommenden Jahren fortsetzen (DWD 2017). Schönwiese et al. (2004) fanden für den Zeitraum 1901 bis 2000 einen Anstieg von +1 °C. Einen Anstieg der Jahresdurchschnittstemperatur von +1,3 °C und der

Sommertemperatur von +1,2 °C beobachteten Kaspar et al. (2017) für den Zeitraum von 1881 bis 2014. Wobei die Temperatur im Westen Deutschlands etwas stärker zunahm als im Osten (Kaspar et al. 2017).

4.1.1.2 Niederschlagssumme

Die Niederschlagssituation fiel in den beiden Perioden hinsichtlich der Menge und der räumlichen Verteilung heterogener aus als der Temperaturtrend. Über den Gesamtzeitraum beider Inventuren (1986 bis 2012) betrachtet veränderte sich die Niederschlagsmenge auf dem größten Teil des Untersuchungsgebietes nur geringfügig um ± 25 mm in der Vegetationsperiode. Lediglich in Norddeutschland und im Südschwarzwald war ein großräumiger Anstieg der Niederschlagssumme zu beobachten (Abb. D1). Weitergehende Analysen (nicht gezeigt) ergaben, dass auf die Gesamtfläche betrachtet Sommer- und Winterniederschlagsmenge etwa die gleichen Anteile am Gesamtniederschlag ausmachten. Für den Zeitraum von 1986 bis 2011 nahm der Niederschlag in der Vegetationsperiode um 4,5 % zu im Vergleich zu P0 (1971 bis 1985). Kaspar et al. (2017) fanden eine Zunahme der jährlichen Niederschläge von 10 % im Vergleich zum langjährigen Mittel von 1961 bis 1990.

Allerdings fielen die Niederschläge jedoch nicht mehr annähernd gleichmäßig über die Vegetationsperiode verteilt, sondern es kam zu einem häufigeren Wechsel zwischen Starkregenereignissen und Trockenphasen (Pachauri 2008, 2016; Smith 2011). Die Intensität dieser Extreme fiel in den einzelnen Jahren aber sehr unterschiedlich aus.

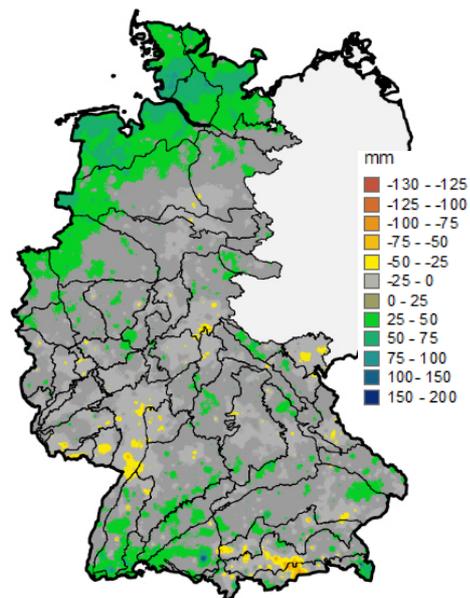


Abb. D1: Niederschlagsveränderung für den Gesamtzeitraum aller drei Inventuren (1986 -2011) im Vergleich zu P0 (1971-1985)

4.1.1.3 De Martonne Index

Der für trockenheitssensitive Arten kritische Wert von 25 kam in P0 in 4 Trakten, in P1 an 32 Trakten und in P2 an 16 Trakten vor. Das macht deutlich unter 0,5 % der Trakte aus.

Schwache Trockenstressbedingungen ($dMI < 35$) traten auf 32 %, 34 % und 32 % der Inventurtrakte in P0, P1 und P2 auf.

Schindler und Mayer (2007) fanden in der Vegetationsperiode 2003 an über 80% der untersuchten 18 Klimastationen in Südwestdeutschland zumindest schwache Trockenstressbedingungen für Wälder ($dMI_{veg} < 35$) und an 40 % der untersuchten Stationen herrschten deutliche Trockenstressbedingungen für Wälder ($dMI_{veg} < 25$). Die Trockenstressbedingungen waren an den tiefer gelegenen Klimastationen in den Wuchsgebieten Oberrheinisches Tiefland, Odenwald und Neckarland am ausgeprägtesten (Schindler und Mayer 2007). Damit liegen die Werte über denen, die in dieser Untersuchung gefunden wurden. Allerdings lassen sich die Werte nur bedingt miteinander vergleichen, da sich die Werte von Schindler und Meyer (2007) auf ein extremes Trockenjahr bezogen und die Trockenheit in der betrachteten Gegend weitestgehend höher war als im übrigen Gebiet.

4.1.2 Klimahüllen der Inventurtrakte

Die Klimahüllen der Inventurtrakte (Abb. 10) zeigten auf nahezu allen Inventurstandorten eine Veränderung des Klimas während des Untersuchungszeitraumes. Derartige Klimahüllen können einen raschen Überblick über die klimatischen Gegebenheiten von Standorten geben und eignen sich für eine erste Einschätzung klimatischer Veränderungen (Bolte et al. 2008). Bolte et al. (2008) weisen aber auch darauf hin, dass die Aussagekraft der Klimahüllen-Analysen begrenzt ist und stellen in Frage, ob die Verwendung von Durchschnittswerten oder Niederschlagssummen in Zusammenhang mit Baumartenverteilung zielführend sei, da oftmals eher Extreme wie Trockenheit oder Hitze bedeutender für die Verbreitung sind.

Da auch in dieser Untersuchung gezeigt wurde, dass eine lokale Veränderung der Niederschlagsverteilung in der Vegetationsperiode gegeben ist, die trotz höherer Niederschläge zu einer zunehmenden Häufigkeit von Trockenheit führen kann, kann es zur Einschätzung der standörtlichen Klimaveränderung hilfreich sein, neben Niederschlagssummen und Temperaturmittel weitere Faktoren zu betrachten wie Trockenheitsindices oder Bodeneigenschaften.

Die hier gezeigten Klimahüllen beziehen das gesamte Untersuchungsgebiet ein. Dabei bleiben lokale Dynamiken unberücksichtigt. Aus ihnen wird nicht ersichtlich, ob im Verlauf des Untersuchungszeitraumes in einem Gebiet die Veränderung kontinuierlich verläuft. Daher wird die Aussage von Bolte et al. (2008) geteilt, dass Klimahüllen durchaus ein geeignetes Mittel sein können, um eine Einschätzung der klimatischen Bedingungen eines Gebietes in einem bestimmten Zeitraum zu tätigen, solange man sich über die Einschränkungen dieser Methode gewiss ist.

4.1.3 Durchmesserzuwachs

Insgesamt war die Streuung der jährlichen Zuwächse sehr groß. Auch auf Traktebene konnten die Zuwachsspannen sehr hoch ausfallen. Solche individuellen Zuwächse auf lokaler Ebene erschweren es, Aussagen über den Zusammenhang zwischen Zuwachs und Umweltfaktoren zu treffen. Möglicherweise ist die Streuung zum Teil auf Messfehler oder der falschen Zuordnung von Bäumen während der Inventuren zurückzuführen. Dennoch kann der Zuwachs auf lokaler Ebene sehr unterschiedlich ausfallen. In einem 70 jährigen Fichtenbestand auf dem Lange Bramke Kamm in Niedersachsen wurden Zuwächse zwischen 3,5 – 8 mm gemessen, während im Solling (Niedersachsen) die Spanne zwischen 2 und 6 mm in einem 134 jährigen Bestand (NW-FVA, 2018) lag.

4.2 Klimaabhängige Zuwachsreaktion

Bei allen Baumarten war zu beobachten, dass der Zuwachs bei sehr hohen Niederschlägen bzw. bei sehr humidem Klima geringer wurde. Dieser Trend war in den meisten Fällen darauf zurückzuführen, dass die Niederschlagsmenge mit der Meereshöhe zunimmt. Dieser Effekt hat zum einen meteorologische Ursachen und hängt zum anderen mit der Interpolation der Niederschlagsdaten zusammen. Bei der Interpolation der Temperaturen und der Niederschläge in die Fläche wurde eine Höhenregression durchgeführt (Westermann, 1995), daher korrelieren die Temperatur- und Niederschlagswerte eng mit der Geländehöhe. In den höheren Lagen wird das Wachstum meist jedoch nicht durch den hohen Niederschlag limitiert, sondern es sind eher die geringeren Temperaturen und die geringere Strahlungsmenge, die auf solchen Standorten das Wachstum begrenzen

(Dittmar und Elling 1999; Ellenberg et al. 1986).

Die Güte aller Regressionsmodelle war sehr gering, sodass die Ergebnisse aus statistischer Sicht keine belastbare Aussagekraft ergeben. Die gefundenen Zuwachsmuster weisen aber baumartenspezifische Trends auf, aus den sich Tendenzen des Wuchsverhaltens ableiten lassen.

Die **Fichte** zeigte in den beiden Perioden unterschiedliche Zuwachsmuster. Auffällig ist, dass sonst nur die Weiß-Tanne, die ähnliche klimatische Ansprüche wie die Fichte hat, ein unterschiedliches Muster aufweist. Bei den übrigen Baumarten ist das Zuwachsmuster in den beiden Zuwachsperioden ähnlich. Inwieweit die unterschiedlichen Zuwachsmuster bei Fichte und Weiß-Tanne klimatische Ursache haben, lässt sich allerdings nicht nachvollziehen. Die höchste Zuwachsleistung zeigt die Fichte bei hohen Temperaturen und ausreichend Feuchtigkeit. Die Zuwachsdigramme zeigten erwartungsgemäß hohe Zuwächse im oberen Temperaturbereich. Auch steigende Temperaturen in P2 führten zu hohen Zuwächsen. Die Zuwachsdigramme ergaben auch, dass bei sehr hohen Temperaturen und sehr geringen Niederschlägen der Zuwachs unterhalb des maximalen Zuwachses ist.

In P1 entspricht das Zuwachsmuster mit den höchsten Zuwächsen bei *seltener* bis *mittlerer* Trockenheit (rHTM) und mittleren Niederschlägen (Abb. 21 a, A u. C) den für die Fichte günstigen Wuchsbedingungen. Brandl et al. (2014) fanden anhand ihres BWI-basierten Modells für den site index (Bonität) ebenfalls, dass die Fichte gutes Wachstum bei höheren Temperaturen und bei ausreichender Wasserversorgung hatte. Zu ähnlichen Ergebnissen kam auch Kohn (2013), die das erhöhte Triebängenwachstum bei der Fichte auf 142 Plots in Niedersachsen, Hessen und Sachsen-Anhalt zwischen 1980 bis 2010 bei warmen Temperaturen auf die ausreichende Niederschlagsmenge zurückführt. Die Verschiebung des Zuwachsoptimums in P2 hin zu *häufiger* Trockenheit und geringen Niederschlägen lässt sich gegenwärtig nicht erklären.

Dieses Ergebnis steht im Widerspruch zu Jahrringanalysen, die für Fichten im Hitzejahr 2003 vergleichsweise stärkere Zuwachsrückgänge als Buchen und Tannen zur Folge hatten (Dobbertin 2006). Auf den langfristigen Level II Flächen des Projektes ICP Forests in Zentraleuropa wiesen Fichten die höchsten Zuwachsrückgänge im Vergleich mit Eiche und Buche auf (Fischer et al. 2006). Fischer (2010) fand in Jahrringanalysen von

Dauerversuchsflächen, dass in warmen, trockenen Jahren selbst in den Hochlagen des Schwarzwalds der Zuwachs von Fichten reduziert war. Auch das Triebblängenwachstum der Fichte war im Hitzejahr 2003 reduziert (Kohn 2013). In Hessen, Niedersachsen und Thüringen reagierte die Fichte im Trockenjahr 2018 auf mehreren Standorten mit einem deutlich reduzierten Radialzuwachs im Vergleich zu vorausgegangenen Jahren. Außerdem stellte sie Dickenwachstum bereits Ende August ein, knapp zwei Monate früher als gewöhnlich (NW-FVA 2018).

Solche Stresssituationen beeinträchtigen die Vitalität der Fichten und können häufig zu Sekundärschäden (z.B. Insekten- oder Pilzbefall) führen (Bolte et al. 2009), die die Fichte langfristig belastet oder irreparabel schädigt.

Obwohl also die Fichte bei trocken, warmen Bedingungen und ausreichender Wasserversorgung die beste Wachstumsleistung zeigt, wird sie gemeinhin als Verliererin des Klimawandels betrachtet (Pretzsch und Ďurský 2002 ; Kölling et al. 2007; Profft et al. 2007; Kohnle et al. 2008; Ammer 2009). Dies wird darin begründet, dass die Fichte vor allem auf die zunehmende Häufigkeit von Trockenereignissen negativ reagiert. Dazu gehört auch eine Verminderung der Widerstandskraft gegenüber Borkenkäfern (Profft et al. 2008). Diese wiederum werden durch das milder werdende Klima in ihrer Populationsentwicklung begünstigt und führen somit zu einer Zunahme des Befallsdruckes auf die Fichte (Ammer 2009; Märkel & Dolos 2017).

Die **Rot-Buche** zeigte unter den klimatischen Gegebenheiten eine gute Wachstumsleistung bei 400 bis 600 mm Niederschlag. Ein Zusammenhang zwischen Zuwachsverhalten und Klima konnte aber nicht nachgewiesen werden. Zwar zeigen die Klimavariablen eine statistische Relevanz, sie lassen jedoch keinen Trend erkennen. Hohe Temperaturen hatten tendenziell eher positive Auswirkungen auf das Wachstum während Niederschlag und relative Häufigkeit von Trockenmonaten ein unspezifisches Ergebnis zeigen. Es ist bekannt, dass die Buche bei extremer Trockenheit mit verringertem Zuwachs reagieren kann (Geßler et al. 2001; Geßler et al. 2007; Walentowski et al. 2017). Allerdings zeigte sie auch ein recht gutes Regenerationsvermögen und konnte in den Jahren nach der Trockenheit das verringerte Wachstum kompensieren (Walentowski et al. 2017). Eine ähnliche Reaktion beschrieb Beck (2010) für das Trockenjahr 2003 für Buchen auf Level II-Flächen des ICP Forests Programms.

Dieses nachläufige Regenerationsvermögen kann dazu führen, dass klimabedingte Zuwachsreaktionen in Langzeitanalysen nicht erfasst werden können und hierfür kurze, jährliche Messintervalle oder Jahrringanalysen erforderlich sind. Untersuchungen der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt ergaben auf mehreren Probeflächen in Hessen, Niedersachsen und Thüringen höhere Radialzuwächse für 2018 im Vergleich zu den Vorjahren, obwohl in diesem Jahr eine extreme Dürre herrschte. Das Dickenwachstum begann jedoch früher als in vorangegangenen Jahren ICP Forests war bereits zu Beginn der Zuwachsperiode höher als zuvor. Allerdings stellte die Buche das Dickenwachstum 4 bis 6 Wochen eher ein als gewöhnlich (NW-FVA 2018).

Das Zuwachsmuster der **Wald-Kiefer** mit hohen Zuwächsen bei sehr warmen Temperaturen und geringen Niederschlägen sowie auch bei häufiger Trockenheit deutet auf ihre weite klimatische Amplitude hin. Obwohl sie eher als eine Baumart kalt-trockener Klimate gilt, kann sie aufgrund verschiedener Anpassungsstrategien auch bei Trockenheit hohe Zuwächse erzielen. Die Kiefer zeigte auf Level II Flächen deutlich geringere Zuwachsreduktion in 2003 als Buche und Fichte. Auch nach einer folgenden Trockenheit im Jahr 2007 erholte sie sich gut (Beck 2010). Auch auf Versuchsflächen in Nordostdeutschland wirkten sich Klimaänderungen nur geringfügig auf das Zuwachsverhalten aus (Bauwe et al. 2016). Daher wird das Reaktions- und damit auch Regenerationspotenzial der Kiefer als günstig eingeschätzt (Beck 2010; Bauwe et al. 2016).

Trauben- und Steileiche zeigten in beiden Perioden jeweils einen steigenden Zuwachstrend von kalt-feucht zu warm-trocken. Die Stiel-Eiche wuchs auf trockenen (<400 mm) und sehr warmen Standorten am besten zu. Die Trauben-Eiche erzielte ihre optimale Wuchsleistung bei 400 bis 600 mm Niederschlag. Die Zuwachstrends passen gut mit den jeweiligen Standortpräferenzen der beiden Arten zusammen. Die Trauben-Eiche kommt wie die Rot-Buche häufiger in den montanen Gebieten mit höheren Niederschlägen vor. Beide Arten haben ein ähnliches Verbreitungsgebiet und kommen gemeinsam in Mischbeständen vor (Dolos et al. 2016) . Dies spiegelt sich auch in den ähnlichen Zuwachsmustern von Trauben-Eiche und Rot-Buche wider.

Die Stiel-Eiche siedelt vorzugsweise in den trockeneren Tieflagen. Ihr Zuwachsmuster passt gut mit ihren bevorzugten klimatischen Standortbedingungen überein.

Die Zuwachshüllen zeigten bei der **Weiß-Tanne** eine Zuwachsreduktion bei Temperaturen oberhalb 15 °C. Auch bei *häufiger* Trockenheit (>40% rHTM) verringerte sich ihre Wuchsleistung. Die Ergebnisse deuten auf ihre Empfindlichkeit gegenüber Trockenheit hin. Zwar gilt die Weiß-Tanne als weniger anfällig gegenüber Trockenheit im Vergleich zur Fichte (Elling et al. 2009), aber verschiedene Studien fanden bei der Weiß-Tanne eine Verringerung des Dickenwachstums als Reaktion auf Sommertrockenheit (Rolland et al. 1999; Aussenac 2002; Lebourgeois et al. 2005; Macias et al. 2006; Fischer 2010).

4.3 Vergleich humider und arider Standorte

Die Ergebnisse der Mittelwertvergleiche bestätigen weitgehend die Resultate der Klima-Zuwachshüllen. Häufig werden die geringsten Zuwächse bei sehr seltener Trockenheit und die höchsten Zuwächse bei häufiger Trockenheit gefunden. In der Kategorie sehr häufige Anzahl von Trockenmonaten liegt der Zuwachs ebenfalls über dem mittleren Zuwachs. Der geringe Zuwachs aller Baumarten bei sehr seltener Trockenheit (<10%) hängt, wie im vorangegangenen Kapitel beschrieben, damit zusammen, dass diese meist in den hohen Gebirgslagen auftritt und dort ungünstigere klimatische Rahmenbedingungen herrschen. Oft ist auf diesen Standorten die Wuchsperiode verkürzt.

Die **Fichte** hatte ihre beste Wuchsleistung bei 30 bis 40 % Häufigkeit von Trockenmonaten. Bei zunehmender Trockenheit über 40 % verringerte sich die Zuwachsleistung. Dies kann ein Anzeichen dafür sein, dass zu häufige Trockenheit zur Verringerung der Wuchsleistung führt. Dafür sprechen auch die Resultate anderer Untersuchungen (Fischer et al. 2006; Dobbartin 2006; Kohn 2013; NW-FVA 2018), die Zuwachsreduktionen bei der Fichte aufgrund von zunehmender Trockenheit gefunden haben.

Buche und **Trauben-Eiche** zeigten ein ähnliches Zuwachsmuster wie die Fichte. Diese drei Arten haben etwa den gleichen Verbreitungsschwerpunkt, wobei Fichte und Buche in höheren Lagen häufiger vorkommen als die Trauben-Eiche. Gemeinhin gilt die Trauben-Eiche als die klimatoleranteste Art von den drei genannten. Allerdings stellen verschiedene europäische Studien fest, dass die Wasserverfügbarkeit in den frühen Sommermonaten eine wichtige Rolle für das Zuwachsverhalten spielt (Kelly et al. 2002; Drobyshev et al. 2008; Bauwe et al. 2016).

Auch bei der Buche wurde in mehreren Studien ein Zusammenhang zwischen der

Wasserverfügbarkeit und der Zuwachsreduktion bei Trockenheit gefunden (Dittmar und Elling 1999; Lebourgeois et al. 2005; Friedrichs et al. 2009b; Scharnweber et al. 2013).

Die **Wald-Kiefer** zeigte in beiden Zuwachsperioden (P1 u. P2) den höchsten Zuwachs bei *häufiger* und *sehr häufiger* Trockenheit. Obwohl die Wald-Kiefer ihren Verbreitungsschwerpunkt eher in den feucht kühleren Arealen hat, erzielte sie in warm-trockenen Klima optimale Zuwächse. Das Ergebnis steht im Widerspruch mit den Untersuchungen von Reich und Oleksyn (2008), die einen Rückgang der Zuwachsrate für Europa aufgrund der globalen Erwärmung erwarten. Andere Studien fanden hingegen Zuwachssteigerungen (Martínez-Vialta et al. 2008) oder geringe Zuwachsreaktionen auf Klimaerwärmung (Bauwe et al. 2016). Dies lässt auf eine hohe Toleranz gegenüber Witterungsextremen (Bauwe et al. 2016) und ihre gute Regenerationsfähigkeit (Beck 2010) schließen.

Tab. D1: Häufigkeiten der Einzelbäume nach Klassen für die relative Häufigkeit von Trockenmonaten.

Periode	Kategorie	% rHTM	Anzahl der Individuen					
			Fichte	Buche	Kiefer	T.-Eiche	S.-Eiche	Tanne
P1	sehr häufig	>40	164	607	1600	481	353	8
	häufig	>30-40	705	1670	2793	780	640	24
	mäßig	>20-30	3555	3522	3166	1133	878	215
	selten	10-20	4255	2593	938	345	199	624
	sehr selten	<10	8581	2381	784	138	92	2106
P2	sehr häufig	>40	177	604	1584	352	331	4
	häufig	>30-40	1089	2230	3122	1038	858	59
	mäßig	>20-30	4875	3758	3528	1159	757	731
	selten	10-20	5763	2695	833	288	189	1138
	sehr selten	<10	5356	1486	214	40	27	1045

Die gegensätzlichen Ergebnisse in der Kategorie *sehr häufige* Trockenheit während der beiden Wuchsperioden P1 und P2 bei der **Weiß-Tanne** sind wahrscheinlich auf die geringe Anzahl von Individuen in dieser Klasse zurückzuführen (Tab. D1). Auffällig war die Verschiebung der Anteile in der Kategorie sehr seltene Trockenheit, hier verringerte sich die Anzahl der Einzelbäume in P2 um bis zu 70 % gegenüber P1. Aber auch in den übrigen Trockenheitskategorien kam es häufig zu einer Verschiebung in Richtung zunehmender Trockenheit (Tab. D1). Am deutlichsten davon war die Fichte betroffen.

4.3.1 Zuwachsreaktionen unter Berücksichtigung des Klimas und der Feldkapazität

Die Ergebnisse zeigten erwartungsgemäß, dass neben dem Klima auch das Wasserspeichervermögen der Böden eine wichtige Rolle für den geeigneten Standort der Baumarten spielt. Besonders die trockenheitsempfindlichen Arten **Gemeine Fichte** und **Weiß-Tanne** reagierten auf Böden mit *sehr geringer* und *geringer* nFKWe bei *häufigen* Trockenmonaten während der Vegetationsperiode mit geringerem Durchmesserzuwachs. Auch die **Rot-Buche** zeigte bei diesen Bedingungen geringeren Zuwachs als auf feuchteren Standorten. Ähnliche Ergebnisse wurden in zahlreichen anderen Studien gefunden (z.B. bei Ammer et al. 2005; Kölling et al. 2005; Geßler et al. 2007; Ge et al. 2013). Etwas über 50 % der Buchen standen auf Standorten mit *sehr geringer* oder *geringer* nFKWe (vgl. Anhang: Abb. A5). Eine Zunahme von Sommertrockenheiten kann dazu führen, dass die Rot-Buche stärker durch den Klimawandel getroffen wird, als bislang vielfach angenommen. Die Buche galt bislang als wenig durch den Klimawandel gefährdet, da sie eine hohe Regenerationsfähigkeit nach Trockenperioden zeigte (Bolte 2005; Walentowski et al. 2017). Allerdings hat Beck (2010) festgestellt, dass die Anzahl der negativen Weiserjahren zugenommen hat. Daraus leitete er die Frage ab, ob sich die Witterungsverhältnisse gegenwärtig ungünstiger für die Buche entwickelt haben oder die Buche empfindlicher gegenüber Klimaänderungen geworden sei. Zumindest die erste Vermutung lässt sich bestätigen, da im Zeitraum von 2011 bis 2019 die Häufigkeit von Trockenmonaten auf Standorten mit geringer und sehr geringer nFKWe um den Faktor fünf im Vergleich zu den Inventurperioden zugenommen hat (Abb. D2). Die jüngsten Entwicklungen, insbesondere die extreme Dürre in 2018, scheinen die These zu bestätigen, dass aufgrund der hohen Frequenz und hohen Intensität der Trockenperioden der Buche nicht mehr genug Zeit bleibt, um sich zu erholen.

Die geringeren Zuwächse bei der **Traubeneiche** bei *sehr geringer* nFKWe fallen überraschend aus, da die beiden Eichenarten als recht klimastabil betrachtet werden (Ammer 2009; Beck 2010; Mette et al. 2013; Walentowski et al. 2017) und bei Trockenperioden in der Regel keine oder nur eine geringe Zuwachsreduktion zeigten (Beck 2010; Walentowski et al. 2017). Generell wird angenommen, dass die Trauben-Eiche einen geringeren Wasserbedarf hat (Lévy et al. 1992) und weniger anfällig für Trockenstress ist (Cochard et al. 1992) als die Stieleiche. Die Ergebnisse dieser Studie widersprechen dieser Annahme. Die **Stieleiche** zeigte in der vorliegenden Studie bei *häufiger* Trockenheit und *sehr geringer* nFKWe tendenziell überdurchschnittliche Zuwächse, während die Trauben-Eiche geringer zuwuchs. Allerdings war die Anzahl der Einzelbäume in dieser Kategorie bei beiden Eichenarten sehr gering. Zumal auch die Trauben-Eiche deutlich häufiger auf Böden mit *geringer* Wasserspeicherefähigkeit vorkam als die Stiel-Eiche (vgl. Anhang: Abb. A5).

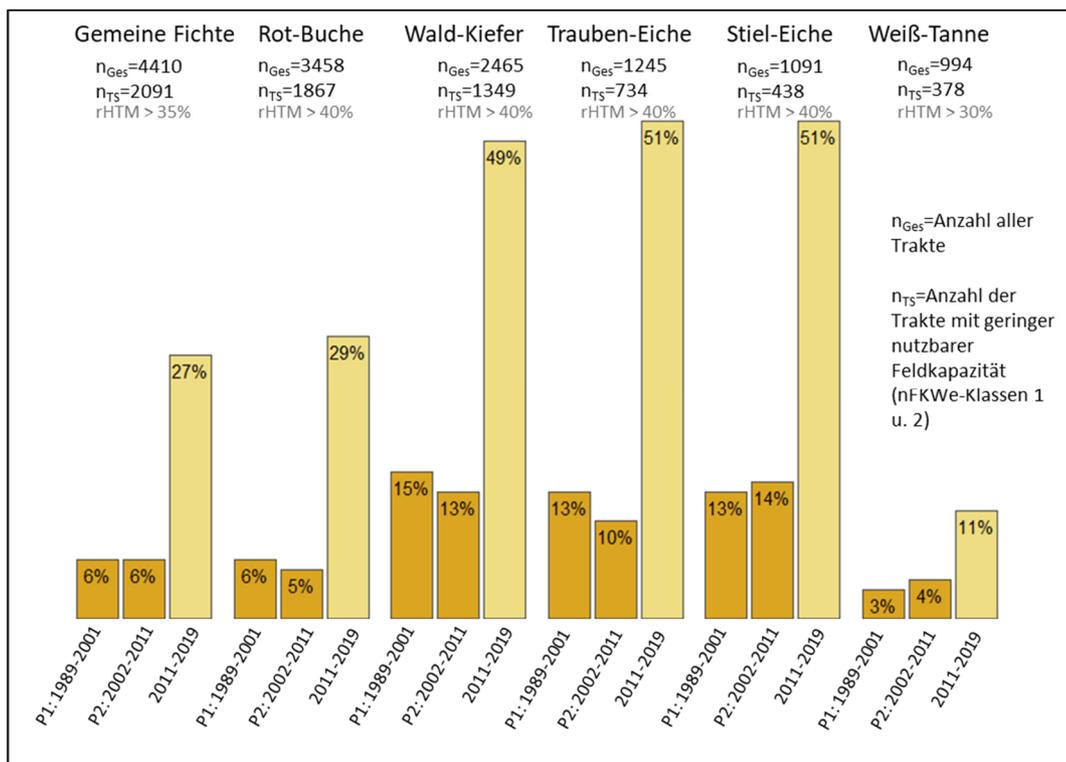


Abb. D2: Relative Häufigkeit der Trakte mit *sehr geringer* (nFKWe-Klasse =1) und *geringer* (nFKWe-Klasse 2) nutzbarer Feldkapazität des effektiven Wurzelraumes und mit hoher Häufigkeit von Trockenmonaten (rHTM). Die Definition für hohe rHTM ist baumartenspezifisch. Die Schwellenwerte stehen oberhalb der Barplots. n_{Ges}=Anzahl aller Trakte auf denen die jeweilige Baumart vorkommt. n_{TS}=Anzahl der Trakte mit geringer nutzbarer Feldkapazität (nFKWe-Klassen 1 u. 2). Die Prozentangaben beziehen sich auf n_{Ges}.

Die **Wald-Kiefer** zeigte durch ihr gutes Zuwachsvermögen auch bei *häufiger* Trockenheit und auf schlecht wasserversorgten Böden ihr gutes Anpassungsvermögen an extreme Bedingungen. Sie kommt gemeinsam mit der Trauben-Eiche am häufigsten auf Standorten mit *sehr geringer* und *geringer* nFKWe vor (vgl. Anhang: Abb. A5). Ihr gutes Zuwachsvermögen hängt vermutlich auch damit zusammen, dass sie auf den extremen Standorten weniger durch konkurrenzstarke Baumarten dominiert wird. Für den Zeitraum 2011 bis 2019 zeigt sich für alle Baumarten eine deutliche Zunahme von Trockenheit auf Böden mit *geringer* Wasserkapazität (nFKWe <3) um den Faktor 3 (Weißtanne) bis 5 (Rot-Buche) (Abb. D2). Diese Entwicklung ist insofern besorgniserregend, da 38 % (Weißtanne) bis 59% (Trauben-Eiche) der Trakte eine *geringe* nFKWe aufweisen (vgl. Anhang: Abb. A5). Für diesen Zeitraum liegen zwar noch keine Inventurdaten vor, aber die jüngsten Waldzustandsberichte zeichnen ein alarmierendes Bild.

4.4 Hotspotanalyse

Die hohe Varianz der individuellen Zuwächse auf Traktebene erschwert es, Rückschlüsse auf das Zuwachsverhalten zu quantifizieren. Die Hotspotanalyse identifizierte auf räumlicher Ebene Cluster mit hohen und geringen Zuwächsen. Hier konnte für einen Anteil von 50 bis 60% der Stichproben kein signifikantes Cluster für die Zuwachsreaktion gefunden werden. Die Cluster verteilten sich je etwa zur Hälfte auf die High- und LowCluster, mit Ausnahme der Weiß-Tanne. Sie hat nur 4 % und 8 % HighCluster sowie 40 % und 80 % LowCluster in P1 und P2. Dies bedeutet, dass die Zuwächse für etwa die Hälfte der untersuchten Bäume im nachbarschaftlichen Bezug sehr variabel waren, wodurch faktorabhängige Zuwachsprognosen mit hoher Unsicherheit behaftet waren, da der Stichprobenfehler mit der Variabilität des Merkmals zunimmt (Klemmt und Neubert 2011). Anhand der High- und LowCluster-Analyse konnten Regionen gefunden werden, in denen die Zuwachsreaktionen Ähnlichkeiten aufwiesen.

Gemeine Fichte, Weiß-Tanne und Rot-Buche haben im Nord- und Mittelschwarzwald einen hohen Zuwachs. Im Südschwarzwald waren die Zuwächse vergleichsweise geringer (Abb. 15a und 15b, J bis L). Diese Unterschiede können mit der Höhenstufung zusammenhängen, da der Südschwarzwald etwas höher liegt und dadurch die klimatischen Bedingungen ungünstiger für das Wachstum sind. Ein Vergleich beider

Zuwachsperioden ergab eine Verringerung der Zuwachsleistung von Gemeiner Fichte, Weiß-Tanne und Rot-Buche von P1 zu P2 im mittleren und teilweise im nördlichen Schwarzwald. Im südlichen Schwarzwald hatten alle drei Arten höhere Zuwächse. Im gleichen Zeitraum wurde es auf dem Gebiet insgesamt trockener. Die Niederschläge nahmen ab und die Anzahl der Trockenmonate erhöhte sich um 10- 20 %, sodass der Zuwachsrückgang mit der Veränderung des Klimas einhergehen könnte. Fischer (2010) fand in Jahrringanalysen von langfristigen Versuchsflächen, dass in warmen trockenen Jahren, selbst in den Hochlagen des Schwarzwaldes, der Zuwachs von Fichten und Tannen reduziert war. Die Zuwachszunahme im Hochschwarzwald kann eine Reaktion auf die Klimaveränderung sein, durch den sich die Wuchsbedingungen in Höhenlagen verbessert haben. Eine solche Verschiebung der Arealgrenzen in andere Höhenzonen durch den Klimawandel wird durch mehrere Studien gut dokumentiert (Leuschner und Schipka 2004; Sykes 2005; Thuiller et al. 2008; Metzger 2016).

Eine ähnliche Zuwachsreaktion war für Fichte und Buche auf der Schwäbischen Alb und im Harz zu beobachten, wo ähnliche klimatische Veränderungen auftraten wie im Schwarzwald.

Allerdings ist davon auszugehen, dass auch andere Faktoren, wie geringere Bestandesdichte oder Altersstruktur, die Zuwachsänderungen beeinflusst haben. Dies ist auf der Schwäbischen Alb sehr wahrscheinlich, da hier die Klimaveränderungen ähnlich wie im Schwarzwald und Harz sind, aber die nutzbare Feldkapazität des effektiven Wurzelraumes und die Bodennährstoffversorgung deutlich ungünstiger (vgl. Anhang: Abb. A3).

Bei der **Rot-Buche** waren Areale von HighClustern in den Wuchsgebieten Neckarland (75), Norden des Mitteldeutschen Trias Berg und Hügelland (37) sowie der Jungmoränenlandschaft Schleswig-Holstein/Nordwest Mecklenburg (2) nicht eindeutig zu begründen. Gleiches gilt für die LowCluster Frankenald (60), Bayrischer Wald (79), Röhn (51) und Westfälischer Bucht (16). Die Cluster Areale stimmen nur teilweise mit den modellierten relativen Grundflächenzuwächsen für Deutschland von Dolos und Märkel (2016) überein. Die HighCluster in den Wuchsgebieten Südwestdeutsches Alpenvorland (77), dem angrenzenden Tertiären Hügelland (78), Odenwald (64) sowie der Jungmoränenlandschaft Schleswig-Holstein/Nordwest Mecklenburg (2) zeigen in beiden

Untersuchungen hohe Zuwächse. Ebenso gibt es Übereinstimmungen von LowClustern und geringen relativen Grundflächenzuwächsen im Südlichen Schwarzwald (73), den Bayrischen Alpen (82), Bayrischer Wald (79) und Rhön (51). Dolos und Märkel (2016) fanden hohe Zuwächse im gesamten Norddeutschen Küstengebiet, Sauerland (40), mittleren Schwarzwald (73) und Frankenalb/Oberpfälzer Jura. Hier ergab die Hotspotanalyse LowCluster oder keine Clusterung. Im Wuchsbezirk Neckarland (75) deutete die Clusteranalyse auf hohe Zuwächse hin, während die Modellierung der Grundflächen hier geringe oder mäßige Zuwächse prognostizieren. Dolos und Märkel (2016) verwendeten für ihr Prognosemodell eine Kombination aus Artverbreitungsmodell (SDM) und Produktivität (relativer Grundflächenzuwachs). Dabei stellten sie fest, dass das Modell häufig hohe Zuwächse in Arealen mit hoher Vorkommenswahrscheinlichkeit prognostizierte. Die Prognosegüte des Modells verringerte sich mit abnehmender Datenverfügbarkeit, sowohl absolut als auch räumlich (Dolos und Märkel 2016). Auch in dieser Studie konnte ein Zusammenhang zwischen Datenverfügbarkeit und Prognosewahrscheinlichkeit beobachtet werden.

Die **Wald-Kiefer** wuchs im norddeutschen Tiefland besser zu als in Mittel- und Süddeutschland. Dieser Trend stimmt mit Untersuchungen von Reich und Oleksyn (2008) überein. Sie fanden in ihrer europaweiten Studie abnehmende Wachstumstrends in Süd- und Zentraleuropa und steigendes Wachstum in Nordeuropa. Bauwe et al. (2016) vermuten anhand ihrer Untersuchungen, dass sich die Kiefernwälder in Nordostdeutschland in der Übergangszone zwischen steigendem Wuchstrend nach Norden und fallendem Zuwachs in Richtung Süden befinden. Dies liegt wahrscheinlich daran, dass sie im Norden überwiegend in Reinbeständen vorkommen und dadurch in geringerem Maße in Konkurrenz zu anderen Baumarten stehen.

Auf räumlicher Ebene konnten jedoch für die Beziehung zwischen Zuwachsänderung und Klima keine eindeutigen Aussagen getroffen werden. Die Zunahme des Zuwachses im Fränkischen Keuper und Alpvorland (61) ließe sich zwar dadurch begründen, dass von P1 zu P2 insgesamt feuchter wurde und es seltener zur Trockenereignissen kam, aber in anderen Regionen zeigte die Kiefer bei ähnlicher Klimaänderung einen Zuwachsrückgang zur Vorperiode.

Die gefundenen High- und LowCluster der beiden **Eichenarten** entsprachen den jeweiligen Standortpräferenzen. Die **Stiel-Eiche** wuchs im trockeneren Norddeutschen Tiefland (2, 3, 15) besser als in Mittel- und Süddeutschland. Sie ist eine Art der planaren Zonen und bevorzugt ozeanisches Klima. Die geringe Anzahl räumlicher Cluster für die Zuwachsveränderung hing in erster Linie mit der im Verhältnis geringen Anzahl der Stiel-Eichen und ihrer großen räumlichen Verbreitung über nahezu das gesamte Gebiet Westdeutschlands zusammen. Es kann daraus nicht geschlossen werden, dass die Stiel-Eiche als potentiell klimastabile Art eine geringe Reaktion auf Klimawandel zeigte.

Wie die Fichte, hat auch die **Weiß-Tanne** hohes Wuchspotential im mittleren und nördlichen Schwarzwald. Im Hochschwarzwald und den Alpen fällt der Zuwachs geringer aus, dies fanden auch Dolos und Märkel (2016). Allerdings modellierten sie für den Odenwald ebenfalls geringe Zuwächse, während die Hotspotanalyse hier gute Zuwächse zeigt. Die Tanne ist in diesen Gebieten nur wenig verbreitet. Aufgrund der geringen Datengrundlage ist die Prognoseunsicherheit als recht hoch einzuschätzen.

Für den Zuwachsrückgang von P1 zu P2 im Nord- und Mittelschwarzwald einhergehend mit der Zunahme im Südschwarzwald kann ein Zusammenhang mit der Klimaveränderung angenommen werden. Auch wenn diese Ergebnisse nicht statistisch gesichert sind, kann die Entwicklung darauf hindeuten, dass sich aufgrund zunehmender Hitze und Sommertrockenheit das Wuchsoptimum in höhere Lagen verschiebt. Damit würde der voranschreitende Klimawandel zu einer Verkleinerung ihres Verbreitungsareales führen, da der Ausweichraum in höhere Höhenlagen räumlich begrenzt ist. Andererseits ist die Weiß-Tanne eine durch den Menschen intensiv beeinflusste Baumart, die gegenwärtig auf nur etwa 14% der BWI Trakte Bayerns vorkommt. Dabei wären für sie etwa 80% der Trakte als potentieller Standort geeignet (Falk und Mellert 2011), sodass eine Ausweitung ihres Verbreitungsgebietes möglich ist, auch wenn es möglicherweise außerhalb ihres optimalen Wuchspotentials liegt.

4.5 Multifaktorielle Regressionsanalyse

Den Einfluss der beobachteten Erwärmung auf das Wachstum von Wäldern zu quantifizieren, war für den Stammzuwachs recht schwierig, da mehrere Faktoren das Wachstum ebenfalls beeinflussen, wie die Dimension, die Bestandesdichte, das

Baumalter, die Nährstoffversorgung, die Stickstoffeinträge oder die ansteigenden CO₂-Gehalte, welche sich zum Teil parallel zu den Temperaturen verändert haben (Dobbertin 2006). Die multifaktoriellen Untersuchungen ergeben, dass besonders die vier Faktoren BHD_{Start} , $Alter_{Start}$, Bestandesgrundflächenhaltung und Hangneigung durchweg einen großen Einfluss auf den Zuwachs ausüben. Während der Faktor BHD_{Start} stets positive Zusammenhänge zeigt, wirken sich $Alter_{Start}$, Bestandesgrundflächenhaltung und Hangneigung überwiegend negativ auf den Zuwachs aus. Da diese Faktoren bei allen Baumarten und fast allen Cluster-Kombinationen von hoher Bedeutung sind, können sie als räumlich unabhängige Faktoren gelten. Das bedeutet, dass ihr Einfluss nicht von regionalen Eigenheiten geprägt ist. Bei den übrigen Faktoren spielt die räumliche Komponente eine größere Rolle, da hier die Modelle jeweils individuelle Ergebnisse hervor gebracht haben. Aufgrund der hohen Bedeutung des Faktors $Alter_{Start}$, ist zu vermuten, dass dieser einen gewissen Einfluss der Zuwächse in P2 bedingt. Dies bestätigen auch die Vorabuntersuchungen der Alters-Zuwachsbeziehungen (Kap.2.3.3). Die Klimavariablen sind ebenfalls von signifikante Bedeutung. Am häufigsten kommt die Temperatur (54%) als erklärende Variable in den *Besten Modellen* vor, gefolgt von Niederschlag (42%), wobei die Signifikanz letztgenannter geringer ist. Aber auch für alle anderen im Modell verwendeten Variablen zeigt der Varianzinflationsfaktor ($<7,5$), dass sie von Bedeutung für den Zuwachs sind. Allerdings wirken diese Variablen sehr unterschiedlich auf die abhängige Variable ein. Eastaugh et al. (2011) fanden, dass nicht das Klima als Hauptfaktor für den Zuwachs bei Fichten angesehen werden kann, sondern andere Faktoren, wie zum Beispiel Stickstoff eine bedeutendere Rolle spielen. Es sei aber, auf Grund von Messfehlern, sehr schwierig anhand von Inventurdaten den Einfluss des Klimas auf die Produktivität zu quantifizieren (Eastaugh et al. 2011, Dobbertin 2006).

4.6 Eignung und Grenzen der Datenbasis und der Methoden

4.6.1 Klimadaten

Die Klimadaten des Deutschen Wetterdienstes liegen in einer hohen räumlichen und zeitlichen Auflösung vor und gelten als die gegenwärtig am besten verfügbaren flächenhaften Klimadaten für Deutschland. Die ursprünglichen Messdaten stammen von

über 500 Messstationen, die räumlich interpoliert werden, wobei witterungsbedingte Prozesse dabei unberücksichtigt bleiben. Die Klimastationen befinden sich überwiegend im besiedelten Gebieten oder der freien Landschaft (Schindler und Mayer 2007). Das Klima dieser Landschaften unterscheidet sich oft deutlich vom Waldklima. Vor allem große geschlossene Wälder haben ein eigenes Klimaregime in dem extreme Wetterbedingungen besser gepuffert werden können (Ellenberg et al. 1986). Daher geben die interpolierten Klimawerte und die daraus abgeleiteten Indices allenfalls Näherungswerte wieder, die mit dem realen Waldklima nur bedingt übereinstimmen.

4.6.1.1 Verwendete Klimaindices

4.6.1.1.1 De Martonne Index

Der Ariditätsindex nach de Martonne erweist sich als ein einfacher und praktikabler Ansatz, um die Wechselwirkung zwischen Niederschlag und Temperatur in Zusammenhang zu bringen. Der Index wurde bereits in verschiedenen Untersuchungen verwendet (Klap 2000; Schindler und Mayer 2007; Kohn 2013), sodass Informationen zu Schwellenwerten für Trockenstress von unterschiedlichen Baumarten vorlagen (Klap 2000). Allerdings haben Berechnungen ergeben (nicht gezeigt), dass mit zunehmender Niederschlagshöhe der Niederschlag gegenüber der Temperatur einen größeren Einfluss auf den Index hat. Dieser Effekt tritt jedoch erst bei sehr humiden Bedingungen ($dMI > 100$) auf. Da der Index vor allem zur Beurteilung der Trockenheit angewendet wird, konnte dieser Einfluss vernachlässigt werden.

Neben dem de Martonne Index gibt es zahlreiche weitere Klimaindices mit unterschiedlichen Eingangsvariablen. In jüngster Zeit findet vor allem der Standardisierte Niederschlagsindex (SPI) Verwendung in der Ökologie (Mette et al. 2011), bei dem die Abweichung der Niederschlagssumme vom Mittelwert eines bestimmten Ortes in einem bestimmten Zeitraum betrachtet wird. Allerdings geht als Eingangsgröße nur die Niederschlagssumme ein, während die Temperatur unberücksichtigt bleibt. Eine vergleichende Untersuchung verschiedener Ariditätsindices für die Eignung zur Interpretation der Waldinventurdaten kann für zukünftige Untersuchungen vorteilhaft sein.

4.6.1.1.2 Relative Häufigkeit Trockener Monate

In den vergangenen Jahren hat sich in Mitteleuropa gezeigt, dass Zuwachs und Vitalität der Hauptbaumarten eher durch Klimaextreme beeinflusst wurden, als durch stetigen Wandel.

Bei der Berechnung von Mittelwerten für die Vegetationsperiode oder Jahreswerte werden Klimaextreme durch Mittelwertbildung relativiert. Daher ist die Verwendung von Klimaindices, die saisonale Witterungsextreme berücksichtigen, eine sinnvolle Ergänzung gegenüber der Nutzung von Durchschnittswerten.

Der Vorteil dieser Indices gegenüber der Verwendung von Mitteltemperaturen oder Niederschlagssummen der Vegetationsperioden zeigt sich zum Beispiel in Norddeutschland (Abb. D3). Niederschlag und dMI deuten hier auf eine Änderung zu feuchteren Bedingungen von P1 zu P2 hin. Die relative Häufigkeit von Trockenmonaten hingegen zeigt, dass es trotz Niederschlagszunahme lokal häufiger zu Trockenereignissen kommt, wie zum Beispiel im Wuchsgebiet Schleswig-Holstein Südwest. Dies deutet darauf

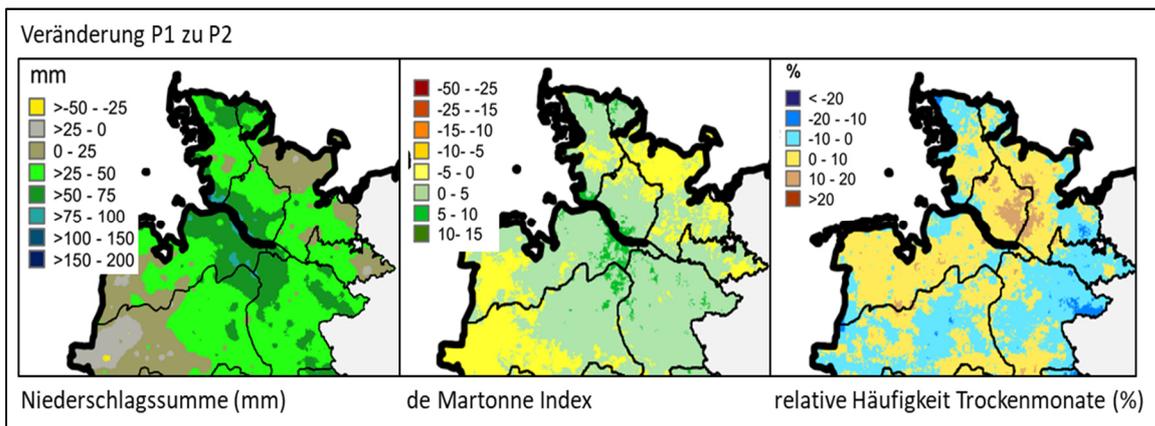


Abb. D3: Veränderung von Niederschlagssumme, dMI und relativer Häufigkeit von Trockenmonaten von P1 zu P2 in Norddeutschland. Die Abbildung verdeutlicht die Bedeutung saisonaler Effekte im Untersuchungszeitraum. Während Niederschlag und de Martonne Index feuchtere Bedingungen für das gesamte Gebiet anzeigen, zeigt die relative Häufigkeit von Trockenmonaten deutlich heterogene Entwicklung an. In einzelnen Regionen wurde es humider und in anderen arider.

hin, dass in diesem Gebiet die Niederschlagsereignisse seltener werden, aber dafür intensiver ausfallen. Auch in anderen Gebieten zeigte der Index solche saisonalen Muster. Diese Verteilungsmuster entsprechen den klimatischen Entwicklungen, die in anderen Studien beschrieben wurden (Bolte und Ibisch 2007; Trömel und Schönwiese 2007, Pachauri 2016).

Die Relative Häufigkeit von Trockenmonaten wurde in dieser Studie jeweils für eine

gesamte Inventurperiode gerechnet. Es scheint jedoch vorteilhafter, diesen Index zunächst für die Anzahl trockener Monate pro Jahr, beziehungsweise der Vegetationsperiode, zu ermitteln und auf dessen Grundlage erst im folgenden Schritt für den Untersuchungszeitraum zu bestimmen. Der Vorteil bestünde darin, dass die Anzahl trockener Monate für einen gleichlangen Zeitraum betrachtet würden. Dadurch wäre der Index flexibler, da sich die Zeitfenster verschieben ließen und weitere Betrachtungsebenen möglich wären. Zum Beispiel könnte man so neben der Anzahl der trockenen Monate auch die Anzahl der trockenen Jahre oder Vegetationsperioden eines definierten Zeitraumes betrachten.

Der Index in seiner verwendeten Form lässt keine Rückschlüsse über die Dauer und den Zeitraum einer Trockenheit zu. Es macht aus ökologischer Sicht jedoch einen Unterschied, ob die Trockenperiode über mehrere aufeinanderfolgende Monate andauert oder die einzelnen Trockenmonate über das Jahr/die Vegetationsperiode disjunkt verteilt liegen. Genauso kann es relevant sein, in welchen Jahreszeiten die Trockenperiode auftritt, da sich eine frühe Trockenheit anders auf das Wuchsverhalten auswirken kann als eine späte. Daher erscheint es sinnvoll, den Index entsprechend anzupassen, um solche saisonalen Phänomene besser berücksichtigen zu können. Für zukünftige Analysen sollten daher zunächst die trockenen Monate eines Jahres berechnet werden, um daraus den Index einer Periode abzuleiten. Dadurch würde der Klimaindex zusätzlich flexibler in seiner Anwendbarkeit, da kurzfristigere Zeiträume betrachtet werden können.

4.6.2 Zielvariablen und BWI-Daten

In dieser Untersuchung wurde als abhängige Variable der Durchmesserzuwachs gewählt, da er als sensitiver Indikator für das Zuwachsverhalten von Klimaänderungen betrachtet werden kann (Dobbertin 2005; Hoffmann et al. 2015).

Allerdings können die Ressourcen zur Aufrechterhaltung lebensnotwendiger Funktionen bei Stressereignissen statt für den Radialzuwachs auch Aufgaben wie dem Höhen- und Wurzelwachstum, der Fruchtbildung sowie der Speicherung von Reservestoffen zugeteilt werden (Scharnweber 2014).

Zahlreiche Untersuchungen verwenden für klimabedingte Zuwachsreaktionen das

Höhenwachstum als Weiser, da es im Gegensatz zum Durchmesserzuwachs nicht oder nur in geringerem Maße durch die Bestandesdichte beeinflusst wird (Dobbertin 2006). Allerdings wird derzeit noch darüber diskutiert, ob der Höhenzuwachs gegenüber dem Radialwachstum besser als Weiser für Klimasensitivität geeignet ist (Mäkinen 1998; Mäkinen et al. 2002; Rais et al. 2014). Bei der Baumhöhe im Bestand wird meist ein Schätzwert oder die mittlere Bestandshöhe angenommen, während sich der Durchmesserzuwachs als verhältnismäßig einfach zu erfassender und präziser Faktor bewährt hat (Scharnweber 2014).

Die Berechnungen der abhängigen Variablen „jährlicher Durchmesserzuwachs auf Brusthöhe“ aus den gemessenen BHD_{1,3}-Werten der Bundeswaldinventuren ergaben bei der Plausibilitätsprüfung negative Zuwächse sowie Werte, die deutlich über dem physiologischen Wuchsvermögen der untersuchten Baumarten lagen. Dies ist recht wahrscheinlich dadurch begründet, dass die Probestellen der Bundeswaldinventur nicht sichtbar markiert sind, sondern durch einen vergrabenen Marker verortet wurden, da sie aus methodischen Gründen unerkant bleiben sollen. Hierdurch kann der Verlust des Markers zu einer falschen Verortung führen, sodass in Folgeinventuren nicht immer die identischen Bäume gemessen wurden.

Durch die Betrachtung der Einzelbäume konnten die Zuwächse in plausiblen Dimensionen selektiert werden. Allerdings wurden durch die Selektion über 50% der Inventurdaten verworfen. Außerdem wirkte sich die Selektion auf die Altersstruktur der Datenkollektive in den beiden Zuwachsperioden aus. Die Bäume in P2 waren dadurch insgesamt älter, was Auswirkungen auf das Zuwachspotential nach sich zog. Das Alter der Bäume wurde in den Inventuren auf unterschiedliche Weise bestimmt (Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMELV) 2011), wodurch bei der Betrachtung der Altersklassen und der Selektion nach Baumalter (vgl. 4.4.3 Minderung des Effekts von Co-Variablen) fehlerhafte Klassenzuordnungen nicht ausgeschlossen werden können. Das Ausmaß der Fehlzuordnungen lässt sich allerdings kaum nachvollziehen.

Auch wenn die Betrachtung auf Einzelbaumebene Vorteile bietet, wird es als sinnvoll erachtet, die Zuwachsreaktionen auf großskaliger Ebene zu untersuchen. Geeignete räumliche Einheiten können zum Beispiel die forstlichen Wuchsbezirke oder Wuchsgebiete sein. Dieser Ansatz würde ebenfalls dazu führen, dass deutlich mehr Bäume in die Studie einbezogen werden können, da nicht mehr auf Einzelbaumbasis

selektiert wird. Außerdem lassen sich mit diesem erweiterten Datensatz auch abgegangene Bäume berücksichtigen, was zum Beispiel durch Presence-Absence-Analysen eine Untersuchung der Veränderung der Baumartenverteilung eines Standortes ermöglicht.

4.6.3 Hotspotanalyse

Für die Clusterbildung und -größe war die gewählte Nachbarschaftsdistanz in den Voreinstellungen der Modellberechnungen von hoher Bedeutung. Je größer die Distanz umso mehr Nachbarn wurden in die Analyse einbezogen. Dadurch stieg die Clustergröße an. Eine zu große Distanz hat sehr große Cluster zur Folge, wodurch Überschätzung der Clusterung erfolgt (Abb. D4).

Ist die Distanz zu gering, sind die Cluster sehr klein und es ist nicht erkennbar, ob ein räumliches Cluster vorliegt. In diesem Fall wird das Cluster unterschätzt. (Abb. D4). Die in den Analysen verwendete Distanz von 12 km bewährte sich als ein praktikables Entfernungsbereich für alle Baumarten. Die Cluster wurden in einer angemessenen

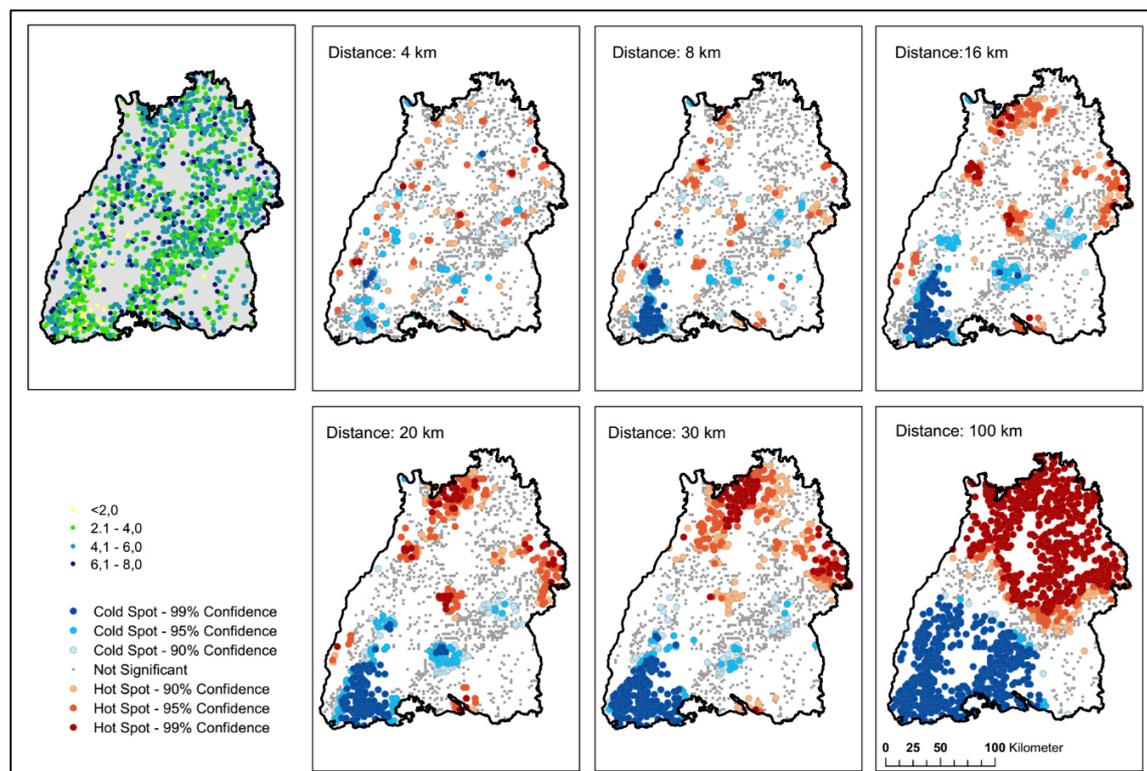


Abb. D4: Bedeutung der Nachbarschaftsdistanz für die Clustergröße. In der Abbildung wird beispielhaft für Baden -Württemberg gezeigt, wie sich unterschiedliche Nachbarschaftsdistanzen der HotSpot-Clusteranalysen auf die Größe der Cluster auswirken können. Jeder Punkt symbolisiert einen Einzelbaum. „Distance“ gibt jeweils die Umgebung an, in der die Einzelbäume in die Berechnungen einbezogen werden.

räumlichen Größe dargestellt und die standörtlichen Eigenschaften dürften in der betrachteten Umgebung weitgehend ähnlich gewesen sein. Eine geringere Distanz hätte zur Folge haben können, dass eine zu geringe Anzahl von Nachbar-Datenpunkten in der Analyse berücksichtigt worden wäre. Dadurch wäre die Aussagekraft der Ergebnisse wenig repräsentativ. Größere Distanzen von 16 bis 20 km hätten vermutlich ebenfalls repräsentative Clustergrößen erzeugt. Deutlich größere Distanzen werden als nicht sinnvoll erachtet, da sie eine Überschätzung der Cluster und somit eine höhere Prognoseunsicherheit zur Folge haben.

4.6.4 Multifaktorielle Regressionsanalyse

Obwohl die multifaktoriellen Analysen die allgemeinen Hauptfaktoren für Wachstum berücksichtigten, liegt der Determinationskoeffizient ($\text{adj. } R^2$) bestenfalls bei 0,22. Bereits die gam-Modelle (Kap. 3.2.1 und 3.2.5) haben eine geringe Modellperformance erzielt. Gründe für die geringe Anpassungsgüte können unterschiedliche Ursachen zurückgeführt werden. Gegebenenfalls wurden wichtige erklärende Variablen nicht berücksichtigt. Darauf deuten auch die Resultate der Global Moran's I-Test (SA) (Tabelle) hin, die ergaben, dass 85 % der Modelle über räumlich autokorrelierte Regressionsresiduen verfügen, was ein Hinweis auf fehlende Variablen sein kann. In den Regressionen wurden unter anderem Höhenstufe sowie Einträge von zum Beispiel Stickstoff oder Kohlenstoff nicht berücksichtigt, obwohl die Faktoren ebenfalls von hoher Relevanz für das Wachstum sein können (Eastaugh et al. 2011; Matyssek et al. 2012; Juknys et al. 2014; Bartsch und Röhrig 2016). Datenausreißer beziehungsweise eine starke Streuung der Daten können Regressionsbeziehungen von ihrer tatsächlichen optimalen Anpassung ablenken und Regressionskoeffizienten verzerren. Ein weiteres Indiz hierfür sind die Resultate des Jarque-Bera-Test für normal verteilte Residuen, den nur 2 der 26 besten Modelle bestanden hatten. Der Jarque-Bera-Test kann aber auch aufgrund nicht normalverteilter Residuen oder fehlender erklärende Variablen zurückgewiesen werden. Die Ergebnisse des Jarque-Bera-Tests und der statistisch signifikanten räumlichen Autokorrelation führen zu einer Verzerrung des Modells und deuten darauf hin, dass erklärende Variablen fehlen. Unberücksichtigt bei dieser Untersuchung blieben Ereignisse, wie die hohen Luftschadstoffimmissionen bis Mitte der 1990er Jahre, die eine deutliche Schädigung der

Wälder und der Vitalität der Bäume verursachten, genauso wie deren Rückgang seit Mitte der 1990er Jahr und die damit verbundene Regeneration der Wälder (Juknys et al. 2014).

Ebenso sind die Auswirkungen von großflächigen Orkanschäden der vergangenen zwei Dekaden nicht einbezogen worden, obwohl davon auszugehen ist, dass sie zu Veränderungen der Konkurrenzsituation auf den Standorten führten und somit auch das Wachstum betrafen. Die Wechselwirkungen zwischen den Variablen oder Sekundärereignissen, wie zum Beispiel die Ausbreitung von Pathogenen durch veränderte Umweltbedingungen, sind schwierig zu erfassen und auch nicht vollständig geklärt. Aber gerade solche Interaktionen von Umweltschadstoffen mit Klima sind von großer Bedeutung für die Zuwachsreaktionen von Bäumen auf diese Stressoren (Bolte et al. 2009; Juknys et al. 2014)

Um oben genannte Faktoren in den Modellen zu berücksichtigen ist der Zeitraum zwischen den Inventuren zu lang. Hier für wären kürzere Zeitskalen erforderlich.

Multikollinearität konnte durch entfernen der Variablen dMI_{veg} aus dem Modell ausgeschlossen werden. Daher scheint der Zuwachs auf Einzelbaumbasis als alleiniger Indikator für den Klimawandel in Wäldern wenig geeignet zu sein, da andere Einflüsse den Klimaeffekt überdecken oder bedeutsamer sind. Weiterhin erschwert die hohe lokale Streuung der Zuwächse, auch bei gleicher Altersklasse und sozialer Stellung der Nachbarbäume, allgemeine Aussagen über Zuwachsreaktionen abzuleiten, da hier offensichtlich Faktoren individuell bzw. lokal wirken.

5 FAZIT UND AUSBLICK

Durch die Analyse auf Einzelbaumbasis konnten die Zuwächse einerseits sehr präzise nachvollzogen werden, andererseits ergaben die Untersuchungen der Einzelbäume eine starke Heterogenität der Zuwächse auf lokaler Ebene. Die große Heterogenität war auch der Grund dafür, dass die Zuwachsmodelle eine sehr geringe Güte zeigten und dadurch der Einfluss des Klimas auf den Zuwachs nur unzureichend gezeigt werden konnte. Daher können Inventurdaten nur bedingt zur Betrachtung von klimaabhängigen Zuwachsreaktionen herangezogen werden. Eine weitere Schwäche des gewählten Ansatzes ist die Berechnung des mittleren Zuwachses aus zwei Durchmesserwerten, die in einem mehrjährigen Abstand von 11 bis 15 Jahren erfasst wurden. Zuwachsreaktionen der Bäume in Jahren mit extremen Witterungsbedingungen konnten dadurch nicht abgebildet werden, obwohl bekannt ist, dass temporäre Extremereignisse den Zuwachs und die Vitalität direkt und nachhaltiger beeinflussen können als stetiger Wandel.

Die Betrachtung auf Einzelbaumbasis führte ebenfalls dazu, dass durch Selektion eine hohe Anzahl von Bäumen in den Analysen nicht berücksichtigt werden konnte. Weiterhin verschob sich die Altersstruktur des Datenkollektivs, da keine jüngeren Bäume hinzukamen. Daher kann es für folgende Untersuchungen sinnvoll sein, statt Einzelbaumanalysen durchzuführen, alle Bäume einer räumlichen Einheit wie Trakt oder Wuchsbezirk einzubeziehen. Dies hätte mehrere Vorteile: Es könnten etwa doppelt so viele Bäume in die Analysen eingehen. Weiterhin würde sich das altersbedingte Zuwachsvermögen wahrscheinlich weniger stark auswirken, da der Effekt durch Mittelwertbildungen gedämpft würde.

Während des ca. 30 jährigen Untersuchungszeitraumes erwärmte sich das Klima auf den meisten Trakt-Standorten um etwa 1,0°C. Dies bedeutete für die meisten Bäume eine deutliche Veränderung ihrer ökologischen Rahmenbedingungen. Die saisonalen Klimaindices ergaben, dass es trotz unveränderter oder steigender Niederschlagssumme regional häufiger zu Trockenereignissen kam. Dies ist als Anzeichen für eine Zunahme extremer werdender Wetterereignisse zu werten. Anhand des saisonalen Klimaindex relative Häufigkeit von Trockenmonaten (rHTM) konnten Zuwachsreaktionen besser erklärt werden, als mit Klimafaktoren, die auf die gesamte Vegetationsperiode bezogen waren. Vor allem auf Standorten mit *geringer* nutzbarer Feldkapazität (<90 mm)

reagierten alle Baumarten außer Wald-Kiefer und Stiel-Eiche bei *häufiger* Trockenheit (rHTM) mit Zuwachsreduktion. Für die trockenheitssensitiven Arten Fichte und Weiß-Tanne bestätigt das Ergebnis die Einschätzung, dass durch den Klimawandel eine Verringerung geeigneter Standorte zu erwarten ist.

Der Zuwachsrückgang bei Rot-Buche lässt vermuten, dass aufgrund der Häufung von Trockenereignissen nicht mehr genug Zeit zur Regeneration bleibt. Dadurch wird es wahrscheinlicher, dass sie auf schlecht wasserversorgten Standorten in Zukunft an Konkurrenzkraft verliert.

Für nachfolgende Untersuchungen, besonders im Hinblick auf die vierte Waldinventur, ist es ratsam, auch die „neuen Bundesländer“ einzubeziehen. Die Klimaanalysen haben hier bereits gezeigt, dass diese Gebiete häufiger und intensiver durch Trockenheitsereignisse betroffen sind, sodass Einflüsse des Klimawandels hier deutlicher zum Tragen kommen könnten. Um geeignete Aussagen über die Auswirkungen des Klimawandels auf die Entwicklung und Verbreitung der Hauptbaumarten treffen zu können, reichen Zuwachsanalysen nicht aus. Es erscheint zielführend, weitere biotische und ökologische Interaktionen zu berücksichtigen und in die Bewertung des Klimarisikos einzubeziehen. Des Weiteren sollten weitergehende Untersuchungen den räumlichen Aspekt stärker berücksichtigen, da lokale Standortbedingungen neben dem Klima einen wesentlichen Einfluss auf den Zuwachs ausüben.

6 VERZEICHNISSE

6.1 Literaturverzeichnis

- Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden der Staatlichen Geologischen Dienste und der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung. Mit 103 Tabellen und 31 Listen. Unter Mitarbeit von Herbert Sponagel. 5., verbesserte und erweiterte Auflage. Stuttgart: E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele und Obermiller).
- Akaike, Hirotogu (1974): A new look at the statistical model identification. In: *IEEE Trans. Automat. Contr.* 19 (6), S. 716–723. DOI: 10.1109/TAC.1974.1100705.
- Ammer, Christian (2009): Welche Baumarten trotzen dem Klimawandel? In: *Der kritische Agrarbericht*, S. 199–203.
- Ammer, Christian; Albrecht, Ludwig; Borchert, Herbert; Brosinger, Franz; Dittmar, Christoph; Elling, Wolfram et al. (2005): Zur Zukunft der Buche (*Fagus sylvatica* L.) in Mitteleuropa Kritische Anmerkungen zu einem Beitrag von RENNENBERG et al. (2004). In: *Allgemeine Forst und Jagdzeitung* 176 (4), S. 60–67.
- Aussenac, Gilbert (2002): Ecology and ecophysiology of circum-Mediterranean firs in the context of climate change. In: *Ann. For. Sci.* 59 (8), S. 823–832. DOI: 10.1051/forest:2002080.
- Bartsch, Norbert; Röhrig, Ernst (2016): Waldökologie. Einführung für Mitteleuropa. 1. Aufl. 2016. Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum. Online verfügbar unter http://ebooks.ciando.com/book/index.cfm/bok_id/1880273.
- Bauwe, Andreas; Jurasinski, Gerald; Scharnweber, Tobias; Schröder, Christian; Lennartz, Bernd (2016): Impact of climate change on tree-ring growth of Scots pine, common beech and pedunculate oak in northeastern Germany. In: *iForest* 9 (1), S. 1–11. DOI: 10.3832/ifor1421-008.
- Beck, Wolfgang (2010): Auswirkungen von Trockenheit und Hitze auf den Waldzustand in Deutschland - waldwachstumskundliche Ergebnisse der Studie im Auftrag des BMELV. In: Jürgen Nagel (Hg.): Deutscher Verband Forstlicher Forschungsanstalten, Sektion Ertragskunde : Jahrestagung 17. - 19. Mai 2010, Körbecke am Möhnesee. Beiträge zur Jahrestagung. Göttingen: Dt. Verband Forstl. Forschungsanst. Sek. Ertragskunde, S. 55–65. Online verfügbar unter <https://www.iww.uni-freiburg.de/publik/pdf/Publikationen%202006/tag2006-inhalt-cd.pdf>
- Benito-Garzón, Marta; Ruiz-Benito, Paloma; Zavala, Miguel A. (2013): Interspecific differences in tree growth and mortality responses to environmental drivers determine potential species distributional limits in Iberian forests. In: *Global Ecology and Biogeography* 22 (10), S. 1141–1151. DOI: 10.1111/geb.12075.
- Bolte, Andreas; Ibisch, Pierre; Menzel, Annete; Rothe, Andreas (2008): Was Klimahüllen uns verschweigen. In: *AFZ-DerWald* 15 (2008), S. 800–803.
- Bolte, Andreas; Ibisch, Pierre (2007): Neun Thesen zu Klimawandel, Waldbau und Waldnaturschutz. In: *AFZ-DerWald* 62 (11), S. 572–576. Online verfügbar unter https://literatur.thuenen.de/digbib_extern/dk039720.pdf, zuletzt geprüft am 02.05.2019.

-
- Bolte, Andreas (2005): Zur Zukunft der Buche in Mitteleuropa. In: *AFZ/Der Wald* 60, S. 1077–1078.
- Bolte, Andreas; Ammer, Christian; Löf, Magnus; Madsen, Palle; Nabuurs, Gert-Jan; Schall, Peter et al. (2009): Adaptive forest management in central Europe: Climate change impacts, strategies and integrative concept. In: *Scandinavian Journal of Forest Research* 24 (6), S. 473–482. DOI: 10.1080/02827580903418224.
- Brandl, Susanne; Falk, Wolfgang; Klemmt, Hans-Joachim; Stricker, Georg; Bender, Andreas; Rötzer, Thomas; Pretzsch, Hans (2014): Possibilities and Limitations of Spatially Explicit Site Index Modelling for Spruce Based on National Forest Inventory Data and Digital Maps of Soil and Climate in Bavaria (SE Germany). In: *Forests* 5 (11), S. 2626–2646. DOI: 10.3390/f5112626#.
- Brang, Peter; Bugmann, Harald; Bürgi, Anton; Mühlethaler, Urs; Rigling, Andreas; Schwitter, Raphael (2008): Klimawandel als waldbauliche Herausforderung | Climate change as a challenge for silviculture. In: *Swiss Forestry Journal* 159 (10), S. 362–373. DOI: 10.3188/szf.2008.0362.
- Brasseur, Guy P.; Jacob, Daniela; Schuck-Zöller, Susanne (2017): Klimawandel in Deutschland: Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven. s.l.: Springer. Online verfügbar unter <http://www.doabooks.org/doab?func=fulltext&rid=20475>.
- Bréda, Nathalie (2000): Water shortage as a key factor in the case of the oak dieback in the Harth Forest (Alsatian plain, France) as demonstrated by dendroecological and ecophysiological study. In: Tomasz Oszako (Hg.): Recent advances on oak health in Europe. Based on papers selected from the international scientific conference "Recent advances on oak health in Europe" held in Warsaw on 22 - 24 November 1999. Warsaw: Forest Research Institute, S. 157–159.
- Bréda, Nathalie; Huc, Roland; Granier, André; Dreyer, Erwin (2006): Temperate forest trees and stands under severe drought: a review of ecophysiological responses, adaptation processes and long-term consequences. In: *Ann. For. Sci.* 63 (6), S. 625–644. DOI: 10.1051/forest:2006042.
- Briceño-Elizondo, Elemer; Garcia-Gonzalo, Jordi; Peltola, Heli; Matala, Juho; Kellomäki, Seppo (2006): Sensitivity of growth of Scots pine, Norway spruce and silver birch to climate change and forest management in boreal conditions. In: *Forest Ecology and Management* 232 (1-3), S. 152–167. DOI: 10.1016/j.foreco.2006.05.062.
- Brosinger, Franz; Östreicher, Simon (2009): Die Fichte im Wandel. In: *LWF Wissen* (63), S. 11–15. Online verfügbar unter https://www.lwf.bayern.de/mam/cms04/bodenklima/dateien/w63_fichte-im-wandel.pdf, zuletzt geprüft am 17.09.2019.
- Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMELV) (Hg.) (2011): Aufnahmeanweisung für die dritte Bundeswaldinventur (2011-2012). Unter Mitarbeit von Friedrich Schmitz und Heino Polley. BMELV. Bonn. Online verfügbar unter https://www.bundeswaldinventur.de/fileadmin/SITE_MASTER/content/Downloads/AufnahmeanweisungBWI3.pdf, zuletzt geprüft am 29.08.2019.
- Choat, Brendan, et al., 2012. Global convergence in the vulnerability of forests to drought. *Nature* 491 (7426), 752–755
- Cochard, Hervé; Bréda, Nathalie; Granier, André; Aussenac, Gilbert (1992): Vulnerability to air embolism of three European oak species (*Quercus petraea* (Matt) Liebl, Q

- pubescens Willd, Q robur L). In: *Ann. For. Sci.* 49 (3), S. 225–233. DOI: 10.1051/forest:19920302.
- Cook, Edward R. (1987): The decomposition of tree-ring series for environmental studies. In: *Tree-Ring Bulletin* (47), S. 37–59.
- Delzon, Sylvain; Urli, Morgane; Samalens, Jean-Charles; Lamy, Jean-Baptiste; Lischke, Heike; Sin, Fabrice et al. (2013): Field evidence of colonisation by Holm Oak, at the northern margin of its distribution range, during the Anthropocene period. In: *PloS one* 8 (11), e80443. DOI: 10.1371/journal.pone.0080443.
- Dittmar, Christoph; Elling, Wolfram (1999): Jahrringbreite von Fichte und Buche in Abhängigkeit von Witterung und Höhenlage. In: *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 118 (1-6), S. 251–270. DOI: 10.1007/BF02768990.
- Dobbertin, Matthias (2005): Tree growth as indicator of tree vitality and of tree reaction to environmental stress: a review. In: *Eur J Forest Res* 124 (4), S. 319–333. DOI: 10.1007/s10342-005-0085-3.
- Dobbertin, Matthias (2006): Baumwachstum und erhöhte Temperaturen. In: *Forum für Wissen*, S. 35–45.
- Dolos, Klara; Märkel, Ulrike (2016): Modellierung der klimatischen Standorteignung forstlich relevanter Baumarten. KLIMOPASS– Klimawandel und modellhafte Anpassung in Baden-Württemberg. Hg. v. LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg. Karlsruhe (KLIMOPASS-Berichte, U82-W03-N19). Online verfügbar unter <http://www.fachdokumente.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/91063/>, zuletzt geprüft am 31.03.2019.
- Dolos, Klara; Mette, Tobias; Wellstein, Camilla (2016): Silvicultural climatic turning point for European beech and sessile oak in Western Europe derived from national forest inventories. In: *Forest Ecology and Management* 373, S. 128–137. DOI: 10.1016/j.foreco.2016.04.018.
- Döring, Sandra; Döring, Jürgen; Borg, Heinz; Böttcher, Falk (2011): Vergleich von Trockenheitsindizes zur Nutzung in der Landwirtschaft unter den klimatischen Bedingungen Mitteldeutschlands. In: *Hercynia* (44), 145–168. Online verfügbar unter https://www.zobodat.at/pdf/Hercynia_44_0145-0168.pdf, zuletzt geprüft am 20.05.2019.
- Dormann, Carsten F.; Kühn, Ingolf (2011): Angewandte Statistik für die biologischen Wissenschaften. Helmholtz Zentrum für Umweltforschung-UFZ. Online verfügbar unter https://www.ufz.de/export/data/2/92353_deutschstatswork_23022011.pdf, zuletzt geprüft am 01.04.2019.
- Drobyshev, Igor; Niklasson, Mats; Eggertsson, Olafur; Linderson, Hans; Sonesson, Kerstin (2008): Influence of annual weather on growth of pedunculate oak in southern Sweden. In: *Ann. For. Sci.* 65 (5), S. 512. DOI: 10.1051/forest:2008033.
- Dulamsuren, Choimaa; Hauck, Markus; Kopp, Gisbert; Ruff, Marcel; Leuschner, Christoph (2017): European beech responds to climate change with growth decline at lower, and growth increase at higher elevations in the center of its distribution range (SW Germany). In: *Trees* 31 (2), S. 673–686. DOI: 10.1007/s00468-016-1499-x.

-
- DWD (2017): National climate report. Climate - yesterday, today and in future. Offenbach: Deutscher Wetterdienst Climate and Environment Consultancy Central Climate Office. Online verfügbar unter <http://www.dwd.de/nationalerklimateport>.
- Eastaugh, Chris S.; Pötzelsberger, Elisabeth; Hasenauer, Hubert (2011): Assessing the impacts of climate change and nitrogen deposition on Norway spruce (*Picea abies* L. Karst) growth in Austria with BIOME-BGC. In: *Tree physiology* 31 (3), S. 262–274. DOI: 10.1093/treephys/tpr033.
- Ellenberg, Heinz; Dierschke, Hartmut (2010): Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen. In ökologischer, dynamischer und historischer Sicht ; 203 Tabellen. Unter Mitarbeit von Christoph Leuschner. 6., vollständig neu bearbeitete und stark erweiterte Auflage. Stuttgart: Verlag Eugen Ulmer (UTB Botanik, Ökologie, Agrar- und Forstwissenschaften, Geographie, 8104).
- Ellenberg, Heinz; Mayer, Robert; Schauerer, Jürgen (Hg.) (1986): Ökosystemforschung. Ergebnisse des Sollingprojekts ; 1966 - 1986. Stuttgart: Ulmer.
- Elling, Wolfram; Dittmar, Christoph; Pfaffelmoser, Klaus; Rötzer, Thomas (2009): Dendroecological assessment of the complex causes of decline and recovery of the growth of silver fir (*Abies alba* Mill.) in Southern Germany. In: *Forest Ecology and Management* 257 (4), S. 1175–1187. DOI: 10.1016/j.foreco.2008.10.014.
- EUFORGEN 2009, Distribution maps of tree-species, www.euforgen.org.
- Falk, Wolfgang; Mellert, Karl H. (2011): Species distribution models as a tool for forest management planning under climate change: risk evaluation of *Abies alba* in Bavaria. In: *Journal of Vegetation Science* 22 (4), S. 621–634. DOI: 10.1111/j.1654-1103.2011.01294.x.
- Fischer, Anton (Hg.) (2010): Die Entwicklung von Wald-Biozönosen nach Sturmwurf. Weinheim: Wiley-VCH-Verl. (Umweltforschung in Baden-Württemberg).
- Fischer, Richard; Dobbertin, Matthias; Granke, Oliver; Karoles, Kalle; Köhl, Michael; Kraft, Philipp et al. (2006): Forest condition in Europe. 2006 executive report of ICP Forests. Hamburg (Work report of the Institute for World Forestry). Online verfügbar unter <https://www.icp-forests.org/pdf/ER2006.pdf>, zuletzt aktualisiert am 10.04.2019.
- Friedrichs, Dagmar A.; Büntgen, Ulf; Frank, David C.; Esper, Jan; Neuwirth, Burkhard; Löffler, Jörg (2009a): Complex climate controls on 20th century oak growth in Central-West Germany. In: *Tree physiology* 29 (1), S. 39–51. DOI: 10.1093/treephys/tpn003.
- Friedrichs, Dagmar A.; Trouet, Valerie; Büntgen, Ulf; Frank, David C.; Esper, Jan; Neuwirth, Burkhard; Löffler, Jörg (2009b): Species-specific climate sensitivity of tree growth in Central-West Germany. In: *Trees* 23 (4), S. 729–739. DOI: 10.1007/s00468-009-0315-2.
- Gauer, Jürgen; Kroiher, Franz (Hg.) (2012): Waldökologische Naturräume Deutschlands - Forstliche Wuchsgebiete und Wuchsbezirke. Digitale topographische Grundlagen - Neubearbeitung Stand 2011. Braunschweig: Johann Heinrich von Thünen-Institut (vTI), Bundesforschungsinstitut für Ländliche Räume, Wald und Fischerei (Landbauforschung Völknerode - Sonderheft, 359).
- Ge, Zhen-Ming; Kellomäki, Seppo; Zhou, Xiao; Wang, Kai-Yun; Peltola, Heli; Väisänen, Hannu; Strandman, Harri (2013): Effects of climate change on evapotranspiration and

- soil water availability in Norway spruce forests in southern Finland: an ecosystem model based approach. In: *Ecohydrol.* 6 (1), S. 51–63. DOI: 10.1002/eco.276.
- George, Jan-Peter, Schueler, Silvio ; Karanitsch-Ackerl, Sandra, Mayer, Konrad, Klumpp, Raphael T., Grabner, mmichael, 2015. Inter- and intraspecific variation in drought sensitivity in *Abies spec.* and its relation to wood density and growth traits. *Agric. For. Meteorol.* 214-215, 430–443.
- Geßler, Arthur; Schrempp, Stefan; Matzarakis, Andreas; Mayer, Helmut; Rennenberg, Heinz; Adams, Mark A. (2001): Radiation modifies the effect of water availability on the carbon isotope composition of beech (*Fagus sylvatica* L.). In: *New Phytol* (50), S. 653–664.
- Geßler, Arthur; Keitel, Claudia; Kreuzwieser, Jurgen; Matyssek, Rainer; Seiler, Wolfgang; Rennenberg, Heinz (2007): Potential risks for European beech (*Fagus sylvatica* L.) in a changing climate. In: *Trees* (21), S. 1–11. DOI: 10.1007/s00468-006-0107-x.
- Getis, Arthur; Ord, Keith J. (1992): The Analysis of Spatial Association by Use of Distance Statistics. In: *Geographical analysis* 24 (3), S. 189–206. DOI: 10.1111/j.1538-4632.1992.tb00261.x.
- Harlfinger, Otmar; Knees, Gerd (1999): Klimatographie : Klimareferat der österreichischen Bodenschätzung. Innsbruck: Wagner (Klimahandbuch der österreichischen Bodenschätzung, 1).
- Hartmann, Peter (2013): Nutzbare Feldkapazitäten im effektiven Wurzelraum an BZE2-Standorten in Baden-Württemberg. Freiburger Forstliche Forschung 96: Ausgleichs- und Nutzbare Feldkapazitäten im effektiven Wurzelraum an BZE2-Standorten in Baden-Württemberg. Freiburg (Freiburger Forstliche Forschung, 96).
- Hasenauer, Hubert; Nemani, Ramakrishna R.; Schadauer, Klemens; Running, Steven W. (1999): Forest growth response to changing climate between 1961 and 1990 in Austria. In: *Forest Ecology and Management* 122, S. 209–219. Online verfügbar unter iteseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.560.7029&rep=rep1&type=pdf, zuletzt geprüft am 10.04.2019.
- Hoffmann, Nils (2019): Zuwachspotentiale und Klimasensivität eingeführter Baumarten in Nordrhein-Westfalen. Ergebnisse aus dem Arboretum Burgholz. Dissertation. Georg-August-Universität, Göttingen. Abteilung Waldbau und Waldökologie der gemäßigten Zonen.
- Hoffmann, Nils; Leder, Bertram; Vor, Torsten (2015): Zuwachsanalyse ostasiatischer Baumarten auf einem nordrheinwestfälischen Standort unter Klimaaspekten. In: *Forstarchiv* 86, S. 123–138. DOI: 10.4432/0300-4112-86-123.
- Hoffmann, Nils; Schall, Peter; Ammer, Christian; Leder, Bertram; Vor, Torsten (2018): Drought sensitivity and stem growth variation of nine alien and native tree species on a productive forest site in Germany. In: *Agricultural and Forest Meteorology* 256-257, S. 431–444. DOI: 10.1016/j.agrformet.2018.03.008.
- Ivancich, Horacio S.; Martínez Pastur, Guillermo J.; Roig, Fidel A.; Barrera, Marcelo D.; Pulido, Fernando (2012): Changes in height growth patterns in the upper tree-line forests of Tierra del Fuego in relation to climate change. In: *Bosque (Valdivia)* 33 (3), S. 11–12. DOI: 10.4067/S0717-92002012000300006.

-
- Juknys, Romualdas; Augustaitis, Algirdas; Vencloviene, Jone; Kliučius, Almontas; Vitas, Adomas; Bartkevičius, Edmundas; Jurkonis, Nerijus (2014): Dynamic response of tree growth to changing environmental pollution. In: *Eur J Forest Res* 133 (4), S. 713–724. DOI: 10.1007/s10342-013-0712-3.
- Kaspar, Frank; Mächel, Hermann; Jacob, Daniela; Kottmeier, Christoph (2017): Beobachtung von Klima und Klimawandel in Mitteleuropa und Deutschland. In: Susanne Schuck-Zöller, Daniela Jacob und Guy P. Brasseur (Hg.): *Klimawandel in Deutschland*, Bd. 8. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 17–26.
- Kelly, Michael P.; Leuschner, Hanns Hubert; Briffa, Keith R.; Harris, Ian C. (2002): The climatic interpretation of pan-European signature years in oak ring-width series. In: *The Holocene* 12 (6), S. 689–694. DOI: 10.1191/0959683602hl582rp.
- Kint, Vincent; Aertsen, Wim; Campioli, Matteo; Vansteenkiste, Dries; Delcloo, Andy; Muys, Bart (2012): Radial growth change of temperate tree species in response to altered regional climate and air quality in the period 1901–2008. In: *Climatic Change* 115 (2), S. 343–363. DOI: 10.1007/s10584-012-0465-x.
- Klap, J. M. (2000): Environmental stress in German forests. Assessment of critical deposition levels and their exceedances and meteorological stress for crown condition monitoring sites in Germany. Wageningen: Alterra (ALTERRA-rapport, 134).
- Klemmt, Hans-Joachim; Neubert, Michael (2011): Möglichkeiten und Grenzen der Auswertbarkeit der BWI₃ in Bayern. In: *LWF Aktuell* (85), S. 44–46. Online verfügbar unter <https://www.lwf.bayern.de/mam/cms04/boden-klima/dateien/a85-moeglichkeiten-und-grenzen-der-auswertbarkeit-der-bwi3-in-bayern.pdf>, zuletzt geprüft am 30.08.2019.
- Knutzen, Florian; Dulamsuren, Choimaa; Meier, Ina Christin; Leuschner, Christoph (2017): Recent Climate Warming-Related Growth Decline Impairs European Beech in the Center of Its Distribution Range. In: *Ecosystems* 20 (8), S. 1494–1511. DOI: 10.1007/s10021-017-0128-x.
- Kohn, Corinna (2013): Triebängenwachstum der Fichte als Vitalitätsindikator. In: *AFZ Der Wald* 2013, S. 43–45. Online verfügbar unter www.forstpraxis.de, zuletzt geprüft am 23.03.2019.
- Kohnle, Ulrich; Hein, Sebastian.; Michiels, Hans Gerd (2008): Waldbauliche Handlungsmöglichkeiten angesichts Klimawandel. In: *FVA-einblick+*. Online verfügbar unter https://www.waldwissen.net/wald/klima/wandel_co2/fva_klima_waldbauliches_handeln/fva_klima_waldbauliches_handeln_artikel, zuletzt geprüft am 11.04.2019.
- Kölling, Christian; Walentowski, Helge; Borchert, Herbert (2005): Die Buche in Mitteleuropa: eine Waldbaumart mit grandioser Vergangenheit und sicherer Zukunft. In: *AFZ/Der Wald* 60, S. 696–701.
- Kölling, Christian (2012): Muss es immer Eiche sein? Baumartenalternativen für warm-trockene Regionen. In: *LWF Aktuell* 19 (88), S. 28–30. Online verfügbar unter https://www.lwf.bayern.de/mam/cms04/service/dateien/a88_waldschutz-korrigiert_web_geschuetzt.pdf, zuletzt geprüft am 17.09.2019.
- Kölling, Christian; Ammer, Christian (2006): Waldumbau unter den Vorzeichen des Klimawandels. In: *Allgemeine Forstzeitschrift/Der Wald* 6, S. 1086–1089.

- Kölling, Christian; Falk, Wolfgang; Walentowski, Helge (2011): Standörtliche Möglichkeiten für den Anbau der Tanne (*Abies alba* und *Abies grandis*) in Bayern. Hg. v. Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF-Wissen, 66). Online verfügbar unter <http://www.lwf.bayern.de/mam/cms04/boden-klima/dateien/Bstandoertliche-moeglichkeiten-fuer-den-anbau-der-tanne-in-bayern.pdf>
- Kölling, Christian; Zimmermann, L.; Walentowski, Helge (2007): Klimawandel: Was geschieht mit Buche und Fichte? In: *Allgemeine Forstzeitschrift/Der Wald* 62, S. 584–588.
- Koprowski, Marcin; Zielski, Andrzej (2006): Dendrochronology of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) from two range centres in lowland Poland. In: *Trees* 20 (3), S. 383. DOI: 10.1007/s00468-006-0051-9.
- Kraft, Gustav (1884): Beiträge zur Lehre von den Durchforstungen, Schlagstellungen und Lichtungshieben. Hannover: Klindworth.
- Land, Alexander; Remmele, Sabine; Schönbein, Johannes; Küppers, Manfred; Zimmermann, Reiner (2017): Climate-growth analysis using long-term daily-resolved station records with focus on the effect of heavy precipitation events. In: *Dendrochronologia* 45, S. 156–164. DOI: 10.1016/j.dendro.2017.08.005.
- Lebourgeois, François; Bréda, Nathalie; Ulrich, Erwin; Granier, André; (2005): Climate-tree-growth relationships of European beech (*Fagus sylvatica* L.) in the French Permanent Plot Network (RENECOFOR). In: *Trees* 19 (4), S. 385–401. DOI: 10.1007/s00468-004-0397-9.
- Leuschner, Christoph; Schipka, Florian (2004): Klimawandel und Naturschutz in Deutschland. Vorstudie ; Abschlußbericht eines F+E-Vorhabens zur Erstellung einer Literaturstudie (FKZ: 80383010). Stand: Juli 2004. Bonn: BfN (BfN-Skripten, 115).
- Lévesque, Mathieu; Rigling, Andreas; Bugmann, Harald; Weber, Pascale; Brang, Peter (2014): Growth response of five co-occurring conifers to drought across a wide climatic gradient in Central Europe. In: *Agricultural and Forest Meteorology* 197, S. 1–12. DOI: 10.1016/j.agrformet.2014.06.001.
- Lévy, G.; Becker, Matthias; Duhamel, D. (1992): A comparison of the ecology of pedunculate and sessile oaks: Radial growth in the centre and northwest of France. In: *Forest Ecology and Management* 55 (1-4), S. 51–63. DOI: 10.1016/0378-1127(92)90091-M.
- Lindner, Marcus; Fitzgerald, Joanne B.; Zimmermann, Niklaus E.; Reyer, Christopher; Delzon, Sylvain; van der Maaten, Ernst et al. (2014): Climate change and European forests: what do we know, what are the uncertainties, and what are the implications for forest management? In: *Journal of environmental management* 146, S. 69–83. DOI: 10.1016/j.jenvman.2014.07.030.
- Lindner, Marcus; Maroschek, Michael; Netherer, Sigrid; Kremer, Antoine; Barbati, Anna; Garcia-Gonzalo, Jordi et al. (2010): Climate change impacts, adaptive capacity, and vulnerability of European forest ecosystems. In: *Forest Ecology and Management* 259 (4), S. 698–709. DOI: 10.1016/j.foreco.2009.09.023.
- Lloret, Francisco; Keeling, Eric G.; Sala, Anna (2011): Components of tree resilience: effects of successive low-growth episodes in old ponderosa pine forests. In: *Oikos* 120 (12), S. 1909–1920. DOI: 10.1111/j.1600-0706.2011.19372.x.
- Macias, Marc; Andreu, Laia; Bosch, Oriol; Camarero, J. Julio; Gutiérrez, Emilia (2006): Increasing Aridity is Enhancing Silver Fir *Abies Alba* Mill.) Water Stress in its South-

-
- Western Distribution Limit. In: *Climatic Change* 79 (3-4), S. 289–313. DOI: 10.1007/s10584-006-9071-0.
- Mäkinen, Harri (1998): The suitability of height and radial increment variation in *Pinus sylvestris* (L.) for expressing environmental signals. In: *Forest Ecology and Management* 112 (1), S. 191–197. DOI: 10.1016/S0378-1127(98)00337-5.
- Mäkinen, Harri; Nöjd, Pekka; Isomäki, Antti (2002): Radial, Height and Volume Increment Variation in *Picea abies* (L.) Karst. Stands with Varying Thinning Intensities. In: *Scandinavian Journal of Forest Research* 17 (4), S. 304–316. DOI: 10.1080/02827580260138062.
- Manthey, Michael; Leuschner, Christoph; Härdtle, Werner (2007): Buchenwälder und Klimawandel. In: *Natur und Landschaft: Zeitschrift für Naturschutz und Landschaftspflege* 82 (9/10), S. 441–445. Online verfügbar unter [http://fox.leuphana.de/portal/de/publications/buchenwalder-und-klimawandel\(96db6fa2-ebb1-46b4-bac9-29f8fbb28d66\).html](http://fox.leuphana.de/portal/de/publications/buchenwalder-und-klimawandel(96db6fa2-ebb1-46b4-bac9-29f8fbb28d66).html).
- Märkel, Ulrike; Dolos, Klara (2017): Tree Species Site Suitability as a Combination of Occurrence Probability and Growth and Derivation of Priority Regions for Climate Change Adaptation. In: *Forests* 8 (6), S. 181. DOI: 10.3390/f8060181.
- Martínez-Vialta, Jordi; López, Bernat Claramunt; Aadell, Natalia; Badialla, Llorenç; Ninerola, Miquel (2008): Twentieth century increase of Scots pine radial growth in NE Spain shows strong climate interactions. In: *Global change biology* 14 (12), S. 2868–2881. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2008.01685.x.
- Martonne, Emmanuel de (1926): L'indice d'aridité. In: *Bulletin de l'Association de Géographes Français* (9), S. 3–5.
- Matyssek, Rainer; Wieser, Gerhard; Calfapietra, Carlo; Vries, Wim de; Dizengremel, Pierre; Ernst, Dieter et al. (2012): Forests under climate change and air pollution: gaps in understanding and future directions for research. In: *Environmental pollution (Barking, Essex : 1987)* 160 (1), S. 57–65. DOI: 10.1016/j.envpol.2011.07.007.
- Maxime, Cailleret; Hendrik, Davi (2011): Effects of climate on diameter growth of co-occurring *Fagus sylvatica* and *Abies alba* along an altitudinal gradient. In: *Trees* 25 (2), S. 265–276. DOI: 10.1007/s00468-010-0503-0.
- Meinardus, Cathrin; Bräuning, Achim (2011): Zur Trockenstresstoleranz von Eichen und Buchen. Erholungsreaktionen der Rotbuche und Traubeneiche nach Dürrejahre. In: *LWF Aktuell* 18 (85), S. 6–8.
- Menzel, Annette; Fabian, Peter (2001): Veränderungen der forstlichen Vegetationszeit in den letzten Jahrzehnten in Deutschland. In: *Beiträge zu Forstwirtschaft und Landschaftsökologie*, S. 188–191.
- Menzel, Annette; Fabian, Peter (1999): Growing season extended in Europe. In: *Nature* 397 (6721), S. 659. DOI: 10.1038/17709.
- Messaoud, Yassine; Chen, Han Y. H. (2011): The influence of recent climate change on tree height growth differs with species and spatial environment. In: *PloS one* 6 (2), e14691. DOI: 10.1371/journal.pone.0014691.

- Mette, Tobias; Dolos, Klara; Meinardus, Cathrin; Bräuning, Achim; Reineking, Björn; Blaschke, Markus et al. (2013): Climatic turning point for beech and oak under climate change in Central Europe. In: *Ecosphere* 4 (12). DOI: 10.1890/ES13-00115.1.
- Mette, Tobias; Rötzer, Thomas; Pretzsch, Hans (2011): Ein Dürre-Index für die Forstwirtschaft? FORSCHUNGSVERBUND FORKASTLWF aktuell 85/201119 Online verfügbar unter <https://www.lwf.bayern.de/mam/cms04/service/dateien/forkast-oekosysteme-im-klimawandel-a85.pdf>, zuletzt geprüft am 12.09.2019.
- Metzing, Detlev (2016): Ausbreitung von Pflanzen infolge des Klimawandels. 6 pages / Warnsignal Klima: Die Biodiversität; 152-157. DOI: 10.2312/warnsignal.klima.die-biodiversitaet.25.
- Mitchell, Andy (2005): The ESRI guide to GIS analysis. Redlands, Calif.: ESRI Press.
- Mitscherlich, Gerhard (1950a): Die Bedeutung der Wuchsgebiete für das Bestandeswachstum von Buche, Eiche, Erle und Birke. In: *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 69 (4), S. 184–211. DOI: 10.1007/BF01826240.
- Mitscherlich, Gerhard (1950b): Die Bedeutung der Wuchsgebiete für das Bestandeswachstum von Fichte und Douglasie. In: *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 69 (1), S. 27–51. DOI: 10.1007/BF01822098.
- Mölder, Inga; Leuschner, Christoph; Leuschner, Hanns Hubert (2011): $\delta^{13}\text{C}$ signature of tree rings and radial increment of *Fagus sylvatica* trees as dependent on tree neighborhood and climate. In: *Trees* 25 (2), S. 215–229. DOI: 10.1007/s00468-010-0499-5.
- Moran, Patrick Alfred Pierce (1950): Notes on Continuous Stochastic Phenomena. In: *Biometrika* 37 (1/2), S. 17. DOI: 10.2307/2332142.
- Muck, Peter; Borchert, Herbert; Elling, Wolfram; Hahn, Jürgen; Immler, Thomas; Konnert, Monika et al. (2008): Die Weißtanne – ein Baum mit Zukunft. Die Weißtanne ist ein Hoffnungsträger für den Waldbau im Klimawandel. In: *LWF Aktuell* (67), S. 56–58. Online verfügbar unter https://www.lwf.bayern.de/mam/cms04/boden-klima/dateien/a67-20_wei_tanne_baum_mit_zukunft.pdf, zuletzt geprüft am 04.05.2019.
- Müller-Westermeier, Gerhard (1995): Numerisches Verfahren zur Erstellung klimatologischer Karten. Hg. v. Deutscher Wetterdienst. Deutscher Wetterdienst. Offenbach am Main (Berichte des Deutschen Wetterdienstes, 193), zuletzt geprüft am 01.04.2019.
- Neuner, Susanne Renate (2016): Baumartenwahl im Klimawandel. Geänderte Überlebenswahrscheinlichkeiten und finanzielle Konsequenzen für Fichte, Buche und deren Mischbestände. Dissertation. Technische Universität München, München. Online verfügbar unter <http://nbn-resolving.de/urn/resolver.pl?urn:nbn:de:bvb:91-diss-20160930-1304555-1-2>, zuletzt geprüft am 16.09.2019.
- Nothdurft, Arne (2013): Spatio-temporal prediction of tree mortality based on long-term sample plots, climate change scenarios and parametric frailty modeling. In: *Forest Ecology and Management* 291, S. 43–54. DOI: 10.1016/j.foreco.2012.11.028.
- NW-FVA (2018): Der Waldzustandsbericht Niedersachsen. Unter Mitarbeit von I. Dammann, U. Paar, J. Weymar, M. Spielmann und J. Eichhorn. Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt.

-
- Oberhuber, Walter; Stumböck, Max; Kofler, Werner (1998): Climate-tree-growth relationships of Scots pine stands (*Pinus sylvestris* L.) exposed to soil aridity. In: *Trees* 13 (1), S. 19–27. DOI: 10.1007/PL00009734.
- Ord, Keith J.; Getis, Arthur (1995): Local Spatial Autocorrelation Statistics: Distributional Issues and an Application. In: *Geographical analysis* 27 (4), S. 286–306. DOI: 10.1111/j.1538-4632.1995.tb00912.x.
- Pachauri, Rajendra K. (2008): Climate change 2007: synthesis report. A report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva: IPCC, WMO.
- Pachauri, Rajendra K. (2016): Klimaänderung 2014. Synthesebericht. Bonn: IPCC-Koordinierungsstelle.
- Parmesan, Camille; Yohe, Gary (2003): A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. In: *Nature* 421 (6918), S. 37–42. DOI: 10.1038/nature01286.
- Penninckx, Valérie; Meerts, Pierre; Herbauts, Jacques; Gruber, Wolf (1999): Ring width and element concentrations in beech (*Fagus sylvatica* L.) from a periurban forest in central Belgium. In: *Forest Ecology and Management* 113 (1), S. 23–33. DOI: 10.1016/S0378-1127(98)00412-5.
- Pretzsch, Hans; Schütze, Gerhard; Uhl, Enno (2013): Resistance of European tree species to drought stress in mixed versus pure forests: evidence of stress release by inter-specific facilitation. In: *Plant biology (Stuttgart, Germany)* 15 (3), S. 483–495. DOI: 10.1111/j.1438-8677.2012.00670.x.
- Pretzsch, Hans; Ján Ďurský (2002): Growth reaction of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) and European beech (*Fagus sylvatica* L.) to possible climatic changes in Germany. A sensitivity study. In: *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 121 (30), Supplement 1: 145–154.
- Profft, Ingolf; Seiler, Michael; Arenhövel, Wolfgang (2007): Die Zukunft der Fichte in Thüringen vor dem Hintergrund des Klimawandels. In: *Forst und Holz* 62, S. 19–25.
- Profft, Ingolf; Baier, Ulf; Seiler, Michael (2008): Borkenkäfer als Vitalitätsindikator für einen standortgerechten Fichtenanbau. In: *Forst und Holz* 63, S. 32–37.
- Rais, Andreas; van de Kuilen, Jan-Willem G.; Pretzsch, Hans (2014): Growth reaction patterns of tree height, diameter, and volume of Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* [Mirb.] Franco) under acute drought stress in Southern Germany. In: *European Journal of Forest Research* 133 (6), S. 1043–1056. DOI: 10.1007/s10342-014-0821-7.
- Rebetez, M.; Dobbertin, M. (2004): Climate change may already threaten Scots pine stands in the Swiss Alps. In: *Theor. Appl. Climatol.* 79 (1-2), S. 1–9. DOI: 10.1007/s00704-004-0058-3.
- Reich, Peter B.; Oleksyn, Jacek (2008): Climate warming will reduce growth and survival of Scots pine except in the far north. In: *Ecology letters* 11 (6), S. 588–597. DOI: 10.1111/j.1461-0248.2008.01172.x.
- Reif, Albert; Brucker, Ulrike; Kratzer, Raffael; Schmiedinger, Andreas; Bauhus, Jürgen (2010): Waldbau und Baumartenwahl in Zeiten des Klimawandels aus Sicht des Naturschutzes. Abschlussbericht eines F+E-Vorhabens im Auftrag des Bundesamtes für Naturschutz. FKZ 3508 84 0200. Hg. v. Bundesamte für Naturschutz. Online

- verfügbar unter
https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Forschungsdatenbank/fkz_3508_84_0200_waldbau.pdf, zuletzt geprüft am 16.09.2019.
- Rennenberg, Heinz; Seiler, Wolfgang; Matyssek, Rainer; Gessler, Arthur; Kreuzwieser, Jürgen (2004): European beech (*Fagus sylvatica* L.) - A forest tree without future in the south of Central Europe? In: *Allgemeine Forst und Jagdzeitung* 175, S. 210–224.
- Rolland, Colette; Michalet, Richard; Desplanque, Carole; Petetin, A.; Aimé, Silvio (1999): Ecological requirements of *Abies alba* in the French Alps derived from dendro-ecological analysis. In: *Journal of Vegetation Science* 10 (3), S. 297–306. DOI: 10.2307/3237059.
- Ruiz-Benito, Paloma; Lines, Emily R.; Gómez-Aparicio, Lorena; Zavala, Miguel A.; Coomes, David A. (2013): Patterns and drivers of tree mortality in iberian forests: climatic effects are modified by competition. In: *PloS one* 8 (2), e56843. DOI: 10.1371/journal.pone.0056843.
- Sabaté, Santiago; Gracia, Carlos A.; Sánchez, Anabel (2002): Likely effects of climate change on growth of *Quercus ilex*, *Pinus halepensis*, *Pinus pinaster*, *Pinus sylvestris* and *Fagus sylvatica* forests in the Mediterranean region. In: *Forest Ecology and Management* 162 (1), S. 23–37. DOI: 10.1016/S0378-1127(02)00048-8.
- Scharnweber, Tobias (2014): Dendroecology of Beech & Oak. Past growth and future development-how climate, site conditions and strong environmental shifts influence growth performance of *Fagus sylvatica* (L.) and *Quercus robur* (L.) in northern Central-Europe. Dissertation. Ernst-Moritz-Arndt-Universität, Greifswald. Online verfügbar unter https://epub.uni-greifswald.de/files/1543/Dendroecology_of_Beech_and_Oak.pdf, zuletzt geprüft am 29.08.2019.
- Scharnweber, Tobias; Manthey, Michael; Criegee, Christian; Bauwe, Andreas; Schröder, Christian; Wilmking, Martin (2011): Drought matters - Declining precipitation influences growth of *Fagus sylvatica* L. and *Quercus robur* L. in north-eastern Germany. In: *Forest Ecology and Management* 262 (6), S. 947–961. DOI: 10.1016/j.foreco.2011.05.026.
- Scharnweber, Tobias; Manthey, Michael; Wilmking, Martin (2013): Differential radial growth patterns between beech (*Fagus sylvatica* L.) and oak (*Quercus robur* L.) on periodically waterlogged soils. In: *Tree physiology* 33 (4), S. 425–437. DOI: 10.1093/treephys/tpt020.
- Schindler, Dirk; Mayer, Helmut (2007): Forstmeteorologische Untersuchungen zur Trockenheit 2003 im Südwesten Deutschlands. In: *Allgemeine Forst und Jagdzeitung* 178 (2/3), S. 21–37.
- Schönwiese, Christian D.; Staeger, Tim; Trömel, Silke (2004): The hot summer 2003 in Germany. Some preliminary results of a statistical time series analysis. In: *metz* 13 (4), S. 323–327. DOI: 10.1127/0941-2948/2004/0013-0323.
- Schreiber, Detlef (1973): Entwurf einer Klimaeinteilung für landwirtschaftliche Belange. Zugl.: Hohenheim, Univ., Habil.-Schr. Paderborn: Schöningh (Bochumer geographische Arbeiten Sonderreihe, 3).

-
- Schweingruber, Fritz Hans; Eckstein, Dieter; Serre-Bachet, Françoise; Bräker, Otto U. (1990): Identification, presentation and interpretation of event years and pointer years in dendrochronology. *Dendrochronologia* 8:9-38.
- Smith, Melinda D. (2011): An ecological perspective on extreme climatic events: a synthetic definition and framework to guide future research. In: *Journal of Ecology* 99 (3), S. 656–663. DOI: 10.1111/j.1365-2745.2011.01798.x.
- Spellmann, Hermann; Suttmöller, Johannes; Meesenburg, Henning (2007): Risikovorsorge im Zeichen des Klimawandels. In: *Allgemeine Forstzeitschrift/Der Wald* 62, S. 1246–1249.
- Sykes, Martin T. (2005): Climate Change Impacts: Vegetation. In: *Encyclopedia of life sciences*, Bd. 165. Chichester, England: Wiley, S. 351. Online verfügbar unter <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/9780470015902.a0021227>, zuletzt geprüft am 14.08.2019.
- Thomas, Frank M.; Blank R.; Hartmann, Günter (2002): Abiotic and biotic factors and their interactions as causes of oak decline in Central Europe. In: *Forest Pathol* 32 (4-5), S. 277–307. DOI: 10.1046/j.1439-0329.2002.00291.x.
- Thomasius, Harald (1991): Mögliche Auswirkungen einer Klimaänderung auf die Wälder Mitteleuropas. In: *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 110, Mögliche Auswirkungen einer Klimaänderung auf die Wälder Mitteleuropas.
- Thuiller, Wilfried; Albert, Cécile; Araújo, Miguel B.; Berry, Pam M.; Cabeza, Mar; Guisan, Antoine et al. (2008): Predicting global change impacts on plant species' distributions: Future challenges. In: *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics* 9 (3), S. 137–152. DOI: 10.1016/j.ppees.2007.09.004.
- Trömel, Silke; Schönwiese, Christian D. (2007): Probability change of extreme precipitation observed from 1901 to 2000 in Germany. In: *Theor. Appl. Climatol.* 87 (1-4), S. 29–39. DOI: 10.1007/s00704-005-0230-4.
- Walentowski, Helge; Falk, Wolfgang; Mette, Tobias; Kunz, Jörg; Bräuning, Achim; Meinardus, Cathrin et al. (2017): Assessing future suitability of tree species under climate change by multiple methods: a case study in southern Germany. In: *Ann. For. Res.* 60 (1). DOI: 10.15287/afr.2016.789.
- Walentowski, Helge; Kölling, Christian; Ewald, Jörg (2007): Die Waldkiefer-bereit für den Klimawandel? In: *LWF Wissen* 57, S. 37–46.
- Walter, Heinrich; Lieth, Helmut (1964): *Klimadiagramm-Weltatlas*. 2. Auflage. Jena: Fischer.
- Zang, Christian; Hartl-Meier, Claudia; Dittmar, Christoph; Rothe, Andreas; Menzel, Annette (2014): Patterns of drought tolerance in major European temperate forest trees: climatic drivers and levels of variability. In: *Global change biology* 20 (12), S. 3767–3779. DOI: 10.1111/gcb.12637.
- Zang, Christian; Pretzsch, Hans; Rothe, Andreas (2012): Size-dependent responses to summer drought in Scots pine, Norway spruce and common oak. In: *Trees* 26 (2), S. 557–569. DOI: 10.1007/s00468-011-0617-z.
- Zimmermann, Jorma; Hauck, Markus; Dulamsuren, Choimaa; Leuschner, Christoph (2015): Climate Warming-Related Growth Decline Affects *Fagus sylvatica*, But Not

Other Broad-Leaved Tree Species in Central European Mixed Forests. In: *Ecosystems* 18 (4), S. 560–572. DOI: 10.1007/s10021-015-9849-x.

Zimmermann, Niklaus; Bolliger, Janine; Gehrig-Fasel, Jacqueline; Guisan, Antoine; Kienast, Felix; Lischke, Heike; Bemerkungen, Einleitende (Hg.) (2006): Wo wachsen die Bäume in 100 Jahren? Unter Mitarbeit von Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft. Forum für Wissen 2006. WSL Birmensdorf.

6.2 Abkürzungsverzeichnis

Abb.	Abbildung
jDZ	jährlicher Durchmesserzuwachs auf Brusthöhe (mm)
AICc	Akaike's Informationskriterium
BHD	Brusthöhendurchmesser in 1,3m (cm)
BÜK	Bodenübersichtskarte
BWI	Bundeswaldinventur
CRU	Climate Research Unit
dMI	De Martonne Index
DWD	Deutscher Wetterdienst
gam	generalisierte additive Modelle
GF	Bestandesgrundfläche (m ² x ha ⁻¹)
HKI	Harlfinger-Knees Trockenheitsindex
JB	Jarque-Bera-Test auf Normalverteilung
K(BP)	Koenkers t-verteilte Breusch-Pagan-Statistik
Kap.	Kapitel
Lat.	Breitengrad (Latitude)
Long.	Längengrad (Longitude)
mGFH	mittlere Bestandesgrundflächenhaltung
N	Niederschlagssumme (mm)
nFKWe	Nutzbare Feldkapazität des Wurzelraumes (mm)
rHTM	Relative Häufigkeit Trockener Monate (%)
SA	räumliche Autokorrelation
T	Temperatur (°C)
Tab.	Tabelle
VIF	Varianzinflationsfaktor
Δ dMI	Veränderung des de Martonne Index
Δ N	Veränderung Niederschlagssumme (mm)
Δ T	Temperaturveränderung (°C)
EPSG	European Petroleum Survey Group Geodesy

6.3 Abbildungsverzeichnis

- Abb. 1: Schema des Inventurrasters und der Datenerfassung an den Stichprobenpunkten der drei BWI. Quelle: Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV) 2011
- Abb. 2: Häufigkeiten der Baumarten in Deutschland. Stand BWI 3 (20011-2012). Die in dieser Studie verwendeten Hauptbaumarten sind in ihrer formellen Farbgebung dargestellt. Alle übrigen Bäume und Baumgruppen sind einheitlich hellgrün.
- Abb. 3: Verbreitungsgebiet der Gemeinen Fichte (*Picea abies*) zusammengestellt von den Mitgliedern des EUFORGEN-Netzwerks, basierend auf der Karte von H. Schmidt-Vogt in 1977 (Die Fichte, Verlag Paul Parey, Hamburg and Berlin, p.647). Quelle: EUFORGEN 2009, www.euforgen.org, (EPSG: 4326)..
- Abb. 4: Verbreitungsgebiet der Rot-Buche (*Fagus sylvatica*). Quelle: EUFORGEN 2009, www.euforgen.org, (EPSG: 4326)
- Abb. 5: Verbreitungsgebiet der Wald-Kiefer (*Pinus sylvestris*). Quelle: EUFORGEN 2009, www.euforgen.org, (EPSG: 4326).
- Abb. 6: Verbreitungsgebiet der Trauben-Eiche (*Quercus petraea*). Quelle: EUFORGEN 2009, www.euforgen.org, (EPSG: 4326).
- Abb. 7: Verbreitungsgebiet der Stiel-Eiche (*Quercus robur*). Quelle: EUFORGEN 2009, www.euforgen.org, (EPSG: 4326).
- Abb. 8: Verbreitungsgebiet der Weiß-Tanne (*Abies alba*). Quelle: EUFORGEN 2009, www.euforgen.org, (EPSG: 4326).
- Abb. 9: Zeitachse der Waldinventuren und Einteilung der Perioden P0, P1 und P2 für die Klimafaktoren und Zuwachsperioden.
- Abb. 10: Boxplots der jährlichen Durchmesserzuwächse. Vergleich der Zuwächse zwischen den Baumklassen 1 und 2 mit 3 und 4 der sechs Hauptbaumarten. BKL= Baumklasse nach Kraft (1884)
- Abb. 11: Regressionskurven des jährlichen Durchmesserzuwachses in Abhängigkeit des Baumalters für den Zeitraum von BWI 1 zu BWI 3. Die Regressionen wurden mit gam-Modellen berechnet. Die grauen Bereiche um die Regressionslinien sind die Konfidenzintervalle. n = die Anzahl der Bäume. Das Alter wurde bei 200 Jahren begrenzt.
- Abb. 12: Überprüfung der Normalverteilung durch Häufigkeitsverteilungen (links) und QQ-Plots (rechts). Die schwarzen Kurven in den Häufigkeitsverteilungen entsprechen den Normalverteilungskurven. Bei den QQ-Plots sind die schwarzen Punkte die Quantile, die roten Linien zeigen die Normalverteilungsgeraden. Px= Periode

-
- Abb. 13: Zusammenführung ('Überschneidung ') von Klima- und BWI-Daten am Beispiel der Niederschlagssumme. Über die Mittelpunkte des BWI-Traktrasters erfolgt die Überschneidung von Klima- und Traktraster. Dadurch wird jeder Traktnummer der Klimawert zugeordnet, der deckungsgleich mit der Mittelpunktkoordinate des Traktrasters ist. Über die Traktnummer können die Klimadaten mit BWI-Daten verknüpft werden.
- Abb. 14: Schema der HotSpot Analyse in ArcGis. Die Abbildung zeigt einen willkürlich gewählten Ausschnitt aus dem Traktraster der BWI. Jeder Punkt repräsentiert einen Baum. Für jeden Datenpunkt wird in einer festgelegten Entfernung die Ähnlichkeit eines Merkmals mit benachbarten Punkten verglichen. Ähneln sich die Werte, werden alle Punkte dieser Nachbarschaft als Cluster gekennzeichnet(rechts). Sind die Werte im Vergleich zur Umgebung hoch, liegt ein HighCluster vor, sind sie niedrig ein LowCluster. Die Stärke der Signifikanz eines Clusters wird durch G_i Bin Werte ausgedrückt. Diese Werte können Werte von ± 1 , ± 2 und ± 3 annehmen wobei positive Werte für HighCluster stehen und negative für Low Cluster. Ist die Variation der Werte in der festgelegten Umgebung sehr hoch, ist kein Cluster (nicht signifikant) vorhanden.
- Abb. 15: Übersichtskarten von Temperatur (A) und Niederschlag (D) für den Zeitraum P0 (1971 bis 1986) und den Änderungen von Temperatur (B u. C) und Niederschlagssumme (E u. F) jeweils zur Vorperiode (P0 zu P1 und P1 zu P2).
- Abb. 16: Übersichtskarten von de Martonne Index (A) und relativer Häufigkeit von Trockenmonaten(D) für den Zeitraum P0 (1971 bis 1986) und den Änderungen de Martonne Index (B u. C) und relativer Häufigkeit von Trockenmonaten(E u. F) jeweils zur Vorperiode (P0 zu P1 und P1 zu P2).
- Abb. 17: Boxplots der Klimafaktoren für die Trakte der Bundeswaldinventuren (Alte Bundesländer). P0=Zeitraum von 1971 bis 1985, P1=Zeitraum von 1989 bis 2000, P2=Zeitraum von 2001 bis 2011. - - - Grenze für geringes und hohes Trockenstressrisiko (dMI)
- Abb. 18: Dichteverteilung der Trakte in Abhängigkeit von Niederschlag und Temperatur. Die roten Flächen weisen auf eine große Dichte von Takten in dem Klimabereich hin, die über den Farbverlauf zu Grün hin abnimmt. Es handelt sich hierbei um Dichteverteilungen, die in Abhängigkeit der Gesamtzahl der Trakte einer Baumart berechnet wurden. Die grauen Punkte zeigen einzelne Traktpunkte. Die schwarzen Linien markieren die Mittelwerte für Niederschlagssumme und Temperatur in der Periode P0 (1971 bis 1985) und dienen als Orientierungshilfe, um Verschiebungen der Dichtebereiche zu erfassen. n= Anzahl der Trakte
- Abb. 19: Boxplot der jährlichen Durchmesserzuwächse der beiden Zuwachsperioden.

- Abb. 20: Jährlicher Durchmesserzuwachs in Abhängigkeit von Temperaturmittel und Niederschlagssumme der Vegetationsperiode (IV-IX) in P1 und P2. Der Farbgradient wird mit steigendem Zuwachs dunkler. Das rote Dreieck in den Diagrammen zeigt den Median von Niederschlagssumme und Temperatur.
- Abb. 21a: Jährlicher Durchmesserzuwachs in Abhängigkeit von der Relativen Häufigkeit von Trockenmonaten und Temperaturmittel bzw. Niederschlagssumme der Vegetationsperiode (IV-IX) für Gemeine Fichte, Rot-Buche und Wald-Kiefer.
- Abb. 21b: Jährlicher Durchmesserzuwachs (mm) in Abhängigkeit von der Relativen Häufigkeit von Trockenmonaten und Temperaturmittel bzw. Niederschlagssumme der Vegetationsperiode (IV-IX) für Trauben-Eiche, Stiel-Eiche und Weiß-Tanne.
- Abb. 22: Vergleich der Zuwächse bei sehr häufigen ($r_{HTM} > 40\%$), häufigen ($r_{HTM} : > 20\%$ bis 30%), mäßigen ($r_{HTM} : > 10\%$ bis 20%) und sehr seltenen ($r_{HTM} \leq 10\%$) Trockenereignissen mit dem mittleren Durchmesserzuwachs ($m_{DZGesamt}$) aller Standorte. Die Nulllinie markiert die mittleren Zuwächse aller Bäume. Negative Werte bedeuten einen geringeren relativen Zuwachs und positive Werte einen höheren relativen Zuwachs im Vergleich zum mittleren Zuwachs. Die Abweichungen sind in Prozent angegeben. Die Asterics (*) markieren die signifikanten Abweichungen (Wilcoxon-Test, $p = 0,05$).
- Abb. 23: Boxplot des jährlichen Durchmesserzuwachses der Hauptbaumarten in Abhängigkeit der Wasserspeicherkapazität (nutzbare Feldkapazität des effektiven Wurzelraumes) für häufige und mittlere Trockenhäufigkeit (r_{HTM}). Die Abbildung zeigt beide Zuwachsperioden P1 (links) und P2 (rechts). Ziffern (n) unter den Boxplots geben die Anzahl der jeweiligen Einzelbäume pro nFKWe-Klasse an. Die Buchstaben oberhalb des Boxplots zeigen die Resultate des Dunn-Post-Hoc Tests. Die Klassifizierung der nutzbaren Feldkapazität des effektiven Wurzelraumes erfolgte nach (Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden der Staatlichen Geologischen Dienste und der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe 2005).
- Abb. 24a: Ergebnisse der räumlichen Clusteranalyse von Gemeiner Fichte und Rot-Buch. Für die Durchmesserzuwächse P1 und P2 (A-E) sind die HighCluster in rot und die LowCluster in blau abgebildet. Für die Veränderung des Durchmesserzuwachses beider Zuwachsperioden (C u. F) sind HighCluster in grün und die LowCluster in violett dargestellt. Die Abstufungen der Farbintensität geben das 99%, 95% und 90% Konfidenzniveau wider.

-
- Abb. 24b: Ergebnisse der räumlichen Clusteranalyse von Wald-Kiefer und Weiß-Tanne. Für die Durchmesserzuwächse P1 und P2 (A-E) sind die HighCluster in rot und die LowCluster in blau abgebildet. Für die Veränderung des Durchmesserzuwachses beider Zuwachsperioden (C u. F) sind HighCluster in grün und die LowCluster in violett dargestellt. Die Abstufungen der Farbintensität geben das 99%, 95% und 90% Konfidenzniveau wider.
- Abb. 24c: Ergebnisse der räumlichen Clusteranalysen von Trauben-Eiche und Stiel-Eiche. Für die Durchmesserzuwächse P1 und P2 (A-E) sind die HighCluster in rot und die LowCluster in blau abgebildet. Für die Veränderung des Durchmesserzuwachses beider Zuwachsperioden (C u. F) sind HighCluster in grün und die LowCluster in violett dargestellt. Die Abstufungen der Farbintensität geben das 99%, 95% und 90% Konfidenzniveau wider.
- Abb. 25: Scatter-Plot der Verteilung der Cluster in Abhängigkeit von Temperatur und Niederschlag.
- Abb. 26a: Klimaabhängigen Zuwachskurven der High- und LowCluster. Die Berechnungen erfolgten mit Generalisierten Additiven Modellen (gam)
- Abb. 26b: Klimaabhängigen Zuwachskurven der High- und LowCluster. Die Berechnungen erfolgten mit Generalisierten Additiven Modellen (gam)

Abbildungen Diskussion

- Abb. D1: Niederschlagsveränderung für den Gesamtzeitraum aller drei Inventuren (1986 -2011) im Vergleich zu P0 (1971-1985)
- Abb. D2: . D2: Relative Häufigkeit der Trakte mit sehr geringer (nFKWe-Klasse =1) und geringer (nFKWe-Klasse 2) nutzbarer Feldkapazität des effektiven Wurzelraumes und mit hoher Häufigkeit von Trockenmonaten (rHTM). Die Definition für hohe rHTM ist baumartenspezifisch. Die Schwellenwerte stehen oberhalb der Barplots. nGes=Anzahl aller Trakte auf denen die jeweilige Baumart vorkommt. nTS=Anzahl der Trakte mit geringer nutzbarer Feldkapazität (nFKWe-Klassen 1 u. 2). Die Prozentangaben beziehen sich auf nGes .
- Abb. D3: Veränderung von Niederschlagssumme, dMI und relativer Häufigkeit von Trockenmonaten von P1 zu P2 in Norddeutschland. Die Abbildung verdeutlicht die Bedeutung saisonaler Effekte im Untersuchungszeitraum. Während Niederschlag und de Martonne Index feuchtere Bedingungen für das gesamte Gebiet anzeigen, zeigt die relative Häufigkeit von Trockenmonaten deutlich heterogene Entwicklung an. In einzelnen Regionen wurde es humider und in anderen arider.

Abb. D4: Bedeutung der Nachbarschaftsdistanz für die Clustergröße. In der Abbildung wird beispielhaft für Baden -Württemberg gezeigt, wie sich unterschiedliche Nachbarschaftsdistanzen der HotSpot-Clusteranalysen auf die Größe der Cluster auswirken können. Jeder Punkt symbolisiert einen Einzelbaum. ‚Distance‘ gibt jeweils die Umgebung an, in der die Einzelbäume in die Berechnungen einbezogen werden.

Abbildungen Anhang

- Abb. A1: Beispielhaft wird an zwei Fichtenstandorten die große Spannweite der jährlichen Durchmesserzuwächse auf Traktebene gezeigt. Die Tabellen geben jeweils die jährlich Durchmesserzuwächse eines Traktes (TNR) wieder. Auf beiden Trakten liegen eine homogene Durchmesser- und Altersstruktur vor. Die jährlichen Durchmesserzuwächse haben eine Spannweite von 5,2 bzw. 6,1 mm. Tnr= Nummer des Traktes nach BWL. aBHDZ= jährlicher Durchmesserzuwachs auf Brusthöhe. ALTER= Alter des Baumes, BHDStart= Brusthöhendurchmesser zu Beginn der Inventurperiode
- Abb. A2: Übersicht der Forstlichen Wuchsgebiete nach Gauer und Kroiher (2012)
- Abb. A3: Übersichtskarte der nutzbaren Feldkapazität des effektiven Wurzelraumes (nFKWe) nach (Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden der Staatlichen Geologischen Dienste und der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe 2005). Quelle <https://bodenatlas.de>; BGR.
- Abb. A4: Übersichtskarte der aggregierten Bodengruppen auf Basis der Bodenübersichtskarte BÜK 5000.
- Abb. A5: Häufigkeiten der Bäume in den Klassen der nutzbaren Feldkapazität des effektiven Wurzelraumes nach Baumarten
- Abb. A6a: Räumliche Verteilung der Trakte von Fichte und Rot-Buche mit sehr geringer (nFKWe-Klasse 1) und geringer (nFKWe-Klasse 2) nFKWe und häufiger (rot/orange) und mäßiger bis geringer (blau) Häufigkeit von Trockenmonaten (rHTM). Trakte mit nFKWe-Klasse >2 sind grau dargestellt, um das Gesamtvorkommen einer Art besser abschätzen zu können. Abgebildet sind die beiden Inventurperioden P1 und P2 sowie der Zeitraum 2011 bis nach BWI3 (jeweils untere Karte). Um die Entwicklungen der jüngsten Dekade zu verdeutlichen.
- Abb. A6b: Räumliche Verteilung der Trakte von Trauben-Eiche und Stiel-Eiche mit sehr geringer (nFKWe-Klasse 1) und geringer (nFKWe-Klasse 2) nFKWe und häufiger (rot/orange) und mäßiger bis geringer (blau) Häufigkeit von Trockenmonaten (rHTM). Trakte mit nFKWe-Klasse >2 sind grau dargestellt, um das Gesamtvorkommen einer Art besser abschätzen zu können. Abgebildet sind die beiden Inventurperioden P1 und P2 sowie der Zeitraum 2011 bis nach BWI3 (jeweils untere Karte). Um die Entwicklungen der jüngsten Dekade zu verdeutlichen.

Abb. A6c: Räumliche Verteilung der Trakte von Wald-Kiefer und Weiß-Tanne mit sehr geringer (nFKWe-Klasse 1) und geringer (nFKWe-Klasse 2) nFKWe und häufiger (rot/orange) und mäßiger bis geringer (blau) Häufigkeit von Trockenmonaten (rHTM). Trakte mit nFKWe-Klasse >2 sind grau dargestellt, um das Gesamtvorkommen einer Art besser abschätzen zu können. Abgebildet sind die beiden Inventurperioden P1 und P2 sowie der Zeitraum 2011 bis nach BWI3 (jeweils untere Karte). Um die Entwicklungen der jüngsten Dekade zu verdeutlichen.

Abb. A7: Gesamtübersicht der Ergebnisse der Multivariaten Regressionen: Das Balkendiagramm zeigt die relativen Häufigkeiten jeder erklärenden Variablen mit der sie in allen berechneten Modellen als relevante Variable vorkam. Eine Variable konnte einen positiven Effekt haben, das bedeutet mit zunehmenden Wert nahm der Zuwachs zu oder negativen Effekt. In diesem Fall nahm mit sinkendem Wert der erklärenden Variablen der Zuwachs zu. Positive Effekte sind durch orange Balken gekennzeichnet und negative Effekte durch blaue Balken. Alter=Baumalter, BHD_st=Brusthöhendurchmesser zu Beginn der Inventurperiode, dTemperatur= Temperaturveränderung von einer zur folgenden Periode, dNiederschlag= Veränderung der Niederschlagssumme von einer zur folgenden Periode, rHTM= relative Häufigkeit von Trockenmonaten. Boden_NV=Boden-Nährstoffversorgungbezogen auf die Bodengruppen.

6.4 Tabellenverzeichnis

- Tab. 1: Ariditätsstufen des de Martonne Index nach Klapp (2000)
- Tab. 2: Anzahl der in den Inventuren erfassten Hauptwirtschaftsbaumarten, sowie die Anzahl der für die Berechnungen verwendeten Bäume nach der Datenbereinigung. Code nach BWI ist der in den Waldinventuren verwendete Nummerische Code für die Baumarten.
- Tab. 3: Ergebnisse der Wilcoxon-Tests zur Überprüfung der unterschiedlichen Durchmesserzuwächse in den Perioden (Signifikanzniveau $p=0,05$). jDZ_P1; jDZ_P2 =mittlerer jährlicher Durchmesserzuwachs der Periode 1 bzw. Periode 2.
- Tab. 4: Einteilung der Kategorien für die trockenheitsabhängigen Zuwachsvergleiche
- Tab. 5: Klasseneinteilung der nutzbaren Feldkapazität des effektiven Wurzelraumes nach der Bodenkundlichen Kartieranleitung (Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden der Staatlichen Geologischen Dienste und der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe 2005)
- Tab. 6: Klassifizierungsmatrix der HotSpot-Analyse
- Tab. 7: Tab. 7: Aggregierte Bodenklassen aus 19 Bodentypen der Bodenübersichtsklasse BÜK 5000. Bk_id = Identifikationsnummer der Bodenklasse, buek_ID= Identifikationsnummer nach BÜK 5000.
- Tab. 8: Übersicht der Monatsmitteltemperaturen und -änderungen (IV-IX) der Inventur-Trakte für die einzelnen Baumarten während der drei Inventuren. Min.= Minimum, 1stQu.=25% Quantil, MW=Mittelwert, 3rdQu.=75% Quantil, Max.= Maximum, SD=Standardabweichung, Änderung MW= Änderung des Mittelwertes zur Vorperiode, P0=1971-1985, P1=1986-2001, P3=2002-2011.
- Tab. 9: Übersicht der Niederschlagssummen und -änderungen der Inventur-Trakte für die einzelnen Baumarten in den drei Inventuren. Min.= Minimum, 1stQu.=25% Quantil, MW=Mittelwert, 3rdQu.=75% Quantil, Max.= Maximum, SD=Standardabweichung, Änderung MW= Änderung des Mittelwertes zur Vorperiode, P0=1971-1985, P1=1986-2001, P3=2002-2011.
- Tab. 10: Übersicht des de Martonne Index und -änderungen der Inventur-Trakte für die einzelnen Baumarten in den drei Inventuren. Min.= Minimum, 1stQu.=25% Quantil, MW=Mittelwert, 3rdQu.=75% Quantil, Max.= Maximum, SD=Standardabweichung, Änderung MW= Änderung des Mittelwertes zur Vorperiode, P0=1971-1985, P1=1986-2001, P3=2002-2011.

-
- Tab. 11: Übersicht der relativen Häufigkeit von Trockenmonaten der Inventur-Trakte für die einzelnen Baumarten in den drei Inventuren. Min.= Minimum, 1stQu.=25% Quantil, MW=Mittelwert, 3rdQu.=75% Quantil, Max.= Maximum, SD=Standardabweichung, Änderung MW= Änderung des Mittelwertes zur Vorperiode, P0=1971-1985, P1=1989-2001, P2=2002-2011.
- Tab. 12: Jährliche Durchmesserzuwächse der Hauptwirtschaftsbaumarten mit ihren statistischen Kennzahlen. MW= Mittelwert, SD=Standardabweichung, Var=Varianz .
- Tab. 13: Ergebnisse der HotSpot Analyse mit ArcGis.
- Tab. 14: Übersicht der „Besten“ Modelle der Multifaktoriellen Regression. Die Asterics zeigen die Signifikanz der Koeffizienten: *.p = $\leq 0,10$; **.p= $\leq 0,05$; ***. p= $\leq 0,01$. Grün= positiver Effekt, Rot=negativer Effekt, Grau= keine Richtung (kategorische Variable). AdjR2=adjustiertes Bestimmtheitsmaß, AICc= Aikake's Informationskriterium, JB=Jarque-Bera-Statistik für Normalverteilte Residuen ($p > 0,1$), K(BP)= Koenkers t-verteilte Breusch-Pagan-Statistik zum Test der Konsistenz der Beziehung zur abhängigen Variable im geographischem Raum und im Datenbereich ($p > 0,05$), VIF=Varianz Inflation Faktor ($< 7,5$) , SA= räumliche Autokorrelation ($p > 0,1$). ΔN = Änderung des Niederschlags von einer Periode zur Folgenden. ΔT = Änderung der Temperatur von einer Periode zur Folgenden, rHTM= relative Häufigkeit trockener Monate.

Tabellen Diskussion

- Tab. D1: Häufigkeiten der Einzelbäume nach Klassen für die relative Häufigkeit von Trockenmonaten.

Tabellen Anhang

- Tab. A1: Übersicht der Signifikanzniveaus ($p < 0,05$) der Clusteranalysen. Blau hinterlegte Felde: $p \leq 0,05$; rot hinterlegte Felder: $p > 0,05$. Hi= HighCluster, Lo=LowCluster, dMI=de Martonne Index, rHTM relative Häufigkeit trockener Monate.

7 ANHANG

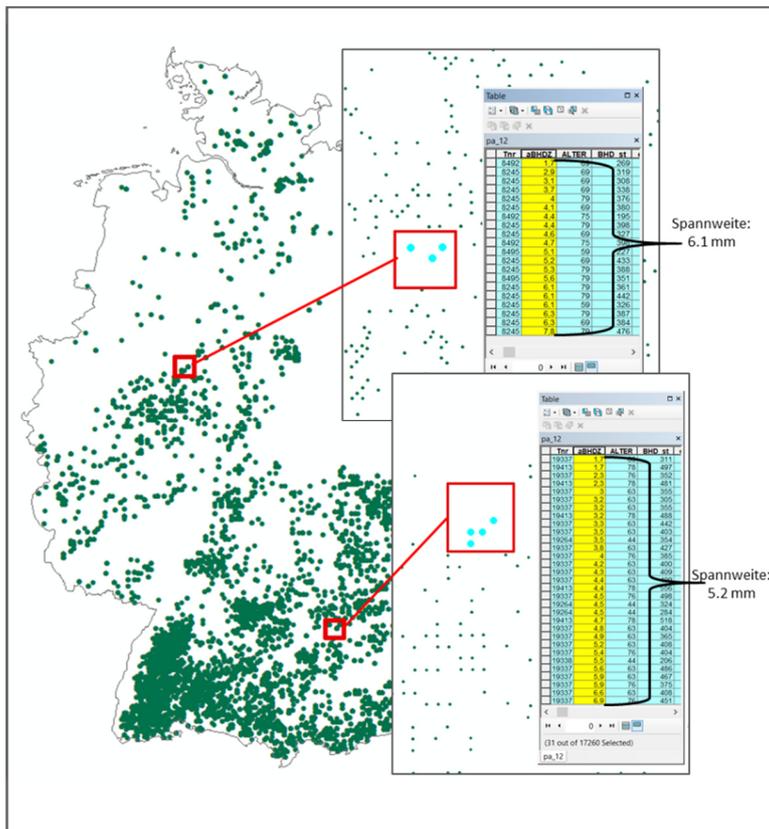


Abb. A1: Beispielhaft wird an zwei Fichtenstandorten die große Spannweite der jährlichen Durchmesserzuwächse auf Traktebene gezeigt. Die Tabellen geben jeweils die jährlichen Durchmesserzuwächse eines Traktes (TNR) wieder. Auf beiden Trakten liegen eine homogene Durchmesser- und Altersstruktur vor. Die jährlichen Durchmesserzuwächse haben eine Spannweite von 5,2 bzw. 6,1 mm. Tnr= Nummer des Traktes nach BWI. aBHDZ= jährlicher Durchmesserzuwachs auf Brusthöhe. ALTER= Alter des Baumes, BHD_{start}= Brusthöhendurchmesser zu Beginn der Inventurperiode.



Abb. A2: Übersicht der Forstlichen Wuchsgebiete nach Gauer und Kroiher (2012)

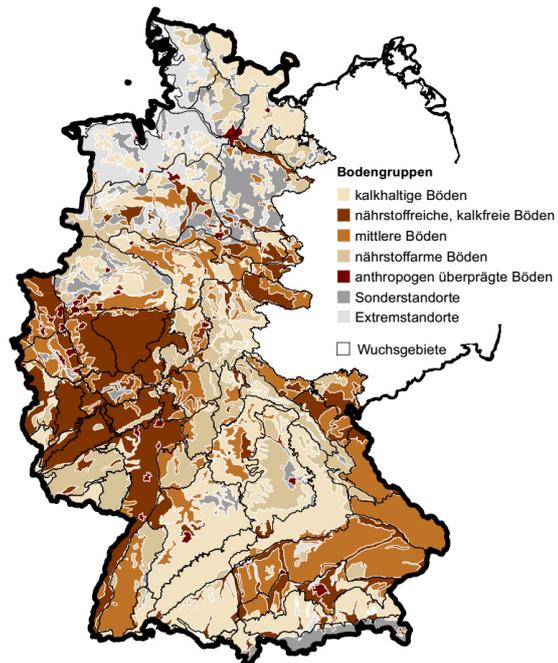
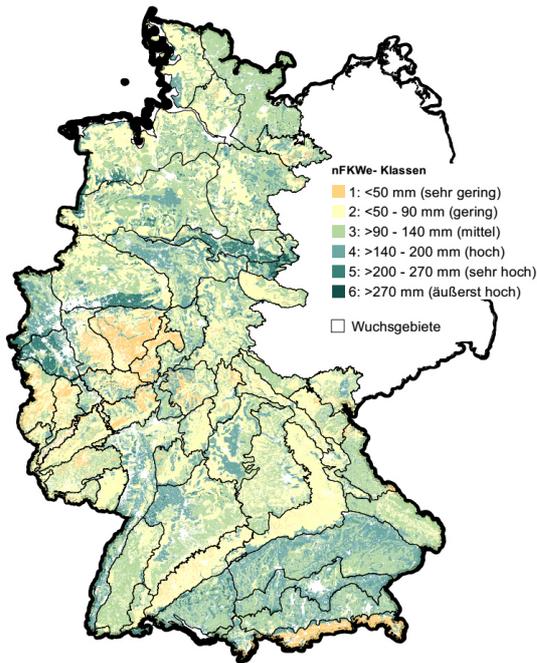


Abb. A3: Übersichtskarte der nutzbaren Feldkapazität des effektiven Wurzelraumes (nFKWe) nach (Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden der Staatlichen Geologischen Dienste und der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe 2005). Quelle <https://bodenatlas.de>; BGR.

Abb. A4: Übersichtskarte der aggregierten Bodengruppen auf Basis der Bodenübersichtskarte BÜK 5000.

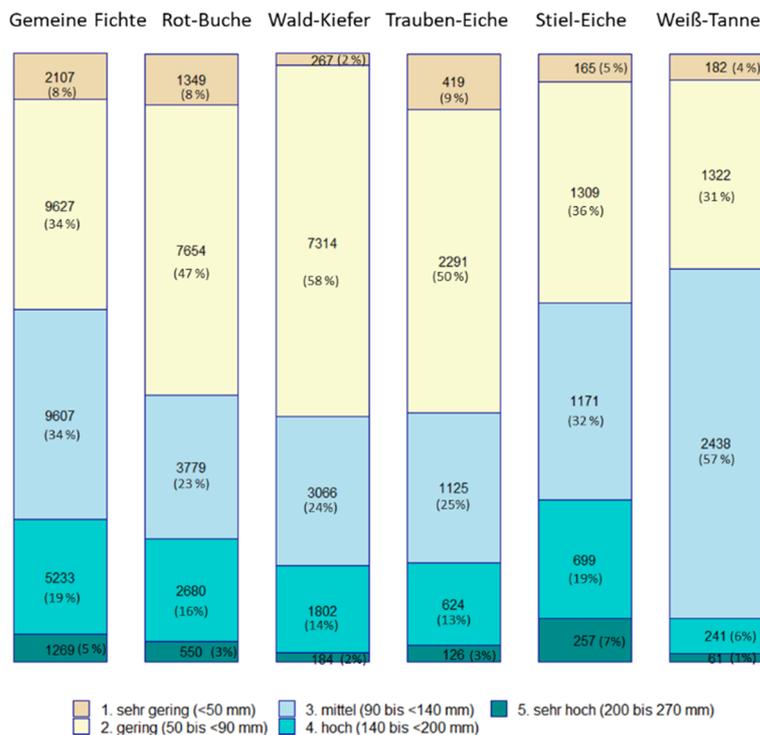


Abb. A5: Häufigkeiten der Bäume in den Klassen der nutzbaren Feldkapazität des effektiven Wurzelraumes nach Baumarten

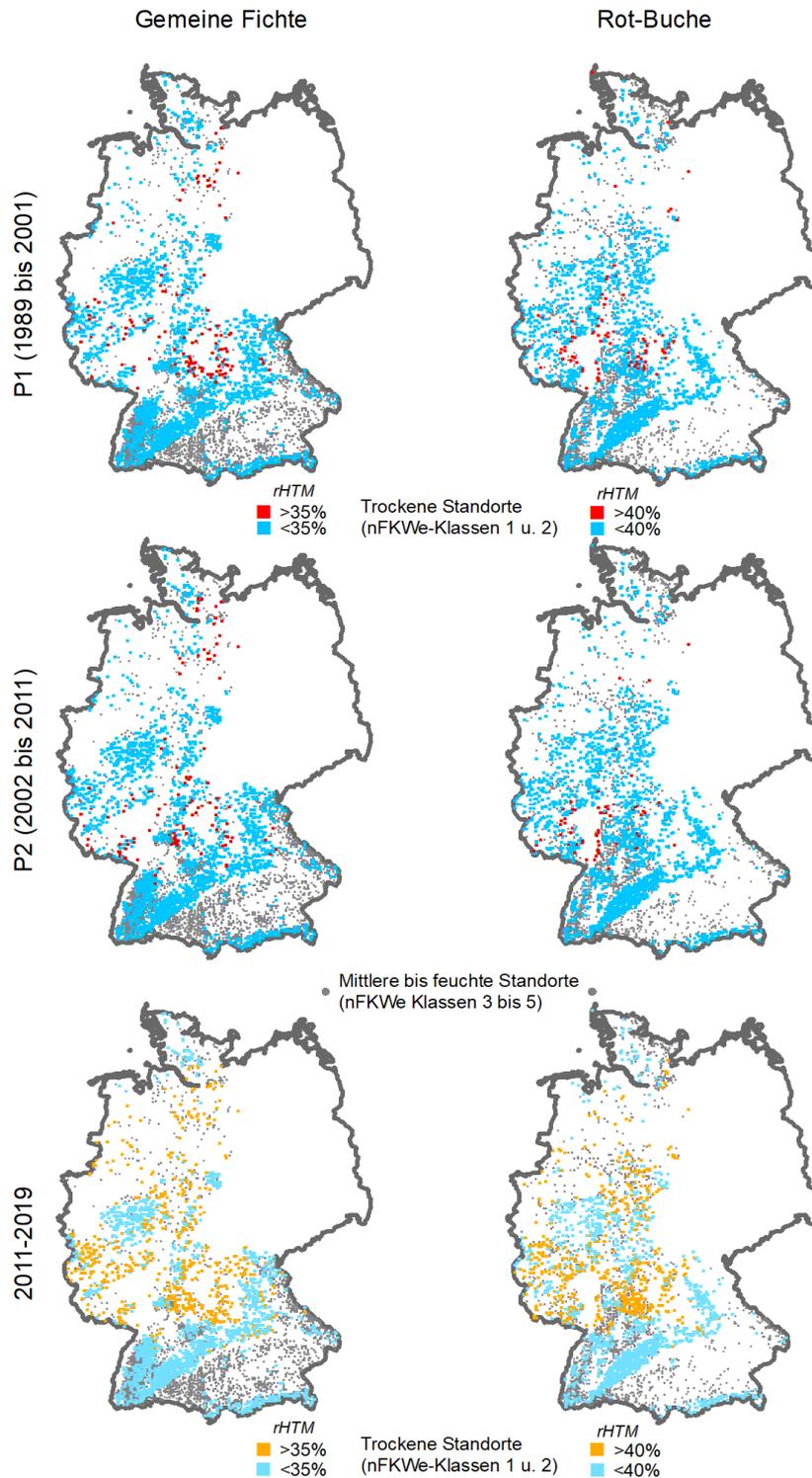


Abb. A6a: Räumliche Verteilung der Trakte von Fichte und Rot-Buche mit sehr geringer (nFKWe-Klasse 1) und geringer (nFKWe-Klasse 2) nFKWe und häufiger (rot/orange) und mäßiger bis geringer (blau) Häufigkeit von Trockenmonaten (rHTM). Trakte mit nFKWe-Klasse >2 sind grau dargestellt, um das Gesamtvorkommen einer Art besser abschätzen zu können. Abgebildet sind die beiden Inventurperioden P1 und P2 sowie der Zeitraum 2011 bis nach BW13 (jeweils untere Karte). Um die Entwicklungen der jüngsten Dekade zu verdeutlichen.

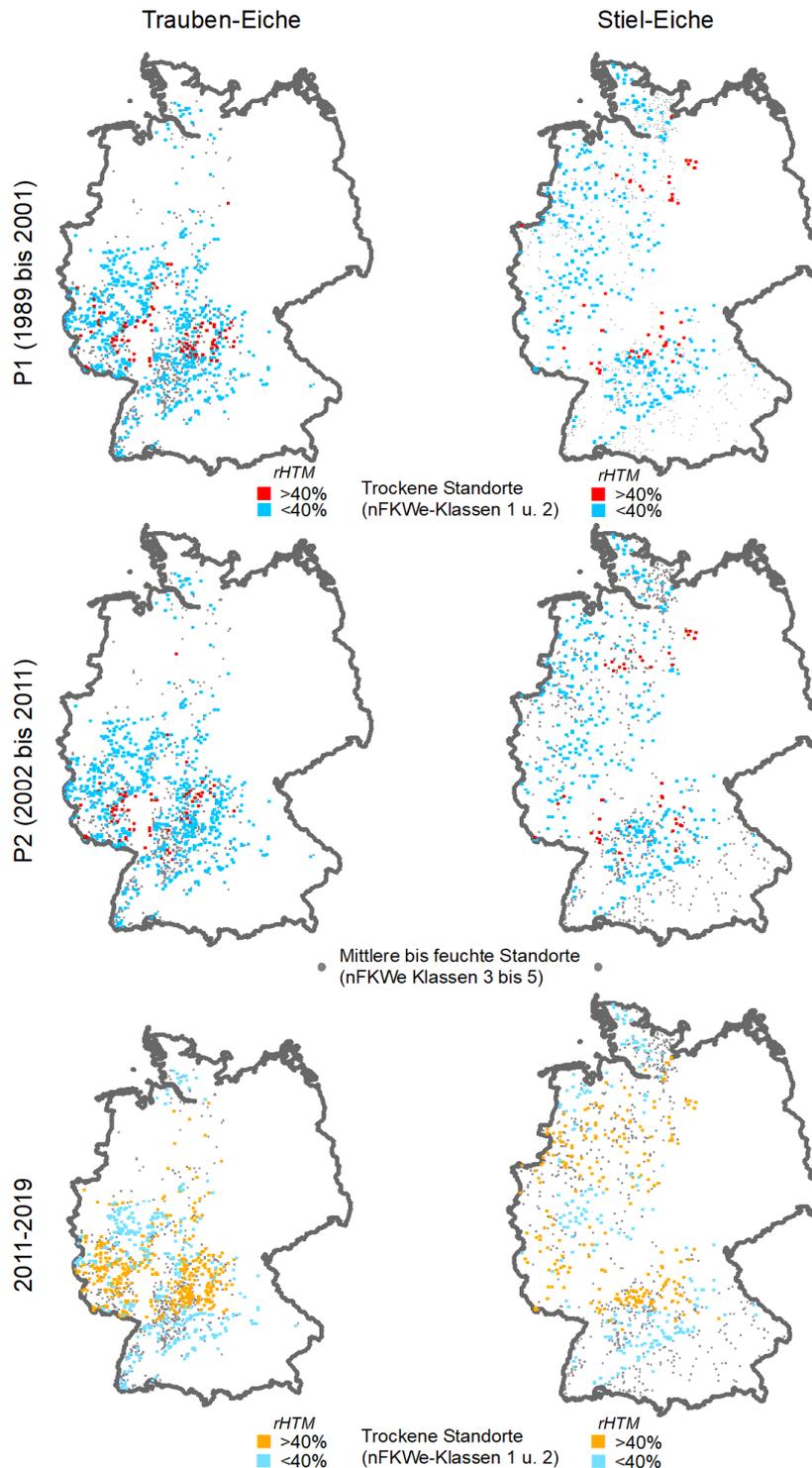


Abb. A6b: Räumliche Verteilung der Trakte von Trauben-Eiche und Stiel-Eiche mit sehr geringer (nFKWe-Klasse 1) und geringer (nFKWe-Klasse 2) nFKWe und häufiger (rot/orange) und mäßiger bis geringer (blau) Häufigkeit von Trockenmonaten (rHTM). Trakte mit nFKWe-Klasse >2 sind grau dargestellt, um das Gesamtvorkommen einer Art besser abschätzen zu können. Abgebildet sind die beiden Inventurperioden P1 und P2 sowie der Zeitraum 2011 bis nach BWI3 (jeweils untere Karte). Um die Entwicklungen der jüngsten Dekade zu verdeutlichen.

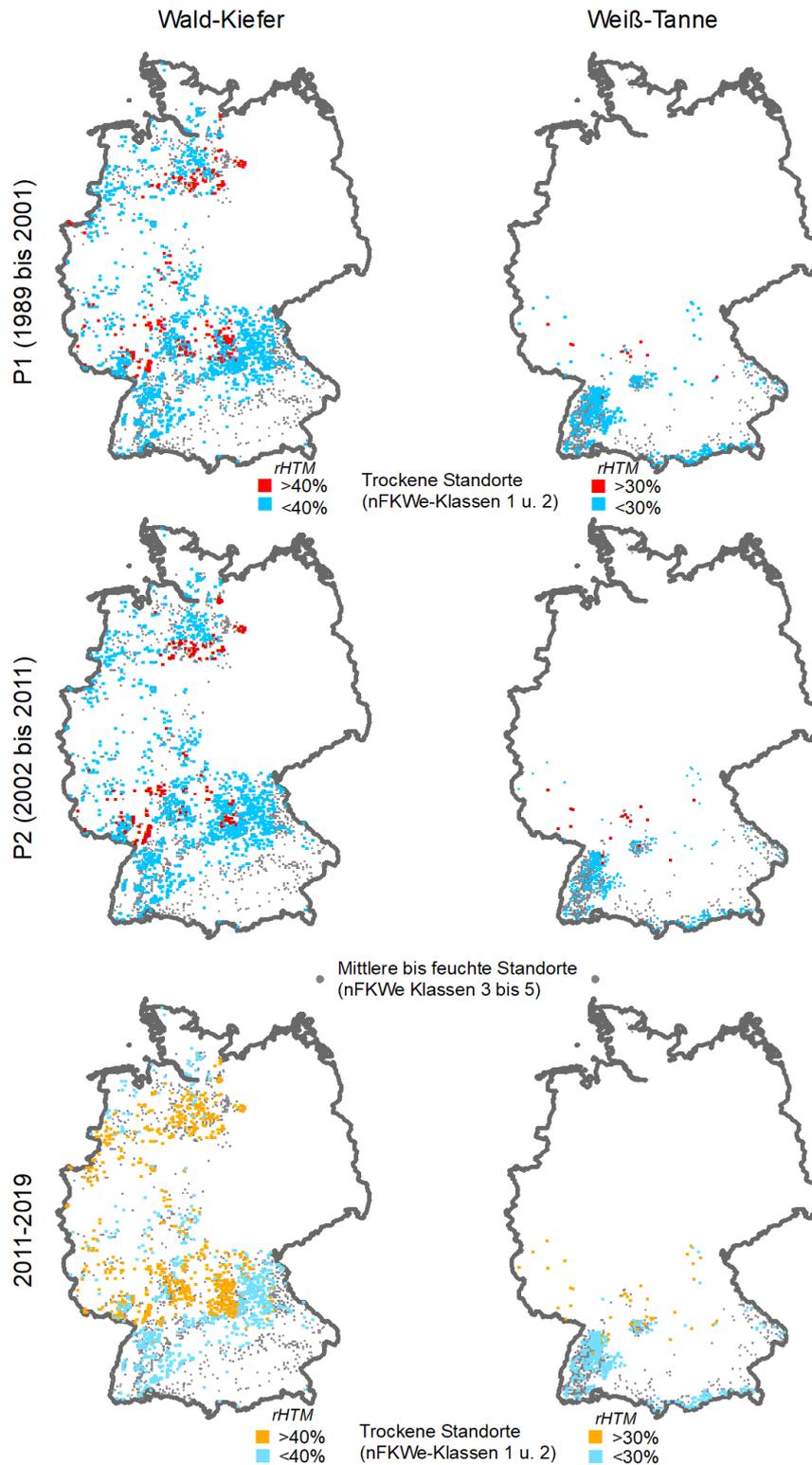


Abb. A6c: Räumliche Verteilung der Trakte von Wald-Kiefer und Weiß-Tanne mit sehr geringer (nFKWe-Klasse 1) und geringer (nFKWe-Klasse 2) nFKWe und häufiger (rot/orange) und mäßiger bis geringer (blau) Häufigkeit von Trockenmonaten (rHTM). Trakte mit nFKWe-Klasse >2 sind grau dargestellt, um das Gesamtvorkommen einer Art besser abschätzen zu können. Abgebildet sind die beiden Inventurperioden P1 und P2 sowie der Zeitraum 2011 bis nach BW13 (jeweils untere Karte). Um die Entwicklungen der jüngsten Dekade zu verdeutlichen.

Tab. A1: Übersicht der Signifikanzniveaus ($p < 0,05$) der Clusteranalysen. Blau hinterlegte Felde: $p \leq 0,05$; rot hinterlegte Felder: $p > 0,05$. Hi= HighCluster, Lo=LowCluster, dMI=de Martonne Index, rHtM relative Häufigkeit trockener Monate.

Baumart	Cluster	Periode	Temperatur	Niederschlag	dMI	rHtM	dT	dP
Picea abies	Hi	1	0.0001	7.07E-11	7.57E-12	3.69E-17	0.0010	5.28E-09
	Hi	2	4.11E-06	6.17E-12	3.68E-12	3.85E-13	0.0001	1.83E-11
	Lo	1	0.0001	1.34E-09	7.42E-08	6.15E-07	0.0426	4.30E-16
	Lo	2	1.39E-05	0.0041	0.0079	0.0004	0.1660	1.31E-14
Fagus sylvatica	Hi	1	0.6032	0.1710	0.9634	0.0010	0.0150	0.0340
	Hi	2	0.0065	0.0005	3.34E-06	7.98E-06	0.0043	1.79E-08
	L	1	6.27E-12	5.44E-18	1.11E-19	1.96E-08	0.0460	6.84E-08
	L	2	3.33E-10	4.73E-08	2.12E-09	1.34E-06	4.32E-06	0.3250
Pinus sylvestris	Hi	1	0.1890	0.8082	0.9874	0.5958	0.0042	0.0136
	Hi	2	0.0011	0.6828	0.2560	0.1663	0.2115	0.0001
	Lo	1	0.3153	0.0010	0.0040	0.0403	0.0090	0.0544
	Lo	2	0.0830	0.0002	0.0006	0.0046	0.5887	0.0920
Quercus petraea	Hi	1	0.4093	0.4830	0.6067	0.1433	0.1714	0.6529
	Hi	2	0.0072	0.7565	0.3714	0.5688	0.6708	0.0141
	Lo	1	0.0040	0.5594	0.2751	0.1443	0.5013	0.0041
	Lo	2	0.0001	0.0312	0.0181	0.0063	0.0479	0.3577
Qercus robur	Hi	1	0.1825	0.1321	0.2870	0.2803	0.1544	0.6187
	Hi	2	0.1508	0.5269	0.4187	0.0874	0.3633	0.0632
	Lo	1	0.0012	0.0892	0.0303	0.0339	0.6172	0.2922
	Lo	2	0.2742	0.0654	0.1190	0.6183	0.0405	0.0998
Abies alba	Hi	1	0.0001	0.8929	0.4023	0.5604	0.0129	0.0410
	Hi	2	0.1725	0.8405	0.9307	0.1264	0.7958	0.0470
	Lo	1	1.81E-07	5.69E-07	2.59E-07	1.01E-07	0.0435	0.0005
	Lo	2	0.7169	9.84E-06	1.05E-06	3.85E-07	0.0895	0.6734

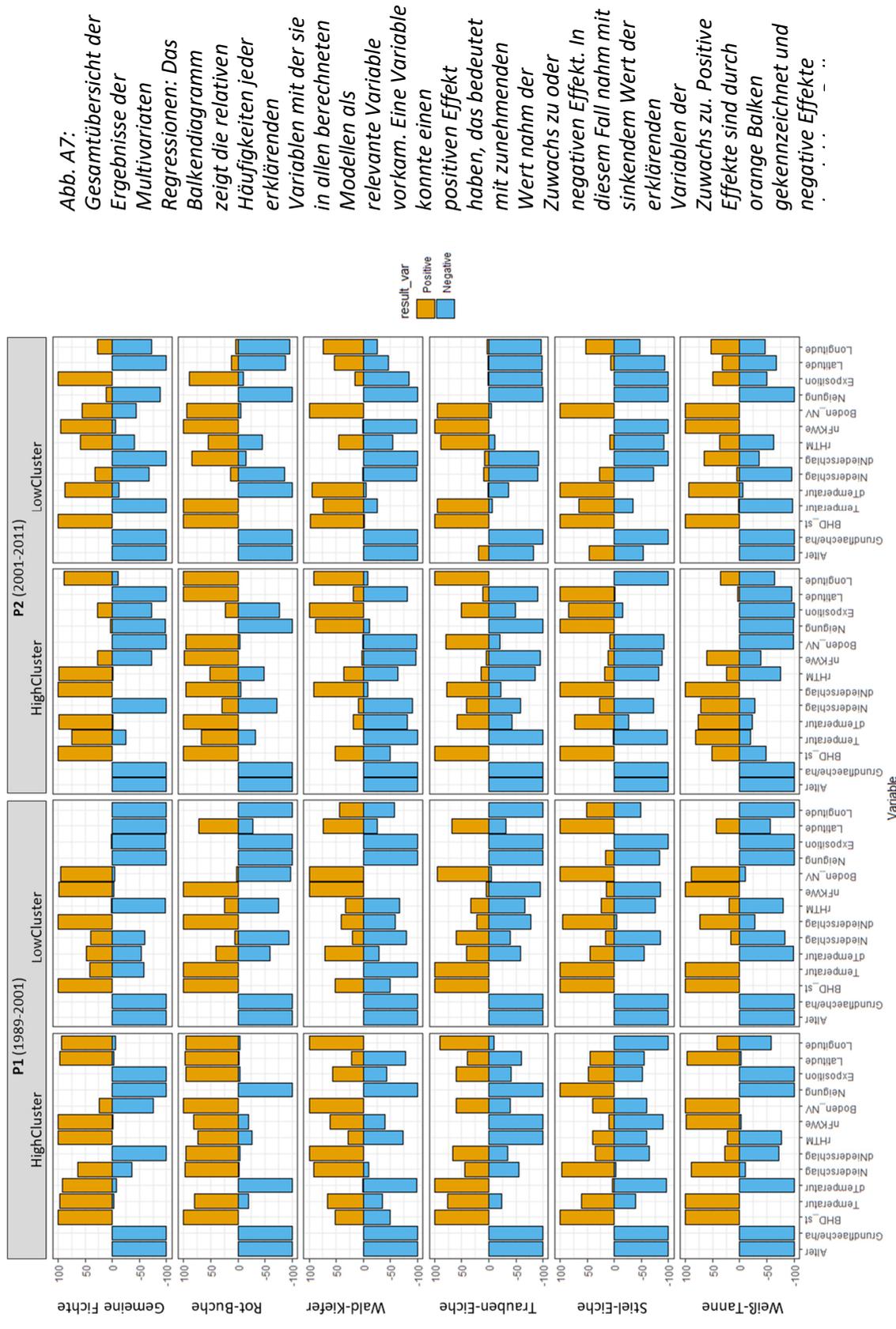


Abb. A7:
 Gesamtübersicht der Ergebnisse der Multivariaten Regressionen: Das Balkendiagramm zeigt die relativen Häufigkeiten jeder erklärenden Variablen mit der sie in allen berechneten Modellen als relevante Variable vorkam. Eine Variable konnte einen positiven Effekt haben, das bedeutet mit zunehmenden Wert nahm der Zuwachs zu oder negativen Effekt. In diesem Fall nahm mit sinkendem Wert der erklärenden Variablen der Zuwachs zu. Positive Effekte sind durch orange Balken gekennzeichnet und negative Effekte ..



Lebenslauf

PERSÖNLICHE DATEN

Name: Manuel Volker Punzet

Geburtsdatum: 20.07.1974

Geburtsort: Volkmarsen, Deutschland

BERUFLICHE PRAXIS

- | | |
|-----------------|---|
| seit 10/2019 | Koordinator Umweltplanung bei aedes infrastructure services GmbH, Esens |
| 01/2020-03/2020 | Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Hochschule für angewandte Wissenschaft und Kunst (HAWK), Göttingen, Fakultät R |
| seit 03/ 2018 | Lehrbeauftragter an der Hochschule für angewandte Wissenschaft und Kunst (HAWK), Göttingen, Fakultät für Ressourcenmanagement |
| 04/2014-03/2019 | Wissenschaftlicher Mitarbeiter und Lehrkraft für besondere Aufgaben an der Universität Göttingen, Abteilung Waldbau und Waldökologie der gemäßigten Zonen |
| 06/2012-03/2014 | Dipl. Biologe bei dem Ingenieurbüro WAGU GmbH, Kassel |
| 09/2010-08/2012 | Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Universität Göttingen, Abteilung Waldbau und Waldökologie der gemäßigten Zonen |
| 10/2009-08/2010 | Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Universität Kassel, Center for Environmental Systems Research. Projekt: Water Scenarios for Europe and for Neighbouring States (SCENES) |
| 09/2008-09/2009 | Wissenschaftliche Hilfskraft an der Universität Kassel, Center for Environmental Systems Research. Projekt: Water and Global Change (WatCH) |

AKADEMISCHE AUSBILDUNG

- | | |
|-----------------|--|
| seit 02/2015 | Promotion an der Universität Abteilung Waldbau und Waldökologie der gemäßigten Zonen |
| 10/2001-01/2008 | Studium der Biologie an der Universität Kassel, Schwerpunkte: Limnologie, Ökologie, Mikrobiologie, Botanik. |
| 01.2008 | Diplom-Biologe, Gesamtnote: »gut«Thema der Diplomarbeit: „Untersuchungen zur Auswirkung von Retentionsbodenfiltern auf die Wassergüte dreier Mittelgebirgsbäche anhand von Makrozoobenthos- Organismen.“ |
| 08/1998-06/2001 | Hessen-Kolleg Kassel, Abschluss: Allgemeine Hochschulreife |

VERÖFFENTLICHUNGEN

Punzet, Manuel; Voß, Frank; Voß, Anja; Kynast, Ellen & Bärlund, Ilona (2012). Global Approach to Assess the Potential Impact of Climate Change on Stream Water Temperatures and Related In-Stream First-Order Decay Rates. *Journal of Hydrometeorology*, 13(3), 1052-1065.

Voss, Anja; Bärlund, Ilona; **Punzet, Manuel**; Williams, Richard; Kynast, Ellen; Malve, Olli; Voss, Frank (2012). Effect of changing anthropogenic and climate conditions on BOD loading and in-stream water quality in Europe. In: Bogardi, Janos J.; Leentvaar, Jan; Nachtnebel, Hans-Peter, (eds.) *River basins and change*. Bonn, GWSP International Project Office, 116-121.

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre, dass ich die Dissertation mit dem Titel:

UNTERSUCHUNGEN ZUM EINFLUSS DES KLIMAS AUF DAS WACHSTUM DER
HAUPTBAUMARTEN IN DEUTSCHLAND

selbstständig und unter der Anleitung und Betreuung durch Prof. Dr. Achim Dohrenbusch ohne unerlaubte Hilfe angefertigt habe und sie nicht bereits in einem anderen Prüfungsverfahren vorgelegt wurde.

Ich habe die Dissertation in dieser oder ähnlicher Form in keinem anderen Prüfungsverfahren als Prüfungsleistung vorgelegt und habe mich demnach noch keiner Promotionsprüfung unterzogen und den angestrebten Doktorgrad noch nicht erworben.

Göttingen, den 24.01.2020

Manuel Punzet