

Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt
Grätzelstraße 2, 37079 Göttingen



**Nordwestdeutsche
Forstliche Versuchsanstalt**

Projektträger

Fachzentrum Klimawandel Hessen
Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG)
Rheingaustraße 186, 65203 Wiesbaden

Auftragnehmer

Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt
Grätzelstraße 2, 37079 Göttingen

Projekttitel

Baumvitalität im Klimawandel auf standörtlicher Grundlage in Hessen.
Resilienzeigenschaften der Hauptbaumarten Buche, Eiche, Fichte und Kiefer in
Hessen infolge klimatischer Änderungen.
Endbericht

Projektbeteiligte

Prof. Johannes Eichhorn (Projektleitung)
Dr. Uwe Paar
Dr. Caroline Klinck (Projektbearbeitung)

Projektlaufzeit

15.08.2017 – 01.03.2021

Zusammenfassung

Der Klimawandel bedeutet für den Wald in Hessen eine grundlegende Veränderung der ökologischen Rahmenbedingungen sowie von Risiken für die Waldentwicklung. Wie keine andere Lebensform sind Bäume und Wälder infolge ihrer Standortsgebundenheit und ihrer Langlebigkeit mit dem Klima verbunden.

Wälder erfüllen eine Vielzahl von Funktionen, die sowohl für die Gesellschaft als auch die Bewahrung der biologischen Vielfalt essentiell sind. Darum sind die Wälder Hessens in der Vielfalt ihrer Funktionen langfristig zu sichern. Um im Klimawandel diese Funktionen erhalten zu können, ist ein erweitertes Verständnis der Auswirkungen des Klimawandels notwendig.

Die Witterung der vergangenen 3 Jahre 2018, 2019 und 2020 rückte Auswirkungen von Stürmen, Trockenheit und Hitze auf die Wälder eindrücklich in den Fokus der öffentlichen Wahrnehmung. Das hier vorgestellte Projekt untersuchte auf Grundlage der umfangreichen Datensätze der Waldzustandserhebung und der beiden bisher vorliegenden Bodenzustandserhebungen Resilienzeigenschaften der Hauptbaumarten Buche, Eiche, Fichte und Kiefer in Hessen mit Blick auf klimatische Änderungen. Bei der Projektbearbeitung wurde zunächst nach zeitlichen und räumlichen Muster relevanter Vitalitätskenngrößen gesucht. Danach erfolgte mit sowohl einfachen als auch komplexeren statistischen Methoden eine Mustererklärung durch die Betrachtung von Wechselbeziehungen zwischen Standort und Baum. In die Standortskomponente flossen Informationen zur Lage, zum Boden, zum Klima und zum umgebenden Bestand ein.

Bei den untersuchten Vitalitätskenngrößen sind zeitliche und räumliche Muster erkennbar. Die Muster folgen zeitlich in der Regel Witterungsereignissen. Trends dagegen können auf Klimaveränderungen und baumphysiologische Gesetzmäßigkeiten, aber auch auf veränderte Stoffeinträge zurückzuführen sein. Starke Witterungssignale können über alle Baumarten hinweg Reaktionen auslösen. Die Reaktionsstärke dagegen ist baumartenspezifisch.

Die Umwelteinflüsse im Auswertungszeitraum von Anfang der 80er Jahre bis 2019 waren einem starken Wandel unterzogen. Prägten anfangs noch die Auswirkungen von säurelastigen Depositionen mit Vergilbungserscheinungen und teilweise auch erhöhten Kronenverlichtungen den Vitalitätszustand der Wälder, sind es inzwischen insbesondere die Auswirkungen des Klimawandels, die den Bäumen zu schaffen machen. Die Stressoren sind vielfältiger und reichen von Trockenstress, verlängerten Vegetationszeiten, wärmeren und teilweise frostfreien Wintern über häufigere Insektenkalamitäten wie z.B. beim Borkenkäfer und Eichenprozessionsspinner zu dem verstärkten Auftreten von Pilzschäden (z.B. Kiefertriebsterben, Rußrindenkrankheit beim Ahorn, Wurzelschwamm) sowie anderen Forstschädlingen (z.B. Mistelbefall an Kiefer). Zugleich erfolgt eine Veränderung von Standorten durch dauerhaft erhöhte Einträge von Stickstoff, veränderten Kohlenstoffhaushalt und weiterer Versauerung nährstoffarmer Böden. Die Folge sind höhere Kronenverlichtungen und Absterbe- und Ausfallraten.

Das Jahr 2018 hatte durch seine extreme warm-trockene Witterung und die nachher folgende Trockenheit einen Effekt auf die Vitalität der Hauptbaumarten, der in dieser Deutlichkeit im gesamten Erhebungszeitraum der WZE noch nie so sichtbar wurde. Nicht nur die Kronenverlichtungswerte, sondern auch die Absterberaten stiegen vor allem bei Fichte, aber auch Buche deutlich an. Aus den Datenanalysen wurde klar, dass die Reaktion auf die extreme Trockenheit auch weiterhin anhalten wird, da sich Absterbeprozesse vor allem bei Buche und Eiche, aber auch bei Kiefer über mehrere Jahre hinziehen können. In diesem Fall geht dem Absterben eine sich sukzessive erhöhende Verlichtung der Krone voraus. In Fällen, in denen Bäume abgestorben sind, konnte kein allgemeingültiger witterungsbasierter Grenzwert abgeleitet werden, der einen Kipppunkt markiert. Das Absterbe geschehen erfolgte entweder wie für Buche oder Eiche sehr vereinzelt und ist damit auf die Schwäche

einzelner Individuen zurückzuführen, oder wie z. B. wie bei Fichte trupp- bis bestandesweise aufgrund des massenhaften Auftretens von Schädlingen. Die Ausprägung unterscheidet sich regional sehr stark. Sie ist besonders stark beim Aufeinandertreffen ungünstiger Faktoren wie der Abfolge von Stressoren (Sturm, Trockenheit, Borkenkäfer). Beispiel sind in Regionen mit überwiegender Fichtenbestockung überdurchschnittlich lange, warme und trockene Sommer nach Winterstürmen, was in der Summe optimale Entwicklungsmöglichkeiten für den Borkenkäfer darstellt.

Als sehr aussagekräftiger Klimaindikator hat sich die Klimatische Wasserbilanz als Differenz aus Niederschlag und potentieller Referenzverdunstung erwiesen. Bezogen auf einen definierten Zeitraum spiegelt sie wieder, ob genügend Niederschlag fällt, um dem Verdunstungsanspruch der Luft zu genügen. Anders als bei der Betrachtung von Einzelkenngrößen wie Temperatur oder Niederschlag gibt sie als integrativer Indikator eine vergleichsweise komplexe Information über die Witterung.

Für eine deutliche Verschlechterung des Kronenzustandes sind vor allem starke Trockenheit mit unterdurchschnittlicher Klimatischer Wasserbilanz in der Vegetationszeit des Vorjahres und teilweise des Aufnahmejahres verantwortlich. Diese Entwicklung ist bei sehr günstigen Bedingungen mit überdurchschnittlicher Klimatischer Wasserbilanz in gewissem Rahmen reversibel.

Die komplexe Betrachtung der Vitalität von Bäumen kann, vor allem in Zeiten, in denen keine Schadenssymptome erkennbar sind, ohne Informationen über das Wachstum nur unzureichend erfolgen. Wachstumsinformationen werden bei der Waldzustandserhebung nicht routinemäßig erfasst.

Die bei Buche in den vergangenen Jahrzehnten wahrgenommene vermehrte Fruktifikation ist nach der Datenanalyse nicht als Zeichen einer Vitalitätsschwächung zu verstehen. Mastauslösend können Witterungsbedingungen mit strahlungsreichen, warmen Wetterlagen im Juni und Juli des Vorjahres sein, sofern der Baum ausreichend Reservestoffe gespeichert hat. Mittelstarke und starke Fruktifikation gehen mit einem signifikanten Rückgang des Zuwachses einher. Alter und soziale Stellung im Bestand haben einen deutlichen Einfluss auf das individuelle Fruktifikationsverhalten der Buche.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	10
1.1	Fragestellung, eingeordnet in den Stand der Forschung	10
1.2	Abweichungen gegenüber dem Projektantrag	11
2	Material und Methoden	12
2.1	Datengrundlage.....	12
2.1.1	Auswahl, Lage und Design der Untersuchungsflächen	12
2.1.2	Wald- und Bodenzustand	13
2.1.3	Meteorologie.....	15
2.1.4	Abgeleitete Kenngrößen.....	16
2.2	Datenverarbeitung	17
2.3	Methodisches Vorgehen	17
3	Ergebnisse	19
3.1	Überblick über die Zahl untersuchter Bäume	19
3.2	Standortsbedingungen	21
3.2.1	Klima	21
3.2.2	Substratgruppen und Trophie	24
3.2.3	Wasserhaushalt	25
3.3	Muster von Vitalitätskenngrößen	26
3.4	Einflüsse auf die Kronenverlichtung.....	31
3.4.1	Alter	31
3.4.2	Kronenstruktur	32
3.4.3	Fruktifikation bei Buche	33
3.4.4	Witterung	35
3.4.5	Standortsmerkmale.....	38
3.4.6	Modellierung der Kronenverlichtung als vitalitätsbeschreibende Kenngröße	47
3.5	Einflüsse auf die Fruktifikation	47
3.5.1	Standorts- und Bestandeseinfluss	48
3.5.2	Einfluss der Witterung.....	50
3.6	Einflüsse auf den Zuwachs bei Buche in Hessen	54
3.7	Mortalität	57
3.8	Analyse einer Abfolge vitalitätsbeschreibender Symptome	61
4	Diskussion und Bewertung der Ergebnisse	63
4.1	Risikofaktoren in der Vergangenheit.....	63

4.1.1	Sturm	63
4.1.2	Trockenheit.....	64
4.1.3	Insekten	68
4.1.4	Pilze	69
4.1.5	Stoffeinträge.....	70
4.2	Risikobewertung der Hauptbaumarten unter zukünftigen klimatischen Bedingungen	71
4.3	Thesenprüfung	73
5	Handlungsempfehlungen	76
6	Fazit und Ausblick.....	77
7	Abkürzungen und Definitionen	78
8	Literatur	79
9	Anhang	84

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Lage der Untersuchungsflächen in den vier Bundesländern Hessen, Niedersachsen, Schleswig-Holstein und Sachsen-Anhalt.....	12
Abbildung 2: Vorgehen bei der Projektbearbeitung.....	17
Abbildung 3: Vergleich der Vorkommen und Mischung von Baumarten zwischen den Jahren 1984 und 2019. Mischbestände sind mit Mustern, Reinbestände mit jeweils einer Farbe dargestellt.....	20
Abbildung 4: Anzahl der Bäume in Hessen, Niedersachsen, Sachsen-Anhalt und Schleswig-Holstein für die Hauptbaumarten des Datensatzes.....	21
Abbildung 5: Entwicklung der mittleren Temperaturen (aus Tagesmittelwerten) als Abweichung vom langjährigen Mittel 1981 – 2010.	22
Abbildung 6: Entwicklung der Apriltemperaturen als Abweichung vom langjährigen Mittel 1981 – 2010.	23
Abbildung 7: Entwicklung der Aprilniederschläge als Abweichung vom langjährigen Mittel 1981 – 2010.	23
Abbildung 8: Klimatische Wasserbilanz der Jahre als Abweichung vom Mittelwert 1981 – 2010 auf den BZE-Plots in Hessen, Niedersachsen, Sachsen-Anhalt und Schleswig-Holstein.	24
Abbildung 9: Häufigkeit der Substratgruppen bei den untersuchten Plots.....	25
Abbildung 10: Häufigkeit der Trophiestufen bei den untersuchten Plots.....	25
Abbildung 11: Häufigkeit der Wasserhaushaltsstufen bei den untersuchten Plots.....	26
Abbildung 12: Mustertabelle für Kronenverlichtung bei ausgewählten Buchen.....	27
Abbildung 13: Mittlere Kronenverlichtung bei Buche (oben links), Eiche (oben rechts), Fichte (unten links) und Kiefer (unten rechts) nach Altersklassen.....	28
Abbildung 14: Dickenzuwachs bei Buchen in Hessen, angegeben als prozentualer Zuwachs bezüglich der Vorjahreskreisfläche. Es wurden nur Buchen ausgewählt, deren Datenreihen vollständig sind (n = 70 pro Jahr).....	29
Abbildung 15: Anzahl abgestorbener Bäume (100 % Kronenverlichtung) pro Jahr, nach Hauptbaumarten getrennt, in Hessen, Niedersachsen, Sachsen-Anhalt und Schleswig-Holstein.....	30
Abbildung 16: Abhängigkeit der Kronenverlichtung von Alter und Baumart.	32
Abbildung 17: Zusammenhang zwischen Kronenstruktur nach Roloff und Kronenverlichtung bei Buche.	33
Abbildung 18: Vergleich der Kronenverlichtung bei Buche (120-180 Jahre, 1. BKL, Niedersachsen) bei unterschiedlicher mittlerer Mastintensität (MI).....	34
Abbildung 19: Buchenzweig mit Blüten. Männliche Blüte in Knospenschuppenachsel (A), männliche Blüte in Blattachsel (B), weibliche Blüte in Blattachsel (C). Foto: Klinck, 2020.....	35
Abbildung 20: Auswirkungen von Abweichungen der über die Vegetationszeit (Apr-Okt) aufsummierten Klimatischen Wasserbilanz im Vergleich zum 30-jährigen Mittel 1981-2010 auf die Kronenverlichtung von Kiefer (links oben), Eiche (rechts oben), Buche (links unten) und Fichte (rechts unten). Betrachtungszeiträume sind das Jahr der Aufnahme der Kronenverlichtung („Jahr“), das jeweilige Vorjahr (Jahr-1) bzw. 2 (Jahr-2) und 3 (Jahr-3) Jahre vor der Aufnahme. Grün: Kronenverlichtung wird deutlich geringer, rot: Kronenverlichtung erhöht sich deutlich... 36	36
Abbildung 21: Abweichung der Kronenverlichtung bei Buche vom Baummittel in Abhängigkeit der Abweichung der Klimatischen Wasserbilanz vom Mittelwert 1981-2010, berechnet für den Zeitraum April des Vorjahres bis September des Aufnahmejahres. Angabe für Buchen unter 60 Jahre, zwischen 60 – 180 Jahren und älter als 180 Jahren.	38
Abbildung 22: Kronenverlichtung bei Buche (über 60 Jahre) nach Trophiestufen.....	39
Abbildung 23: Kronenverlichtung bei Buche (über 60 Jahre) nach Wuchsgebiet.....	39
Abbildung 25: Veränderung der Kronenverlichtung von Buchen 2019 im Vergleich zum Vorjahr mit Bezug auf die nFK des Standorts.....	40

Abbildung 26: Kronenverlichtung bei Eiche (über 60 Jahre) nach Wuchsgebieten	41
Abbildung 27: Veränderung der Kronenverlichtung von Eichen 2019 im Vergleich zum Vorjahr mit Bezug auf die Exposition des Standorts.....	41
Abbildung 28: Kronenverlichtung bei Fichte nach Höhe über NN (alle Altersklassen, alle Jahre).....	42
Abbildung 29: Kronenverlichtung bei Fichte (alle Alter) in Abhängigkeit vom Wasserhaushalt	43
Abbildung 30: Kronenverlichtung bei Fichte (alle Alter) in Abhängigkeit von der Trophie	43
Abbildung 31: Veränderung der Kronenverlichtung von Fichten 2019 im Vergleich zum Vorjahr mit Bezug auf die Exposition des Standorts.....	44
Abbildung 32: Veränderung der Kronenverlichtung von Fichten 2019 im Vergleich zum Vorjahr mit Bezug auf die nFK des Standorts	44
Abbildung 33: Kronenverlichtung bei Fichte nach Bestandesmischung, Stichjahr 2019 (alle vier Bundesländer, alle Alter)	45
Abbildung 34: Kronenverlichtung bei Kiefer (ü. 60 J.) nach Wasserhaushaltsstufe	46
Abbildung 35: Kronenverlichtung bei Kiefer (ü. 60 J.) nach Wuchsgebiet	46
Abbildung 36: Veränderung der Kronenverlichtung von Kiefern 2019 im Vergleich zum Vorjahr mit Bezug auf die nFK des Standorts	47
Abbildung 37: Einfluss des Baumalters auf den Mastindex bei Buche. Marginaler Effekt = Effekt, den eine unabhängige auf die abhängige Variable hat bei Änderung um eine Einheit und Kon- stanthaltung der anderen unabhängigen Variablen. Durchgezogene Linie = Median, gestri- chelt = Standardabweichung. Prädiktierter Mastindex = Anwendung des Modells auf die Ziel- variable (modellierter Mastindex).....	49
Abbildung 38: Einfluss der sozialen Stellung des Baumes auf den Mastindex bei Buche (vgl. auch Abbildung 36).	49
Abbildung 39: Abweichung des Monatsmittelwertes der Temperatur in Jahren vor einer starken Mast (mdst. 2/3 der Bäume eines Plots fruktifizieren mittel bis stark) bzw. einer Nicht-Mast (90 % der Bäume eines Plots fruktifizieren nicht) vom langjährigen Mittel 1961-1990 auf BZE- Buchenflächen in Hessen, Niedersachsen, Sachsen-Anhalt und Schleswig-Holstein.....	51
Abbildung 40: Abweichung des Monatsmittelwertes der Globalstrahlung in Jahren vor einer starken Mast (mdst. 2/3 der Bäume eines Plots fruktifizieren mittel bis stark) bzw. einer Nicht-Mast (90 % der Bäume eines Plots fruktifizieren nicht) vom langjährigen Mittel 1961- 1990 auf BZE-Buchenflächen in Hessen, Niedersachsen, Sachsen-Anhalt und Schleswig- Holstein.....	52
Abbildung 41: Globalstrahlung vor den starken Buchen-Mastjahren 2013, 2006 und 1991	53
Abbildung 42: Globalstrahlung vor Jahren ohne Fruktifikation bei Buche 2016, 2000 und 1984	53
Abbildung 43: Abweichung des Monatsmittelwertes der Globalstrahlung 2 Jahre vor einer starken Mast (mdst. 2/3 der Bäume eines Plots fruktifizieren mittel bis stark) bzw. einer Nicht-Mast (90 % der Bäume eines Plots fruktifizieren nicht) vom langjährigen Mittel 1961-1990 auf BZE- Buchenflächen in Hessen, Niedersachsen, Sachsen-Anhalt und Schleswig-Holstein.....	54
Abbildung 44: Vergleich des Zuwachses von Jahren mit geringer Fruktifikation (links) und mit mittelstarker Fruktifikation (rechts) mit dem des jeweiligen Vor- und Folgejahres und dem Zeitreihenmittelwert der entsprechenden Bäume (n = 573, Signifikanzniveaus der Unter- schiede: <= 0.05: *, <= 0.01: **, <= 0.001: ***)	55
Abbildung 45: Vergleich des Zuwachses von Jahren mit starker Fruktifikation mit dem des jewei- ligen Vor- und Folgejahres und dem Zeitreihenmittelwert der entsprechenden Bäume (n = 230, Signifikanzniveaus der Unterschiede: <= 0.05: *, <= 0.01: **, <= 0.001: ***)	55
Abbildung 46: Zusammenhang zwischen Kronenverlichtung und Zuwachs bei hessischen Buche für ähnlich alte Bäume (120-180 Jahre) der Baumklassen 1 und 2.	56
Abbildung 47: Monatsmitteltemperaturen als Vergleich zwischen wachstumsstarken und wach- stumsschwachen Jahren bei hessischen Buchen. Angabe der Temperaturen als Abweichung vom langjährigen Mittel.	56

Abbildung 48: Entwicklung der Kronenverlichtung bei Rotbuche vor ihrem Absterben. Gesamtzahl absterbender Bäume = 49	57
Abbildung 49: Entwicklung der Kronenverlichtung bei Eiche vor ihrem Absterben. Gesamtzahl absterbender Bäume = 81	58
Abbildung 50: Entwicklung der Kronenverlichtung bei Fichte vor ihrem Absterben. Gesamtzahl absterbender Bäume = 349	58
Abbildung 51: Entwicklung der Kronenverlichtung bei Kiefer vor ihrem Absterben. Gesamtzahl absterbender Bäume = 301	59
Abbildung 52: Absterberaten von Buchen, Eichen, Fichten und Kiefern mit geringerer Kronenverlichtung (< 60%) und mit hoher Kronenverlichtung (>= 60%). In und neben den Balken stehende Zahlen sind absolute Anzahlen, die Ordinate zeigt den prozentualen Anteil am Gesamtkollektiv der Baumart.	60
Abbildung 53: Überblick über ausgefallenen Bäume auf WZE-Standorten in den Trägerländern der NW-FVA im Zeitraum 1985-2018 (ohne methodenbedingte Ausfälle). Die Farbintensität zeigt für die Hauptbaumarten die Anzahl der Ausfälle an.	61
Abbildung 54: Ellenberg-Quotient (EQ) auf BZE-Plots mit Buchenreinbeständen in Hessen, Niedersachsen, Sachsen-Anhalt und Schleswig-Holstein	65
Abbildung 55: Ellenberg-Quotient auf BZE-Flächen mit Buchen-Reinbeständen in Hessen, Niedersachsen, Schleswig-Holstein und Sachsen-Anhalt.	66
Abbildung 56: Standortwasserbilanz ($KWB_{veg.} + nFK$) auf hessischen BZE-Plots in den Jahren der Waldzustandserhebung.....	67
Abbildung 57: mittlere Kronenverlichtung bei Kiefer in Hessen, Niedersachsen, Sachsen-Anhalt und Schleswig-Holstein im Vergleich zur Stickstoffvorrat (BZE II, 2006-2008).	70
Abbildung 58: Vergleich der N-Depositionssumme als Summe 2000-2015 auf BZE-Kiefernplots (links) mit der Kronenverlichtung der Kiefern 2015 (rechts).....	71

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Im Rahmen der Waldzustandserhebung auf Baumbene gemessene Merkmale (Eichhorn et al. 2010), deren mögliche Ausprägungen sowie zeitliche Auflösung und Ausdehnung. Abkürzungen: Hessen = HE, Niedersachsen = NI, Sachsen-Anhalt = ST und Schleswig-Holstein = SH.	13
Tabelle 2: Im Rahmen der Bodenzustandserhebung zwischen 2006 und 2008 auf Plotebene gemessene Merkmale (Wellbrock et al. 2006) und deren mögliche Ausprägungen.....	15
Tabelle 3: Original vorliegende Witterungskenngrößen	16
Tabelle 4: Abgeleitete Kenngrößen	16
Tabelle 5: Anzahl von Buchen, Eichen, Fichten und Kiefern nach Trophiestufe	25
Tabelle 6: Anzahl von Buchen, Eichen, Fichten und Kiefern auf Standorten, nach Wasserhaushaltsstufe.....	26
Tabelle 7: Optisch erkennbare Muster für Vitalitätskenngrößen bei den Hauptbaumarten	27
Tabelle 8: Anzahl von Bäumen der jeweiligen Altersklassen und Baumarten in Abbildung 16.....	32
Tabelle 9: Wichtigste Witterungsbesonderheiten, die zu einer Erhöhung der Kronenverlichtung bei Buche, Eiche, Fichte und Kiefer führen. Es sind nur Merkmale aufgenommen, die eine deutliche Abweichung vom langjährigen Mittel zeigen.....	37
Tabelle 10: Kovariablen des Modells zur Schätzung der Fruktifikationsstärke bei Buche	48
Tabelle 11: Ergebnisse der Literaturrecherche zur Auslösung der Blütenbildung bei Buche	50
Tabelle 12: Klimaindikatoren zur Beurteilung des Trockenstressrisikos. * Grenzwert für hohes Trockenstressrisiko	64

1 Einleitung

1.1 Fragestellung, eingeordnet in den Stand der Forschung

Der Klimawandel bedeutet auch für den Wald in Hessen eine grundlegende Veränderung ökologischer Rahmenbedingungen sowie Risiken für die Waldentwicklung. Wie keine andere Landnutzungsform sind Bäume und Wälder mit dem Klima verbunden. Um im Klimawandel die Funktionen der Wälder erhalten zu können, ist ein erweitertes Verständnis von Ursachen und Wirkungen des Klimawandels notwendig.

Nur ein stabiler und vitaler Wald ist in der Lage, durch sein Wachstum aktiven Klimaschutz zu leisten, indem er langfristig Kohlenstoff in seiner Biomasse und im Waldboden speichert. Diese Fähigkeit ist eine der Waldfunktionen, die aktuell eine herausragende Bedeutung hat. Aus dieser Sicht ist es für die Sicherstellung der Waldfunktionen elementar, die Wirkungen von Extremjahren wie 2003, 2011 oder 2018/19 auf die Vitalität von Bäumen beurteilen zu können.

Mit den Ende 2016 vorliegenden Ergebnissen zur zweiten Bodenzustandserhebung bestand erstmals die Möglichkeit, flächenrepräsentativ für den Wald an einer Vielzahl von Untersuchungsflächen Ursachen und Wirkungen einer Klimaänderung gegenüberzustellen. Aussagen zu der klimatischen Belastung an den Punkten der systematischen Stichprobe sind ebenso möglich wie eine Information zum Wasserhaushalt der Waldböden, beziehungsweise eine Darstellung der Reaktionsmuster der Hauptbaumarten Fichte, Buche, Eiche und Kiefer. Letzteres ermöglicht das Ergebnis der langen Zeitreihen der Waldzustandserhebung (1984 – 2019). Neben der Baumvitalität liegen an den gleichen Stichprobenpunkten Informationen zur Bodenchemie und zur Bodenphysik und für Buche in Hessen zum Waldwachstum vor. Ein innovativer Ansatz des Projekts ist die Berücksichtigung sowohl neu entwickelter als auch bekannter Indikatoren der Baumvitalität. Neben einer Information zur Belaubung/Benadelung der Probestämme zählen dazu Daten zur Kronenstruktur, zur Belastung durch biotische Schädlinge, zur annualen Baum mortalität sowie Daten einer ergänzenden zweiten Bonitur im Herbst der Jahre 2015 und 2016 auf der systematischen Stichprobe.

Sowohl die klimabedingten Ursachen des Klimawandels als auch die Wirkungsmuster von Bäumen und Beständen stehen in einem zeitlich und räumlich komplexen Zusammenhang. Ausgehend von einem Verständnis der Wälder als komplexe adaptive Systeme wird versucht, eine Analyse der Resilienzeigenschaften der Wälder vorzunehmen.

Zur Bearbeitung der Problemstellung wurden Hypothesen aufgestellt, die im folgenden Bericht geprüft werden:

1. Witterungsbezogener Stress bewirkt eine verschlechterte Vitalität der Wälder.
2. Klimatischer Stress wirkt sich, differenziert nach forstlichen Standorten und Baumarten, unterschiedlich aus.
3. Witterungsbedingt nehmen Schäden durch Insekten und Pilze zu. Sie sind Vorboten eines möglichen Absterbens der Bäume.
4. Die Vitalität von Bäumen definiert sich insbesondere über den Grad von Kronenverlichtung, Fruktifikation und Wachstum sowie das Absterben oder den Ausfall von Probestämmen.
5. Die Kronenverlichtung ist im Jahr vor dem Absterben deutlich erhöht.
6. Besondere Belastungssituationen stellen sich als Kippunkte der Waldentwicklung dar.
7. In wiederholt extremen Witterungssituationen steigt die Mortalität der Hauptbaumarten an.

8. Nach der Überschreitung von bestandesbezogenen Kippunkten verändern sich Waldstrukturen und Waldfunktionen.

9. Waldwirtschaft auf ökologischer Grundlage kann die Anpassungsfähigkeit der Wälder gegenüber Klimaänderungen in Grenzen stabilisieren.

10. Der Zuwachs von auch in starken Mastjahren wenig wachsenden Buchen liegt auch in Nicht-Mastjahren unter dem von Buchen mit hohem Mastindex.

Dieser Bericht folgt formell der Vorgabe des HLNUG. Zusätzlich befindet sich zum besseren Verständnis ein Verzeichnis für fachliche Abkürzungen auf Seite 78.

1.2 Abweichungen gegenüber dem Projektantrag

Der Plan zur Erfüllung der inhaltlichen Aufgaben des Projektes beruhte u.a. auf Zusammenarbeit und ex- sowie interner Zuarbeit. Da das Projekt als 3-Jahresprojekt für eine halbe Wissenschaftlerstelle veranschlagt war, bestand neben der eigentlichen Projektarbeit und der Betreuung einer Reihe von Masterarbeiten nicht viel Spielraum, um wegfallende Zuarbeiten kompensieren zu können.

So konnte letztendlich AP 9 und damit zusammenhängend Meilenstein 4 nicht wie geplant erfüllt werden. Nach dem ersten und vielversprechenden Treffen mit Wissenschaftlern aus Ungarn konnte dieser Kontakt nicht gehalten werden. Hintergrund sind strukturelle und politische Probleme in Ungarn bzw. der Universität Sopron, in deren Folge Kontaktpersonen die Arbeitsstelle wechselten und die Weitergabe von Daten und Ergebnissen erschwert ist. So war es den wissenschaftlichen Mitarbeitern der Forstfakultät nicht möglich, Klimamessdaten für ihre Untersuchungsgebiete zu bekommen, was den direkten Vergleich mit den Klimabedingungen unserer heimischen Wäldern unmöglich macht. Zusätzlich konnte kein Ersatz für die Masterstudentin gefunden werden, da die Kenntnis der ungarischen Sprache für die geplante Arbeit essentiell gewesen wäre.

Ersatzweise erfolgte die Teilnahme an einer Exkursion im Rahmen der AFSV-Tagung 2018 nach Kärnten/Österreich und Slowenien. Außerdem wurde die Literaturrecherche auf den südlichen und südosteuropäischen Raum ausgeweitet.

Die allgemeinen Einschränkungen im Zusammenhang mit dem Auftreten von Covid 19 beeinflussten auch die Projektarbeit. Nachteilig wirkte sich vor allem der Verzicht auf Treffen im erweiterten Personenkreis, aber auch der Wegfall der Kinderbetreuung für die Projektbearbeiterin aus. Im Zuge der Einschränkungen ergaben sich:

- Verzögerungen von Besprechungen und Abgabeterminen von Masterarbeiten
- Die Absage eines Praktikums
- Verzögerungen des Beginns einer Masterarbeit, damit wird Meilenstein 3 nicht fristgerecht erreicht
- Behinderungen in der Durchführung von Meetings mit größerer Personenzahl mit den Forstämtern

Für die Erfüllung von AP 13 wurde nach Wegen gesucht, die durch die allgemeinen Beschränkungen durch Covid-19 bedingten Verzögerungen in der Kommunikation mit den Forstämtern nachzuholen. Nach derzeitigem Plan werden die im Projekt entstandenen Erkenntnisse bei den offiziellen Fortbildungsprogrammen der Forstbetriebe der vier beteiligten Bundesländer kommuniziert. Dabei gibt es für das Thema „Waldzustand“ voraussichtlich folgende Fortbildungs- und Kommunikationstermine: Schleswig-Holstein am 28.4.2021, Sachsen-Anhalt am 5.10.2021, Hessen am 07.10.2021 und Niedersachsen am 14.10.2021.

2 Material und Methoden

Die den Auswertungen zugrunde liegenden Datensätze der Waldzustandserhebung (WZE) und der zweiten Bodenzustandserhebung (BZE II) basieren auf waldfächenrepräsentativen Aufnahmen an den Schnittpunkten eines systematischen Rasters. Jeder untersuchte Aufnahmepunkt wird als Plot bezeichnet. Die Daten unterliegen Standards des europäischen Waldmonitorings (EICHORN ET AL. 2010). Die Berücksichtigung unterschiedlicher Regionen auch außerhalb des Bundeslandes Hessen erlaubt, lokale Einflüsse in den Untersuchungsergebnissen zu minimieren und generelle Aussagen zu treffen.

2.1 Datengrundlage

2.1.1 Auswahl, Lage und Design der Untersuchungsflächen

In die Untersuchungen gingen Daten von Plots der WZE ein, zu denen auch die standörtlichen Informationen aus der BZE vorliegen. Dabei lag das Hauptaugenmerk auf der Auswertung von WZE-Plots aus Hessen. Ergänzt wurde sie um Aufnahmeplots der Länder Niedersachsen, Schleswig-Holstein und Sachsen-Anhalt (Abbildung 1).

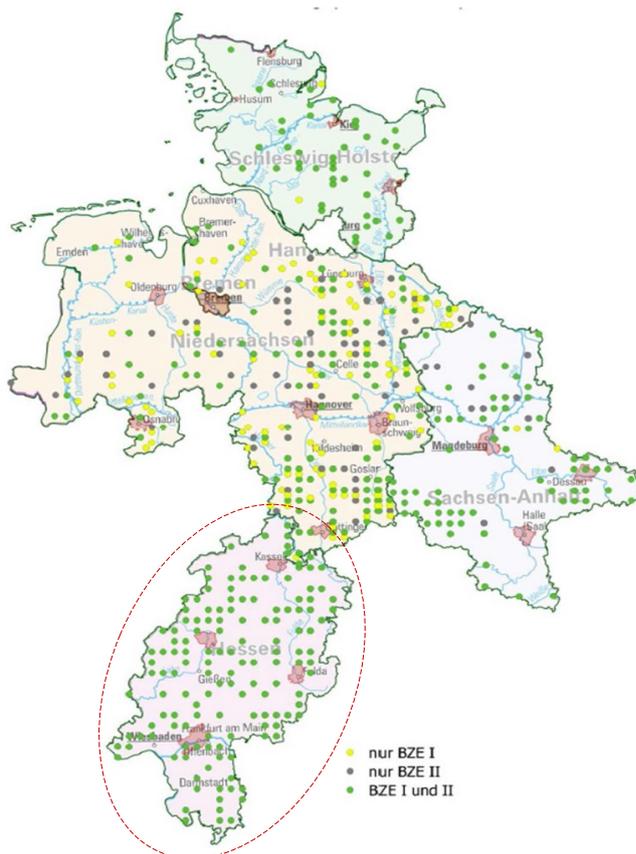


Abbildung 1: Lage der Untersuchungsflächen in den vier Bundesländern Hessen, Niedersachsen, Schleswig-Holstein und Sachsen-Anhalt

Auf jedem WZE-Plot werden jährlich 24 Bäume bonitiert. Von den existierenden zwei Plotdesigns gingen in die Auswertungen ausschließlich die Daten der im Kreuztrakt angelegten WZE-Plots ein. Hier sind von einem eingemessenen und verpflocktem Mittelpunkt nach den vier Himmelsrichtungen in einem Radius von 25 m Satelliten angelegt, auf denen je 6 Bäume untersucht werden. Diese Bäume sind markiert und nummeriert und erlauben die Auswertung baumindividueller Zeitreihen. In Hessen wurden vor 2011 je Satellit 8 anstelle 6 Bäumen untersucht.

Fällt ein Baum aus, wird in dessen nächster Umgebung ein Ersatzbaum ausgewählt. Dieser Ersatzbaum kann unter Umständen einer anderen Baumart angehören. In jedem Fall bedeutet der Baumwechsel das Ende der Zeitreihe des alten und der Beginn der Zeitreihe des neuen Baumes.

Ein für das Datenverständnis wichtiger Fakt ist, dass die WZE-Plots, sofern sie nicht in Schutzgebieten liegen, regulär bewirtschaftet werden. Eine ausführliche Dokumentation der Methoden der Waldzustandserhebung kann WELLBROCK ET AL. (2018) entnommen werden.

2.1.2 Wald- und Bodenzustand

Im europäischen Waldmonitoring werden jährlich bzw. im mehrjährigen Turnus von Juni bis August bestimmte Parameter auf allen Plots aufgenommen. Neben plotbezogenen Parametern werden andere Größen an den einzelnen Stichprobenbäumen erhoben. Die Erhebung der Daten erfolgt nach Standards des Europäischen Waldmonitorings (EICHHORN ET AL. 2010). Die Aufnahmen erfolgen durch jährlich geschulte Teams, die die Kenngrößen aus definierten Positionen okular schätzen. Die Aufnahmen unterliegen nach der Digitalisierung einer Plausibilitätskontrolle und werden gegebenenfalls durch eine nochmalige Bereisung überprüft.

Standorts- und Bodeninformationen stammen aus den Aufnahmen der BZE II (WELLBROCK ET AL. 2006) und teilweise aus der BZE I.

Eine Übersicht der in der Projektarbeit berücksichtigten Merkmale geben für die WZE-Aufnahmen Tabelle 1 und für die BZE-Aufnahmen Tabelle 2.

Tabelle 1: Im Rahmen der Waldzustandserhebung auf Baumebene erhobene Merkmale (EICHHORN ET AL. 2010), deren mögliche Ausprägungen sowie zeitliche Auflösung und Ausdehnung. Abkürzungen: Hessen = HE, Niedersachsen = NI, Sachsen-Anhalt = ST und Schleswig-Holstein = SH. Fortsetzung auf Seite 11.

Parameter	Ausprägung	Aufnahmezeit
Kronenverlichtung (KV bzw. Nadel-/ Blattverlust = NBV)	5 %- Stufen (0- 100 %)	jährlich, HE: 1984-2019 NI: 1984-2019 ST: 1991-2019 SH: 1984-2019
Fruktifikationsstärke (Behang)	0: keine, 1: gering, 2: mittel, 21: mittel unterer Bereich, 22: mittel mittlerer Bereich, 23: mittel oberer Bereich, 3: stark	jährlich, HE: 1988-2019 NI: 1984-2019 ST: 1991-2019 SH: 1990-2019
Kronenschlussgrad	1: gedrängt, 2: geschlossen, 3: locker, 4: licht, 5: räumdig, 6: sehr räumdig	jährlich, HE: 1995-2019 NI: 2006-2019 ST: 2006-2019 SH: 2011-2019
Baumklasse nach KRAFT (1884)	1: vorherrschend, 2: herrschend, 3: mitherrschend	jährlich, HE: 2011-2019 NI: 1984-2019 ST: 1991-2019 SH: 1987-2019
Zuwachs (Brusthöhen-durchmesser= BHD) bei Buche	in cm	jährlich, HE: 2006-2019
Baumalter (Bestandesbe-gründung)	In Jahren	Forstschreibung. Erhebung einmalig bei Ploteinrichtung bzw. Ersatzbaumauswahl

Parameter	Ausprägung	Aufnahmezeit
Vergilbung	5 %- Stufen (0- 100 %)	jährlich, HE: 1984-2019 NI: 1984-2019 ST: 1991-2019 SH: 1984-2019
Kleinblättrigkeit	5 %- Stufen (0- 100 %)	jährlich, HE: 2012-2014 NI: 2006-2019 ST: 2006-2019 SH: 2007, teilweise 2011-2019
Vorzeitiger Blattfall	5 %- Stufen (0- 100 %)	jährlich, HE: 1984-1994, 2012-2019 NI: 2004-2019 ST: 2006-2019 SH: 2011-2019
Vorzeitiger Fruchtfall (Eiche und Buche)	In Stufen: 0 = keine 1 = wenige 2 = viele	jährlich, HE: 2015-2019 NI: 2015-2019 ST: 2015-2019 SH: 2015-2019
Blattrollen	5 %- Stufen (0- 100 %)	jährlich, HE: 2012-2019 NI: 2004-2019 ST: 2006-2019 SH: 2011-2019
Insektenbefall allgemein	5 %- Stufen (0- 100 %), bis 2006 in den Stufen 0-3	jährlich, HE: 1984-2019 NI: 1984-2019 ST: 1991-2019 SH: 2011-2019
Insektenbefall differenziert	5 %- Stufen (0- 100 %), bis 2006 in den Stufen 0-3	jährlich: HE: 2002-2019 NI: 2006-2019 ST: 2006-2019 SH: 2011-2019
Pilzbefall allgemein	in Stufen: kein, gering, mittel, bis 2006 in den Stufen 0-3	jährlich, HE: 1984-2001 NI: 2004-2005 ST: SH:
Pilz Holz, Haupt, Blatt-Nadel	5 %- Stufen (0- 100 %)	jährlich, HE: 2012-2019 NI: 2006-2019 ST: 2006-2019 SH: 2011-2019
Kronenstruktur nach ROLOFF (2001)	1: Explorationsphase, 2: Zwischenform zwischen 1 und 3, 3: Degenerationsphase, 4: Zwischenform zwischen 3 und 5, 5: Stagnationsphase, 6: Zwischenform zwischen 5 und 7, 7: Resignationsphase, 8: Regenerationsphase	unregelmäßig
Mortalität, Absterbegrund	In Kategorien: Nutzung, biotische Ursache, abiotische Ursache	jährlich, HE: 1984-2019 NI: 1984-2019 ST: 1991-2019 SH: 2011-2019

Zusätzlich zu den routinemäßig durchgeführten Sommeraufnahmen erfolgten in den letzten Jahren Aufnahmen im Herbst. Dies ist sinnvoll, um die Entwicklung von im Sommer festgestellten Symptomen zu überprüfen.

Die Erfassung der Mortalität ist insofern schwierig, dass die Aufnahmen jährlich durchgeführt werden und die Ursache für das Fehlen von Bäumen teilweise nicht erkennbar ist. Die Beurteilung erfolgt

dann nach Indizien, die im Umfeld erkennbar sind. Sauber gesägte Stubben über den Plot hinaus lassen beispielsweise auf planmäßige Nutzung schließen, (an)gekippte Wurzelteller auf Sturmwurf. In vielen Fällen ist jedoch nicht nachvollziehbar, aus welchem Grund ein Baum fehlt. Hier wird „unbekannte Ursache“ als Baumausfallgrund angegeben.

Schwierig ist auch, im bewirtschafteten Wald die „wahre“ Mortalität zu bestimmen. Im aus forstlicher Sicht besten Fall wird das Absterben eines Baumes rechtzeitig erkannt und der Baum wird entnommen, um einer Holzentwertung zuvorzukommen. Damit ist der Baum als WZE-Baum jedoch nicht abgestorben, sondern genutzt, obwohl er sicherlich nicht mehr lange gelebt hätte. Die Zahl der wirklich abgestorbenen Bäume, die auch ohne Blätter oder Nadeln noch im Bestand verbleiben, spiegelt die Realität vermutlich nicht vollständig wieder. Dieser Aspekt muss bei jeder Auswertung berücksichtigt werden.

Tabelle 2: Im Rahmen der Bodenzustandserhebung zwischen 2006 und 2008 auf Plotebene erfasste Merkmale (WELLBROCK ET AL. 2006) und deren mögliche Ausprägungen

Parameter	Ausprägung
Exposition	N= Nord, NO= Nordost, O= Ost, SO=Südost, S= Süd, SW= Südwest, W= West, NW= Nordwest, i=inhomogen
Koordinaten (Gauß-Krüger)	Rechtswert & Hochwert in (m)
Hangneigung	(%) in Niedersachsen, (gon) in Hessen
Hauptsubstratgruppe	Basalt/Diabas, Buntsandstein, Granit, Grauwacke, Kalk, Kreidesandstein, Lehm, Lößlehm, Mergel, organisch geprägt, organisch, Quarzit, schwach verlehmtter Sand, Ton(stein), Tonschiefer, unverlehmtter Sand, verlehmtter Sand, Zechstein (Rotlage)
Höhe über Normalnull	in m
Nutzbare Feldkapazität (nFK)	in mm, bezogen auf 90 cm Bodentiefe
Trophiestufe	oligotroph, schwach mesotroph, mesotroph, gut mesotroph, eutroph, karbonat-eutroph
Wasserhaushaltsstufe	trocken, mäßig trocken, mäßig frisch, frisch, betont frisch, feucht, wechsel-feucht, nass

2.1.3 Meteorologie

Für die Auswertung der Witterung konnte auf Klimadaten in täglicher Auflösung zugegriffen werden, die zunächst für den Zeitraum 1961-2013 vorlagen und im Frühjahr 2020 bis Ende September 2019 fortgeschrieben werden konnten (Tabelle 3). Diese Daten wurden aus DWD-Messdaten für die BZE-Plots unter Bezug auf digitale Geländemodelle regionalisiert (KÖHLER ET AL., 2015). Darum ist bei der Interpretation der Daten zu beachten, dass diese vor allem bei Extremwerten (Temperatur, Windgeschwindigkeit) Unschärfen enthalten können. Zu Beginn der klimabasierten Auswertung stand eine allgemeine Analyse der klimatischen Entwicklung im Vergleich zur Vergangenheit. Dabei wurde zunächst der Zeitraum der Klimanormalperiode (1981-2010) zum Vergleich herangezogen. Im Fokus standen Angaben zur Temperatur, die als Tagesminimum, Tagesmittelwert und Tagesmaximum zur Verfügung stehen, zum Niederschlag, der Globalstrahlung und Verdunstung jeweils als Tagessumme und der Windgeschwindigkeit als Tagesmittel. Als Differenz aus potentieller Verdunstung und Niederschlagsmenge wurde die Klimatische Wasserbilanz als Maß für möglichen Trockenstress berechnet.

Tabelle 3: Original vorliegende Witterungskenngrößen

Klimakenngröße	Einheit
Tagesmitteltemperatur	°C
Tagesminimumtemperatur	°C
Tagesmaximaltemperatur	°C
Tagesniederschlag	mm
Tagesverdunstungssumme	mm
Globalstrahlungssumme pro Tag	MJ/m ² *d
Mittlere Windgeschwindigkeit/Tag	m/s

2.1.4 Abgeleitete Kenngrößen

Von den original vorliegenden Daten wurden ausgewählte Kenngrößen abgeleitet, die für die Auswertung der Datensätze zur Beantwortung der Fragestellungen Relevanz besitzen. Sie sind in Tabelle 4 zusammengefasst.

Tabelle 4: Abgeleitete Kenngrößen

Kenngröße	Einheit	Herleitung
Klimatische Wasserbilanz (KWB)	mm	Niederschlag [mm] – Verdunstung [mm]
Standortwasserbilanz	mm	Nutzbare Feldkapazität (nFK) [mm] + KWB [mm]
Mastindex	-	MW (Fruktifikationsstärke/Jahr)
Zuwachs: BHD-Änderung	mm	BHD _{Jahr} – BHD _{Vorjahr}
Kreisflächenzuwachs	%	$(\pi \cdot (\frac{1}{2} \text{ BHD})^2_{\text{Jahr}} - \pi \cdot (\frac{1}{2} \text{ BHD})^2_{\text{Vorjahr}}) / (\pi \cdot (\frac{1}{2} * \text{Umfang})^2_{\text{Vorjahr}})$

Um mit den Daten zur Fruktifikation rechnen zu können, wurde aus den kategorial vorliegenden Angaben zur Fruktifikationsstärke eine numerische Größe abgeleitet. Dabei wurden die folgenden Kategorien zugewiesen:

Keine Früchte	= 0	Mittelviele Früchte (mittleres Niveau)	= 1
Wenige Früchte	= 0,5	Mittelviele Früchte (hohes Niveau)	= 1,25
Mittelviele Früchte (niedriges Niveau)	= 0,75	Viele Früchte	= 1,5

Bis zu Beginn der 2000er Jahre wurde die Stufe der mittelstarken Fruktifikation nicht weiter unterteilt. In dieser Periode gibt es also nur die Stufen 0, 0,5, 1 und 1,5.

Bei den Witterungskenngrößen wurde zur Beurteilung von Extremsituation und zur besseren räumlichen Vergleichbarkeit der Klimakenngrößen deren Abweichung vom langjährigen Mittelwert des Zeitraumes 1981-2010 berechnet. Diese Berechnung erfolgte plotspezifisch und in zeitlich aggregierter Form für Jahreswerte, Monatswerte, Vegetationszeiten und Nicht-Vegetationszeiten. Je nach Klimakenngröße wurden für diese Zeitspannen Minimum (Temperatur), Mittelwert (Temperatur, Windgeschwindigkeit), Maximum (Temperatur, Windgeschwindigkeit) oder die Summe (Niederschlag,

KWB, Globalstrahlung) ermittelt. Die täglichen KWB-Werte wurden zusätzlich über die Vegetationszeit kumuliert und davon Mittelwert und Minimum ermittelt.

2.2 Datenverarbeitung

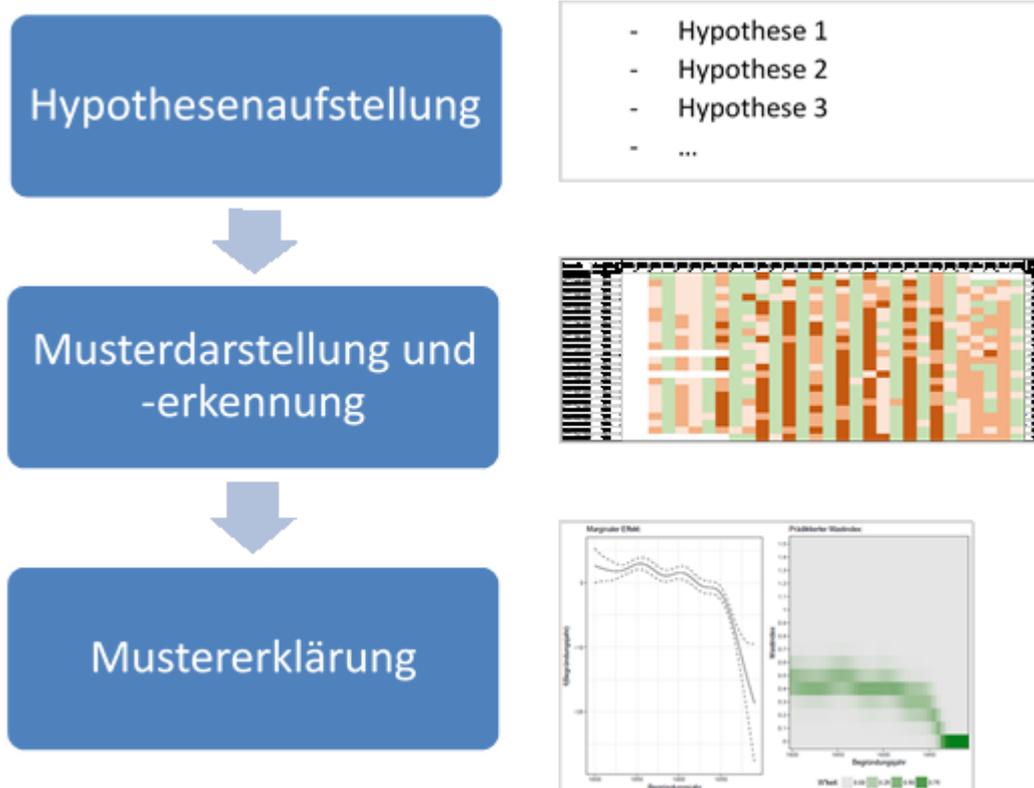
Die der WZE und BZE entstammenden Daten werden inklusive einer großen Zahl an Metadaten routinemäßig in einer Oracle-basierten Datenbank gehalten. Im Projektverlauf konnten zusätzlich erhobene Daten für Umfangänderungen bei Buche und Kronenstrukturanalysen für Eichen und Buchen für die Datenbank aufbereitet und integriert werden. Klimadaten entstammen einer SQLite-Datenbank, die neben den regionalisierten Tageswerten bereits auch ausgewählte Aggregationen enthält.

Die Datenverarbeitung erfolgte mit Hilfe der Programme RStudio, Version 1.2.5001 (RStudio Team, 2019) und „Microsoft® Excel® 2013 (15.0.5311.1000)“ (2012, Microsoft Corporation, Redmond, WA, USA).

Für die Bearbeitung der Fragestellungen mussten die Daten in den meisten Fällen exportiert und umstrukturiert werden. Die Verknüpfung der Datensätze erfolgte überwiegend in RStudio über eine baumindividuelle Kennziffer für baumbezogene Daten und über eine plotindividuelle Bezeichnung für plotbezogene Daten.

2.3 Methodisches Vorgehen

Sowohl die Auswirkungen des Klimawandels auf regionale Witterungsausprägungen als auch die Wirkungsmuster von Bäumen und Beständen stehen in einem zeitlich und räumlich komplexen Zusammenhang. Das Projekt untersucht die Reaktionen der Hauptbaumarten Buche, Eiche, Fichte und Kiefer hinsichtlich ihrer Vitalität infolge der Änderungen von Klima und Witterung. Bei den Auswertungen wurde ein für diese Fragestellung neuer Weg der Auswertung beschritten. Als Basis dienen Erhebungsdaten, die sowohl aus Messungen, Bonituren oder auch Verrechnungsschritten wie Regionalisierungen stammen. Die ersten Datenanalysen erfolgten musterbasiert mit dem Ziel, sowohl zeitliche als auch räumliche Muster zu identifizieren. Im zweiten Schritt wurde mit Hilfe von bi- oder multivariaten statistischen Ansätzen versucht, diese Muster zu erklären. Das Vorgehen war dabei stets hypothesenbasiert (vgl. Schema 1).



Schema 1: Vorgehen in der Projektbearbeitung

Das Projekt untersucht die vier Hauptbaumarten Buche, Eiche, Fichte und Kiefer. Aufgrund ihrer Präsenz und ihrer ökologischen Bedeutung in Hessen liegt der Fokus dabei auf der Baumart Buche.

Im Rahmen des Projektes wurden insgesamt 5 Masterarbeiten angefertigt:

- „Untersuchung der Abhängigkeit der Fruktifikation bei Buche und Fichte vom Nadel-/Blattgehalt auf BZE-Plots in Hessen, Niedersachsen und Sachsen-Anhalt“ (Bearbeitung: Jörg Hendricks, Status: abgeschlossen)
- „Mortalität von Probestämmen in der Waldzustandserhebung“ (Bearbeitung: Torben Engelhard, Status: abgeschlossen)
- „Verzweigungsstruktur und standörtliche Merkmale“ (Bearbeitung: Raphael Wulf, Status: abgeschlossen)
- Eichenvitalität, Standortseigenschaften und Eichenfraßgesellschaften. (Bearbeitung: Christoph Honekamp, Status: abgeschlossen)
- "Modellierung von Einflussfaktoren auf die Kronenverlichtung der Buche" (Bearbeitung: Anja Gröning, Status: in Bearbeitung)

Die abgeschlossenen Arbeiten können auf Anfrage bei der NW-FVA eingesehen werden.

3 Ergebnisse

3.1 Überblick über die Zahl untersuchter Bäume

Vordergründig besteht das Ziel der jährlichen WZE in einem Einblick in die jeweils aktuelle Situation des Waldzustandes. Dazu dient die systematische Stichprobe der für die Bestandesstruktur als repräsentativ ausgewählten Bäume, deren Umfang statistisch abgesichert wurde. Die Methodik der Erhebung ist über den gesamten Zeitraum weitestgehend gleich geblieben.

Unterschiedlich können dagegen durchaus die Anzahl der aufgenommenen Plots sein oder die Anzahl beprobter Bäume je Baumart. Die Anzahl an Plots kann sich ändern, wenn ein Plot ruht, weil z.B. alle Bäume durch Sturmwurf wegfallen. In diesem Fall wird gewartet, bis sich ein junger Bestand etabliert hat. Auch finanzielle Gründe (Extensivierung des Rasternetzes) können für das zeitliche Aussetzen einiger Plots in einigen Jahren verantwortlich sein. Ebenso ist es möglich, dass aufgrund konkreter Fragestellungen, wie z.B. bestimmte Gefährdungssituationen, das Netz verdichtet wird. Diese Plots werden im Projekt nicht berücksichtigt, da hier die Standortinformationen fehlen.

Eine Veränderung der Plotzahl ergab sich auch durch die Erweiterungen des Zuständigkeitsbereiches der NW-FVA. Dadurch kamen zu den seit 1984 in Hessen, Niedersachsen und Schleswig-Holstein bestehenden Aufnahmeplots im Jahr 1991 die vor allem kieferndominierten WZE-Plots in Sachsen-Anhalt.

Die Zahl der Bäume einer Baumart kann sich ändern, wenn ein Baum aus dem WZE-Kollektiv ausfällt und der nach objektiven Gesichtspunkten ausgewählte Ersatzbaum einer anderen Baumart angehört. Dann findet ein Baumartenwechsel statt.

Die meisten Plots gibt es insgesamt für Buche und Kiefer, gefolgt von Fichte. Für letztere nahm die Anzahl in letzter Zeit ab (vgl. auch Abbildung 4). Eichenplots sind am wenigsten vertreten, ihre Zahl nimmt jedoch langsam zu.

Die Plots sind sehr verschieden in ihrer Baumartenstruktur. In Reinbeständen kommen Buchen, Fichten und Kiefern häufig und Eichen nur selten vor. Ein genauer Blick in die Baumarten der Bestände ist insofern schwierig, als das WZE-Kollektiv nur eine Stichprobe des gesamten Bestandes darstellt. Allerdings ist die Repräsentativität des Bestandes für die Baumartenauswahl des WZE-Kollektives von entscheidender Bedeutung. Auf dieser Basis wurde eine Auswertung vorgenommen, die von der repräsentativen Baumartenverteilung im WZE-Kollektiv ausgeht und bei welcher die Baumartenvorkommen des Jahres 1984 mit dem des Jahres 2019 verglichen. Da in den Jahren unterschiedlich viele Plots zum WZE-Kollektiv gehörten, erfolgt die Angabe prozentual.

Bei den betrachteten Plots nahmen Mischbestände von 1984 bis 2019 um 3 % zu (von 67 % auf 70 %) und Reinbestände entsprechend von 33 % auf 30 % ab.

Der Anteil von Laub-Nadel-Mischbeständen nahm von 43 % auf 47 % zu. Dabei war in jeweils nur 1 % der Fälle keine der vier Hauptbaumarten beteiligt. Nadelmischungen machten 1984 noch 11 % aller Plots aus und reduzierten sich auf 8 % im Jahr 2019. Sie fanden überwiegend mit Fichte oder Kiefer statt. Laubmischbestände nahmen geringfügig von 14 % auf 15 % zu, wobei nur bei einem Prozent keine Eichen oder Buchen vorkommen (vgl. Abbildung 3).



Abbildung 3: Vergleich der Vorkommen und Mischung von Baumarten zwischen den Jahren 1984 und 2019. Mischbestände sind mit Mustern, Reinbestände mit jeweils einer Farbe dargestellt.

Abbildung 3 zeigt, dass der Anteil von Fichtenreinbeständen von allen Bestandestypen am stärksten zurückging. Ihr Anteil halbierte sich von 32 % im Jahr 1984 auf 16 % 2019. Dieser Rückgang spiegelt einen Trend wieder, der aktuell vielerorts wahrgenommen werden kann und sowohl auf abiotische als auch biotische Ursachen zurückzuführen ist (vgl. Kapitel 3.7). Andere Veränderungen können dagegen Ursachen haben, die keinen ökologischen Hintergrund haben. Ein Beispiel kann die Zunahme von Kieferreinbeständen sein, die durch das Hinzukommen des kiefernreichen Landes Sachsen-Anhalt im Jahr 1991 mitverursacht sein könnte. So gibt Abbildung 3 wohl einen guten Überblick über die Baumartenverteilung in den beiden Jahren, die Gründe für die Veränderungen können jedoch sehr vielfältig sein.

Dass seit 1991 deutlich mehr Kiefern im hier vorgestellten Datenkollektiv enthalten sind, zeigt auch Abbildung 4. Hier ist jeweils die Gesamtzahl von Bäumen der Hauptbaumarten im Zeitraum der Waldzustandserhebung dargestellt. Die Zahl der Kiefern stieg hier um fast 800 Bäume und machte die Kiefer zur häufigsten Baumart im gesamten Betrachtungsgebiet.

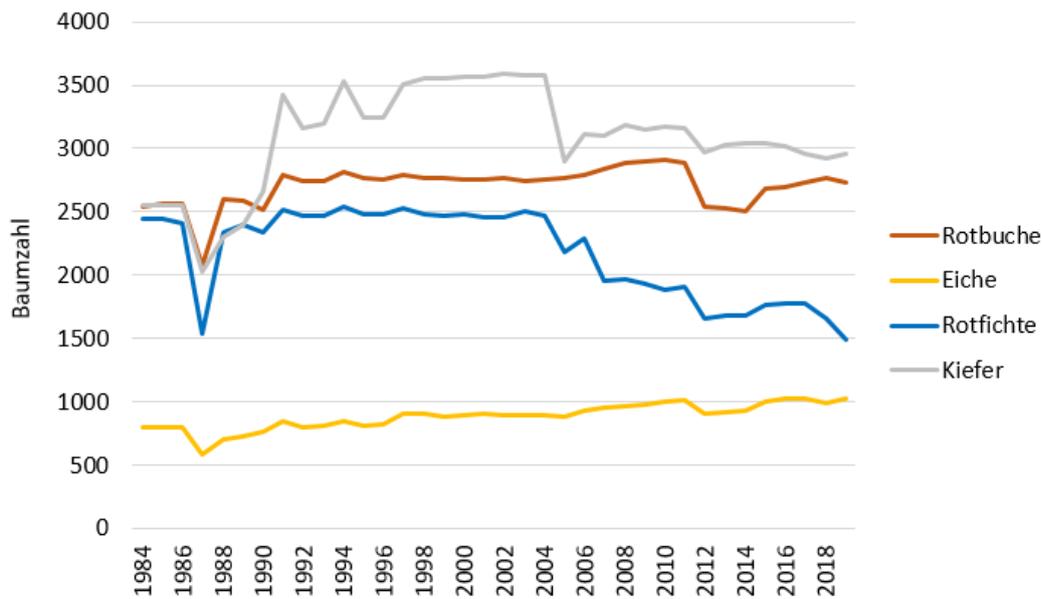


Abbildung 4: Anzahl der Bäume in Hessen, Niedersachsen, Sachsen-Anhalt und Schleswig-Holstein für die Hauptbaumarten des Datensatzes

In Hessen (ohne Abbildung) war anfangs die Fichte mit 1400 Bäumen die häufigste Baumart, gefolgt von Buche (1208), Kiefer (894) und Eiche (409). Seit 1991 hat die Buche den höchsten Anteil. Aktuell (Stand 2019) bilden 1142 Buchen, 559 Fichten, 526 Kiefern und 330 Eichen den hessischen Datenbestand bezüglich der Hauptbaumarten ab.

Informationen zur Altersverteilung geben die Grafiken in Anhang 1 bis Anhang 4. Bei Eiche und Buche bleibt die Altersverteilung über die Zeit etwa gleich. Bei Kiefer und Fichte fällt auf, dass die Klasse der 0-60-jährigen immer kleiner wird. Für Kiefer liegt der Grund im Übergang zur nächsten Altersklasse. Dadurch, dass die Bestände auch altersmäßig sehr ähnlich strukturiert sind, haben auch Ersatzbäume ein ähnliches Alter wie die ausgeschiedenen. Bei Fichte ist der Rückgang der Gesamtanzahlen am deutlichsten in der Altersklasse der 0-60-jährigen Fichten zu erkennen.

3.2 Standortsbedingungen

Durch den Bezug auf vier Bundesländer weisen die untersuchten WZE-Plots eine große Heterogenität hinsichtlich ihrer Standortsbedingungen auf (vgl. auch Abbildung 1). Der niedrigste Punkt liegt auf einer Höhe von 1 m ü. NN in der niedersächsischen Geest, der höchste auf 918 m im sachsen-anhaltinischen Hochharz. Dadurch und durch die unterschiedliche Entfernung zum Meer unterliegen die Waldbestände sehr unterschiedlichen Klimabedingungen. Auch die Exposition beeinflusst zusätzlich die Ausprägung der Witterung.

3.2.1 Klima

3.2.1.1 Mittlere Klimabedingungen im Zeitraum 1981 – 2010

Die Jahresmitteltemperaturen liegen, ebenfalls bezogen auf das langjährige Mittel 1981-2010, zwischen 4,6 °C auf dem höchstgelegenen Plot im sachsen-anhaltinischen Hochharz und 10,6 °C in der hessischen Rhein-Main-Ebene. Für die Vegetationszeiten ergeben sich für die gleichen Plots Werte zwischen 11,3 °C und 17,2 °C.

Die Jahresniederschläge auf den Plots liegen im langjährigen Mittel (Klimaperiode 1981-2010) zwischen 513 mm in der sachsen-anhaltinischen Magdeburg-Wittenberger Elbaue im Leebereich des Harzes und 1404 mm im niedersächsischen Oberharz. Für die Vegetationszeit liegen Niederschläge zwischen 260 mm in der Zellendorfer Fläming-Randplatte in Sachsen-Anhalt und 503 mm ebenfalls im niedersächsischen Oberharz vor.

3.2.1.2 Witterungsbedingungen 1984 – 2019

Die Witterungsbedingungen der im WZE-Zeitraum betrachteten Jahre 1984 bis 2019 sind geprägt vom globalen Trend des allmählichen Temperaturanstieges. Wie Abbildung 5 zeigt, gab es zwar einzelne Jahre wie 1984-87, 1996 oder auch 2010, die insgesamt kühler waren als der langjährige Durchschnitt von 1981-2010. Sie waren jedoch deutlich seltener als Jahre, die überdurchschnittlich warm waren. So lagen beispielsweise die Jahre 2014 bis 2019 deutlich über dem langjährigen Mittel.

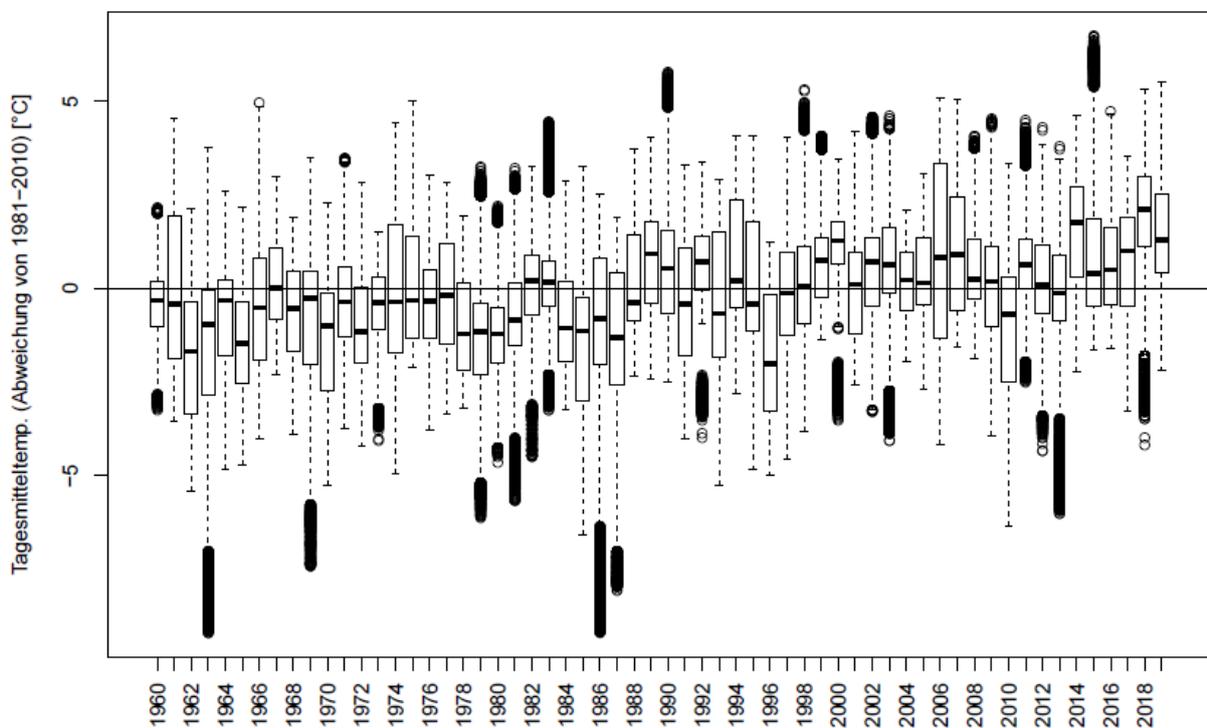


Abbildung 5: Entwicklung der mittleren Temperaturen (aus Tagesmittelwerten) als Abweichung vom langjährigen Mittel 1981 – 2010.

Die Erwärmung erfolgt nicht gleichmäßig über das Jahr. Einzelne Monate zeigen stärkere Trends, manche schwanken um den Durchschnittswert. Für den Monat April zeigt Abbildung 6, dass die Werte seit Ende der 90er Jahre, verstärkt jedoch seit etwa 2007 deutlich höher liegen als im langjährigen Mittel.

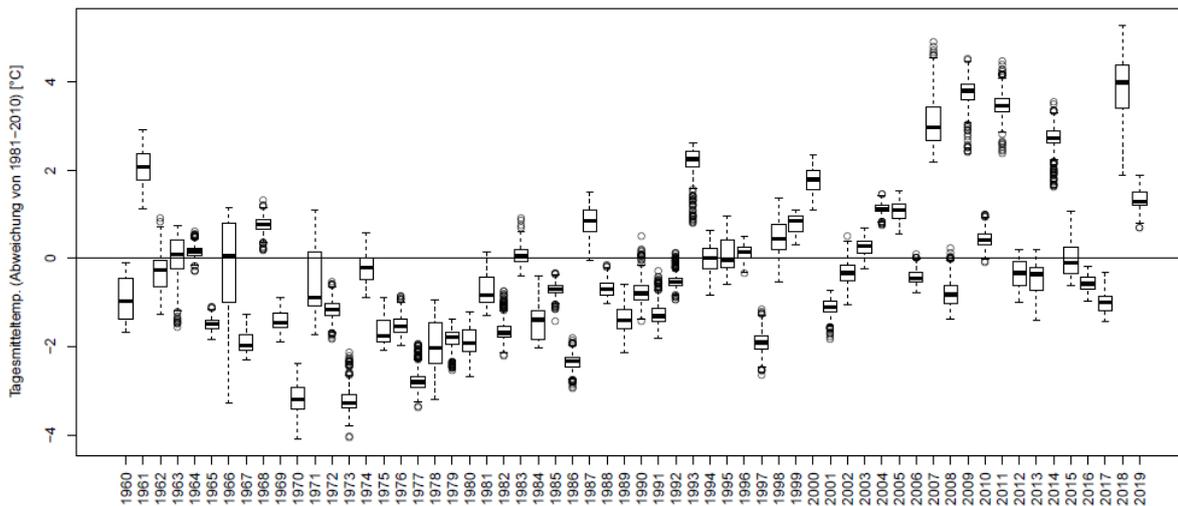


Abbildung 6: Entwicklung der Apriltemperaturen als Abweichung vom langjährigen Mittel 1981 – 2010.

Demgegenüber veränderten sich die Jahresniederschläge kaum (ohne Abbildung). Sie schwanken um das langjährige Mittel mit überdurchschnittlich feuchten Jahren wie 2002, 2007 oder 2017 sowie sehr trockenen Jahren wie 1996, 2003 oder 2018. Allerdings gibt es auch hier Monate, die einen stärkeren Trend zeigen als das gesamte Jahr. Abbildung 7 zeigt das am Beispiel des Monats April. Hier liegen fast alle Jahre seit 2008 mehr oder weniger deutlich unter dem Mittelwert 1981 – 2010.

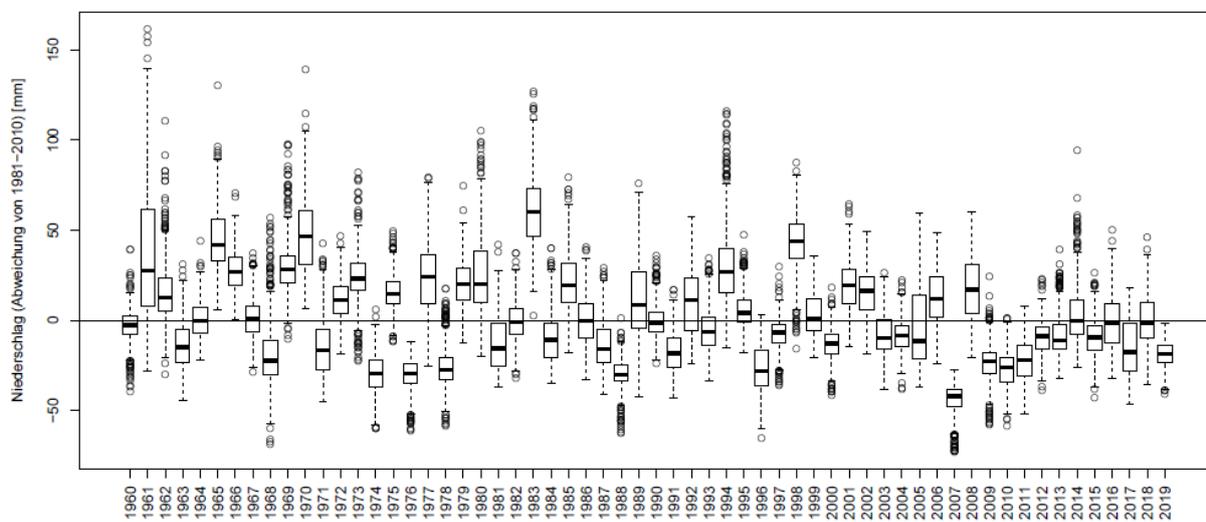


Abbildung 7: Entwicklung der Aprilniederschläge als Abweichung vom langjährigen Mittel 1981 – 2010

Durch die höheren Temperaturen ergibt sich eine Erhöhung der potentiellen Verdunstung, was in der Kombination mit zeitweise niedrigeren Niederschlägen zur Verringerung der Klimatischen Wasserbilanzen führt (KWB = Niederschlag - Verdunstung). Aus Abbildung 8 geht hervor, dass die Klimatische Wasserbilanz auf der Mehrheit der untersuchten Flächen seit 2011 (bis auf das Jahr 2017) unter dem Durchschnitt lag. Im Zeitraum davor gab es immer wieder auch Jahre wie 1994, 1998, 2002 oder 2007, die deutliche Abweichungen nach oben zeigten und damit insgesamt überdurchschnittlich feucht waren.

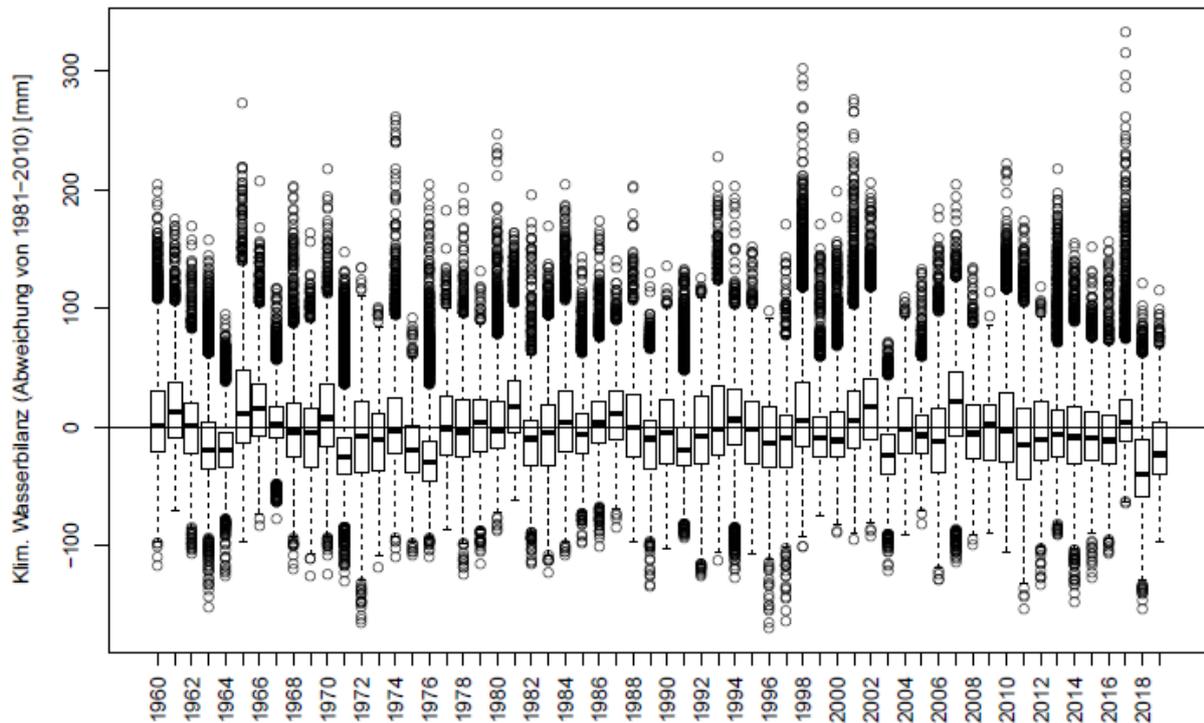


Abbildung 8: Klimatische Wasserbilanz der Jahre als Abweichung vom Mittelwert 1981 – 2010 auf den BZE-Plots in Hessen, Niedersachsen, Sachsen-Anhalt und Schleswig-Holstein.

Ein Extremjahr im gesamten Betrachtungszeitraum war das Jahr 2018. Für Hessen lag die mittlere Jahrestemperatur etwa 1,9 °C über dem langjährigen Mittel und die Niederschläge 215 mm unter der mittleren Jahressumme. Daraus ergab sich ein sehr hohes Trockenstresspotential. Das zeigt auch der Wert der jährlich gemittelten Klimatischen Wasserbilanz, der etwa 360 mm unter dem Mittelwert von 1981 – 2010 liegt (ohne Abbildung).

3.2.2 Substratgruppen und Trophie

Die Diversität der standörtlichen Bedingungen erschwert die übergeordnete Auswertung mit Standortbezug. Aus diesem Grund wurde jeder BZE-Plot von einer aus Bodenkundlern und erfahrenen Standortskartierern bestehenden Expertengruppe einer Substratgruppe zugewiesen. Die Gruppierung erfolgte nach folgenden Merkmalen: Ausgangssubstrat (Ausgangsgestein), Lagerung (Substrat-Lagerung), Bodenart, Bodenmorphologie und Bodenphysik. Das prägende Merkmal ist dabei das Ausgangsgestein (PAAR ET AL., 2016).

Von jeher nutzte der Mensch bessere, nährstoffreiche Böden eher land- als forstwirtschaftlich. Ausnahmen gibt es in Bereichen, die durch ihr Relief die landwirtschaftliche Bearbeitung erschweren. Am Beispiel der BZE-Flächen wird dies deutlich. Der Wald stockt überwiegend auf Böden mittlerer bzw. schwacher Nährstoffversorgung (Abbildung 10). Hierzu zählen beispielsweise Böden, die aus un- oder schwach verlehnten Sanden, Buntsandstein oder Lösslehm hervorgegangen sind (Abbildung 9). Nährstoffreichere Standorte sind bei Ausgangsgesteinen wie Basalt, Diabas oder Kalk zu erwarten, die im BZE-Datensatz nicht so häufig vorkommen (Abbildung 9).

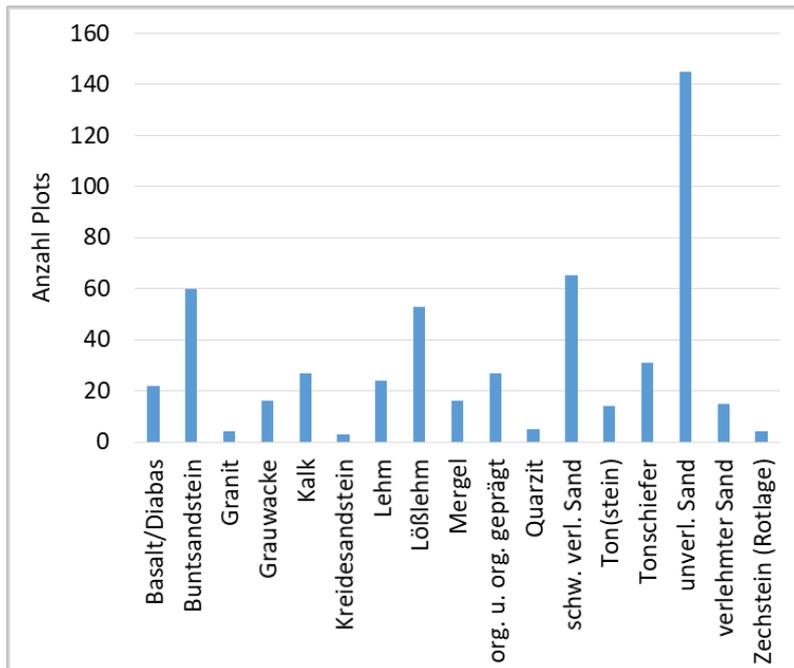


Abbildung 9: Häufigkeit der Substratgruppen bei den untersuchten Plots

Bezüglich der Baumartenverteilung nehmen Buchen und Eichen mit zunehmender Nährkraftstufe zu. Nährstoffarme Standorte werden von Kiefern dominiert. Die meisten Fichten stocken auf schwach mesotrophen und mesotrophen Standorten. Einen Überblick zur Baumartenverteilung nach Trophiestufen gibt Tabelle 5 zum Stichjahr 2019.

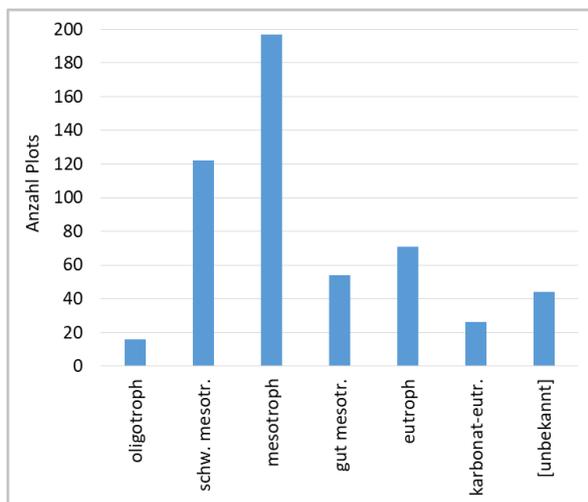


Abbildung 10: Häufigkeit der Trophiestufen bei den untersuchten Plots

Tabelle 5: Anzahl von Buchen, Eichen, Fichten und Kiefern nach Trophiestufe

Trophie, Stichjahr 2019	Buche	Eiche	Fichte	Kiefer
oligotroph	9	9	18	178
schw. mesotr.	230	92	435	1266
mesotroph	1002	311	602	1094
gut mesotr.	354	214	132	189
eutroph	660	283	85	82
karbonat-eutr.	201	63	45	60
[unbekannt]	280	58	173	87

3.2.3 Wasserhaushalt

Der Wasserhaushalt der meisten Plots wird als mäßig bis kaum frisch bzw. frisch bewertet (Abbildung 11). Auch mäßig trockene oder auch feuchte Standorte werden durch BZE-Plots repräsentiert. Nasse, betont frische und wechselfeuchte Standorte sind selten. Keine Relevanz haben im BZE-Kollektiv die trockenen Standorte.

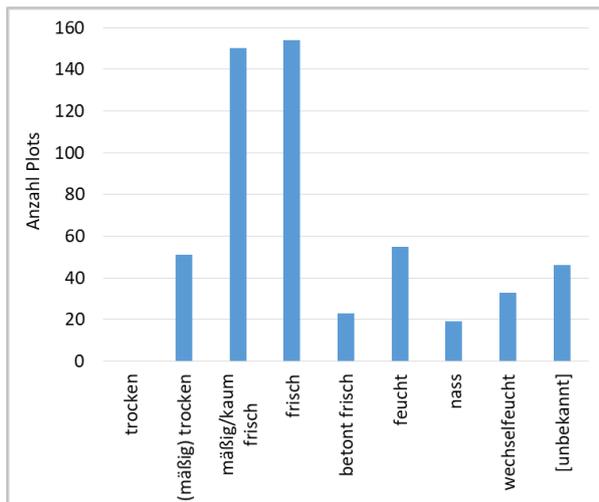


Tabelle 6: Anzahl von Buchen, Eichen, Fichten und Kiefern auf Standorten, nach Wasserhaushaltsstufe

WHH, Stichjahr 2019	Buche	Eiche	Fichte	Kiefer
(mäßig) trocken	246	102	97	423
mäßig/kaum frisch	431	255	376	1334
frisch	1363	331	450	419
betont frisch	223	49	104	56
feucht	37	150	135	488
nass	1	33	19	57
wechselfeucht	155	52	136	92
[unbekannt]	280	58	173	87

Abbildung 11: Häufigkeit der Wasserhaushaltsstufen bei den untersuchten Plots

Tabelle 6 gibt einen Überblick zur Baumartenverteilung nach Wasserhaushaltsstufen zum Stichjahr 2019. Buchen stocken vor allem auf mäßig/kaum frischen und frischen Standorten. Ähnliches ist für Eiche und Fichte zu erkennen, wobei Buchen und Fichten auch wechselfeuchten Standorten zuzuordnen sind. Kiefern dominieren die extremen Standorte.

3.3 Muster von Vitalitätskenngrößen

Muster sind nicht-zufällige Anordnungen verschiedener Ausprägungen eines Merkmals in Raum und Zeit. Über die Auflösung eines Musters bestimmt neben der räumlichen und zeitlichen Auflösung die Anzahl der vorhandenen Merkmalsausprägungen. Für die im Projekt durchgeführten Musteranalysen wurden die Vitalitätskenngrößen in zweckmäßige Klassen unterteilt. Im Fall der Fruktifikation konnten die vorgegebenen Klassen übernommen werden (vgl. Tabelle 1). Für Kenngrößen wie Kronenverlichtung oder Vergilbung, die als Prozentangaben in einer Auflösung von 5 % vorliegen, wurden maximal 10 Klassen ausgewiesen.

Abbildung 12 zeigt beispielhaft eine Mustertabelle für die Kronenverlichtung (KV) ausgewählter Buchen. Für die Auswahl der Einzelbäume waren einerseits eine lange Zeitreihe und andererseits die Repräsentanz aller vier Bundesländer ausschlaggebend, Altersangaben wurden nicht berücksichtigt. Die Darstellung zeigt also Muster, die sowohl

- altersbedingt (allmähliche KV-Erhöhung von Einzelbäumen, z. B. Baum-ID „Ni 00206 Baum34-K01“)
- witterungsbedingt (zeitweise, auch über mehrere Jahre andauernde Erhöhung der KV, danach Erholung möglich, z. B. Baum-ID „He 10206 Baum16-K01“ nach 2003) oder
- durch Fruktifikation (jahresweise etwas höhere KV, danach wieder Erholung, z.B. das Jahr 2011 bei einigen Buchen)

verursacht sein können.

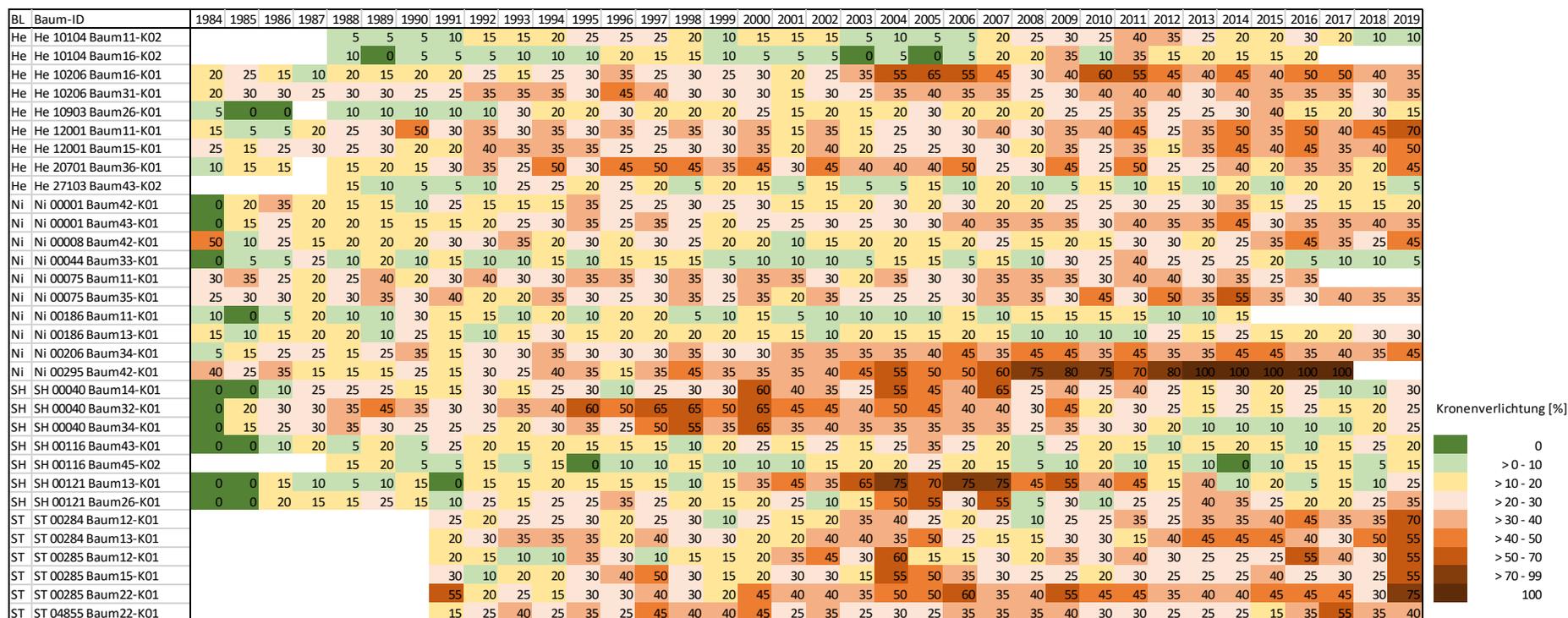


Abbildung 12: Mustertabelle für Kronenverlichtung bei ausgewählten Buchen.

Tabelle 7: Optisch erkennbare Muster für Vitalitätskenngrößen bei den Hauptbaumarten

Kenngröße	Buche	Eiche	Fichte	Kiefer
Vergilbung	90er Jahre, individuell	sehr vereinzelt	räumlich, Anfang 90er	90er Jahre, individuell
Fruktifikation	zeitlich, überregional, individuell	Daten nicht zuverlässig	zeitlich, überregional, individuell	schwach zeitlich
Kronenverlichtung	zeitlich, räumlich (kleinräumig), individuell			
Schädlingsbefall	sehr vereinzelt	periodisch, teilweise überregional		
Mortalität	vereinzelt	vereinzelt	räumlich, zeitlich	räumlich (kleinräumig)

Die beiden erstgenannten Muster lassen sich auch bei den anderen Baumarten erkennen. Zudem ist für alle Baumarten zu erkennen, dass die Musterausprägung regional unterschiedlich sein kann. Nur sehr starke und großräumig ähnlich wirkende Einflüsse (z.B. die überregionale Dürre im Jahr 2018) pausen sich über alle aufgenommenen Plots und Baumarten durch. Ähnlich sind oft Muster für die Bäume eines Bestandes. Die Abbildungen hierzu sind aufgrund ihres Umfangs dem Bericht nicht angehängt. Tabelle 7 fasst die visuell erfassbaren Muster für die wichtigsten Vitalitätskenngrößen aller vier Hauptbaumarten zusammen.

Die zeitlichen Veränderungen zeigen die Diagramme von Abbildung 13 für alle vier Baumarten. Gut zu erkennen sind die erhöhten Werte der 90er Jahre und am Ende der Zeitreihe. Bei der Eiche fallen neben hohen Werten Mitte der 90er Jahre die Jahre 2011 und 2012 mit Peaks in der Kronenverlichtung auf.

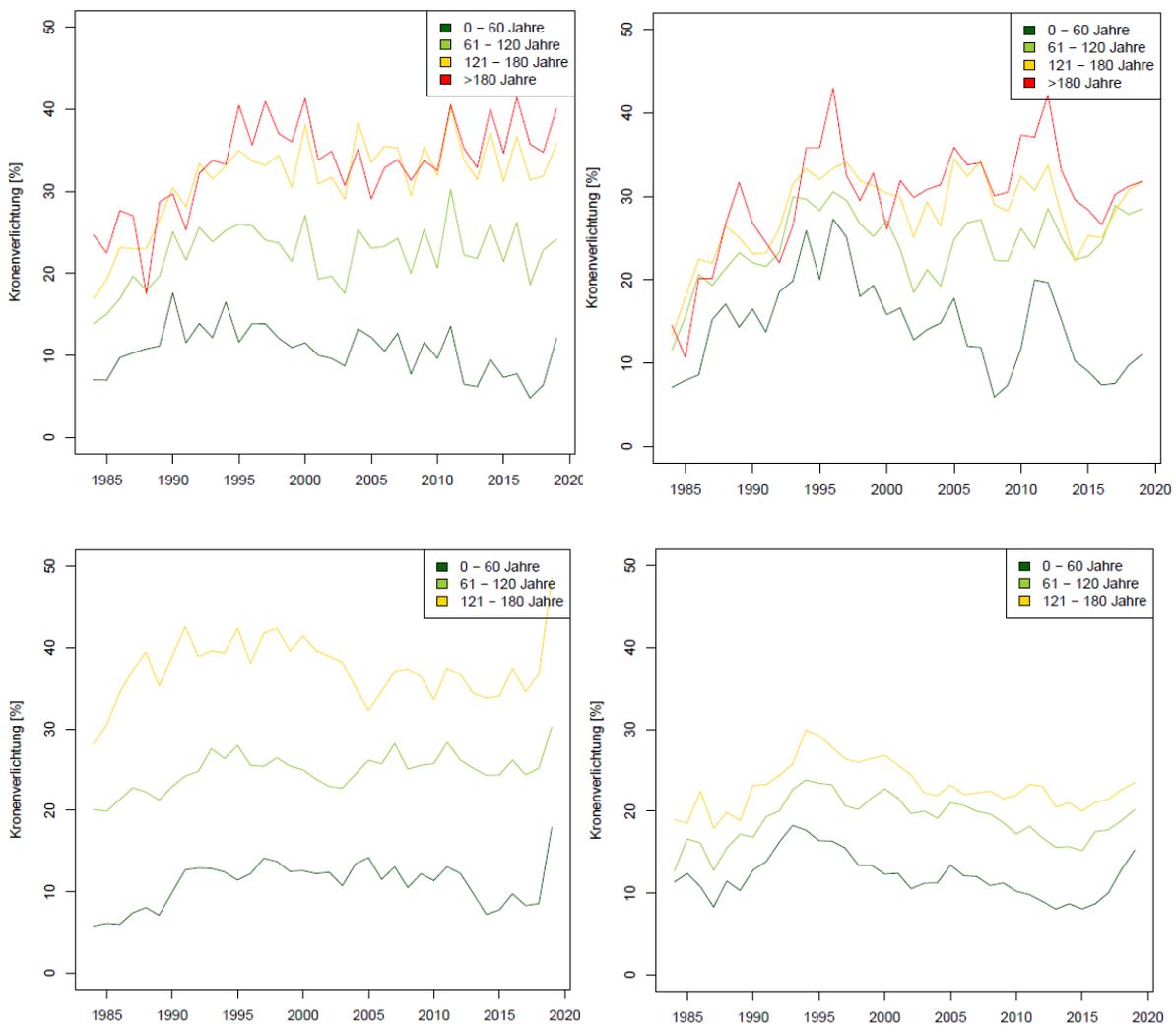


Abbildung 13: Mittlere Kronenverlichtung bei Buche (oben links), Eiche (oben rechts), Fichte (unten links) und Kiefer (unten rechts) nach Altersklassen

Für die Fruktifikation konnte auf diese Weise deutlich nachgewiesen werden, dass Mastjahre bei Buche und Fichte weitestgehend synchron auftreten. Es sind starke Mast- und Nichtmastjahre erkennbar. Für Eiche sind Aussagen zur Fruktifikation nur bedingt möglich, da zum Zeitpunkt der Aufnahmen die Früchte noch zu klein sein können, um zuverlässig gesehen werden zu können. Daher sind Nichtmastjahre nicht eindeutig zuzuordnen. Kiefern zeigen kein ausgeprägtes zeitliches Muster in der

Fruktifikation, regional lassen sich einzelne Mastjahre wie 2004 erkennen. Die Jahre 2009, 2011 und 2016 sind im Gesamtzeitraum auffällig, da hier alle Baumarten stark fruktifizierten.

Die Vergilbung kann ein Indikator einer mangelhaften Nährstoffverfügbarkeit, aber auch für sauren Regen sein. Aktuell werden bei allen Baumarten nur vereinzelt Anzeichen von Vergilbung aufgenommen. Anfang der 90er Jahre gab es überregional bei vielen Baumarten starke Vergilbungen, die mit Abklingen der Säuredeposition verschwanden.

Schäden durch Pilze oder Insekten treten überwiegend periodisch und regional auf. Vor allem bei Fichte und Eiche sind oft alle Bäume eines Bestandes betroffen. Die Buche ist von den Hauptbaumarten am seltensten betroffen.

Die für Buchen in Hessen aufgenommenen Zuwachsinformationen zeigen, dass der jährliche Durchmesserzuwachs im aufgenommenen Zeitraum zwischen 2005 und 2019 im Mittel bei etwas über 1 % liegt. Es gibt Jahre mit überwiegend hohen (2007, 2008, 2012) und Jahre wie 2005, 2011, 2016 oder 2017 mit niedrigem Zuwachs.

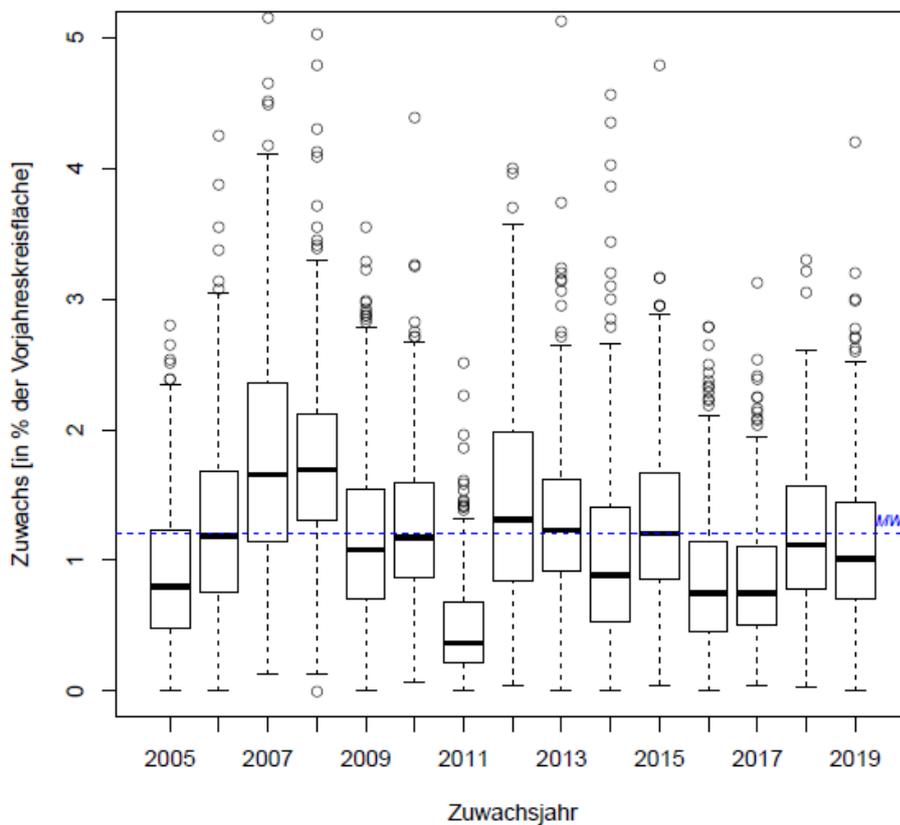


Abbildung 14: Dickenzuwachs bei Buchen in Hessen, angegeben als prozentualer Zuwachs bezüglich der Vorjahreskreisfläche. Es wurden nur Buchen ausgewählt, deren Datenreihen vollständig sind (n = 70 pro Jahr)

Ein synchrones Verhalten innerhalb der Plots scheint nur in Einzelfällen stärker zu sein als zwischen den Plots. Mit Hilfe des R-Packages `pointRes` wurde versucht, Weiserjahre zu detektieren. Die Methode beruht auf einem Vergleich des jährlichen Zuwachses mit dem Zuwachs des Baumes im 5-jährigen gleitenden Mittel und ordnet ab einer bestimmten Abweichung nach oben bzw. unten das Jahr als extrem negativ, stark negativ, schwach negativ bzw. schwach/stark oder extrem positiv ein (vgl. CROPPER 1979). Jahre, die sich nicht stark vom Mittelwert unterscheiden, werden als „ohne Abweichung“ bewertet. Das Jahr 2011 fällt als negatives Weiserjahr auf. In 15 % der Fälle wurde das Jahr als extrem negatives Weiserjahr für den Zuwachs erkannt, in 41 % als stark negatives und 19 % als schwach negatives Weiserjahr bezüglich des Zuwachses. Damit ist das Jahr 2011 das Jahr mit der deutlichsten Abweichung vom jeweils gleitenden Mittel.

Insgesamt muss bemerkt werden, dass der Aussagekraft der Analyse durch die Kürze der Zeitreihen Grenzen gesetzt sind. Bei dieser Art der Analyse ist es wichtig, dass nach einer Störung noch „normale“ Jahre folgen, da sonst die Erholung des Baumes nicht zu beurteilen ist. Gerade die trockenen Jahre 2018 und 2019 markieren aktuell das Ende der Zuwachszeitreihen und sind in dieser Hinsicht noch nicht auswertbar.

Auch bei der Mortalität sind Muster erkennbar. Sie pausen sich sowohl zeitlich als auch vor allem bei Fichte räumlich durch. Zeitlich sind Jahre mit hoher Mortalität erkennbar, wobei das Phänomen meist langsam ausklingt.

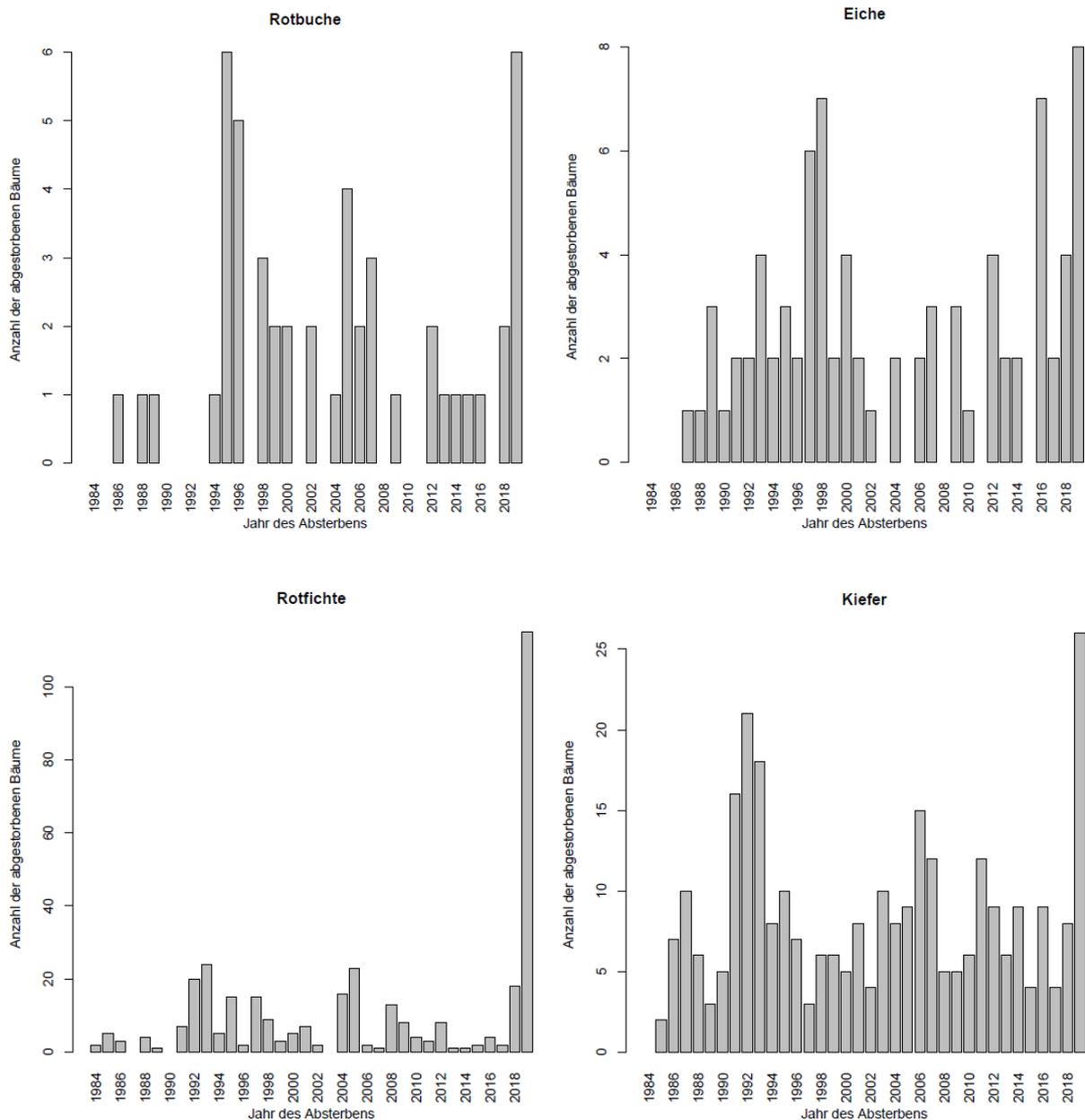


Abbildung 15: Anzahl abgestorbener Bäume (100 % Kronenverlichtung) pro Jahr, nach Hauptbaumarten getrennt, in Hessen, Niedersachsen, Sachsen-Anhalt und Schleswig-Holstein

Insgesamt starben 49 Buchen und 81 Eichen ab, was im Vergleich zu 349 Fichten und 301 Kiefern wenige Einzelindividuen sind. Abbildung 15 zeigt für die 4 Hauptbaumarten, dass es Jahre mit gehäuftem Absterben gibt. Für Buche waren das die Jahre 1995, 1996, 2005 und 2019, für Eiche 1997/98,

2016 und 2019. Fichten starben mit großem Abstand am häufigsten im Jahr 2019 ab, Kiefern in den Jahren 1991 bis 1993, 2006 oder 2019. Es muss hier nochmals darauf hingewiesen werden, dass es für die Zahl der toten Bäume keine Garantie auf Vollständigkeit gibt. Gerade bei Fichte wird mit Blick auf die Bestandesgesundheit streng darauf geachtet, dass sich möglichst wenig tote Bäume im Bestand befinden, um die Ausbreitung des Borkenkäfers zu verhindern. Bäume, die also rechtzeitig und schnell entnommen wurden, können im hier vorgestellten Datensatz nicht auftauchen. Die hohe Zahl stehend toter Fichten im Jahr 2019 macht das Ausmaß der Schadsituation insofern deutlich, dass es den Forstbetrieben nicht mehr möglich war, die toten Bäume schnellstmöglich zu entfernen. So steht das Jahr 2019 – nicht nur bei Fichte – für ein Jahr mit einem bisher nicht bekannten Schadausmaß.

3.4 Einflüsse auf die Kronenverlichtung

Durch Alterungsprozesse und Umwelteinflüsse ändern sich bei Bäumen die Belaubungsdichte und die Verzweigungsarchitektur. Die Kronenverlichtung gilt dadurch als ein unspezifisches Merkmal, das die Baumreaktion auf die Summe aller Stressoren wiedergibt. In der Waldzustandserhebung wird die Kronenverlichtung, abgesehen von mechanisch verursachten Schäden (z.B. Kronenbruch durch Wind), ursachenunabhängig bewertet. Weiterführende Informationen zu Methodenbeschreibungen geben die Waldzustandsberichten (z. B. EICHHORN ET AL. 2020 a).

Im Projekt wurde versucht, die unterschiedlichen Ursachen für Kronenverlichtung einzeln zu betrachten. Infolge des Umfangs des Datensatzes war es in vielen Fällen möglich, Cluster zu bilden.

3.4.1 Alter

Wie bei allen anderen Baumarten bedingt der natürliche Alterungsprozess auch bei den Hauptbaumarten Buche, Eiche, Fichte und Kiefer eine sukzessive Erhöhung der Kronenverlichtung. Sie liegt im Alter bis 60 Jahren bei allen Baumarten bei im Mittel 10 % und steigt über etwa 25 % im Alter bis 120 Jahren auf ca. 30 % bei über 120-jährigen Bäumen. Bei der Eiche sind die Unterschiede zwischen den Altersgruppen 60-120, 120-180 und 180-240 Jahre gering. Kiefern haben ab 60 Jahren eine etwa 10 % geringere Kronenverlichtung als die anderen Baumarten (vgl. auch Abbildung 13).

Aus den Waldzustandsberichten ist die getrennte Betrachtung junger, unter 60 Jahre alter Bestände und älterer Bestände bekannt, die diesen Einflüssen Rechnung trägt. Die folgende Abbildung 16 verdeutlicht den Alterseffekt auf die Kronenverlichtung bei Buche, Eiche, Fichte und Kiefer.

Bei Betrachtung der ältesten Altersklasse muss berücksichtigt werden, dass die Fallzahlen hier jeweils deutlich niedriger sind als in den anderen Altersklassen. Die Aussagen für diese Altersklassen gelten daher nicht als belastbar. Die Ordinate der Grafik wurde aus Gründen der besseren Übersicht bei 50 % gekappt. In allen Altersklassen bis auf der letzten kommen immer auch Fälle bis zu 100 % Kronenverlichtung vor.

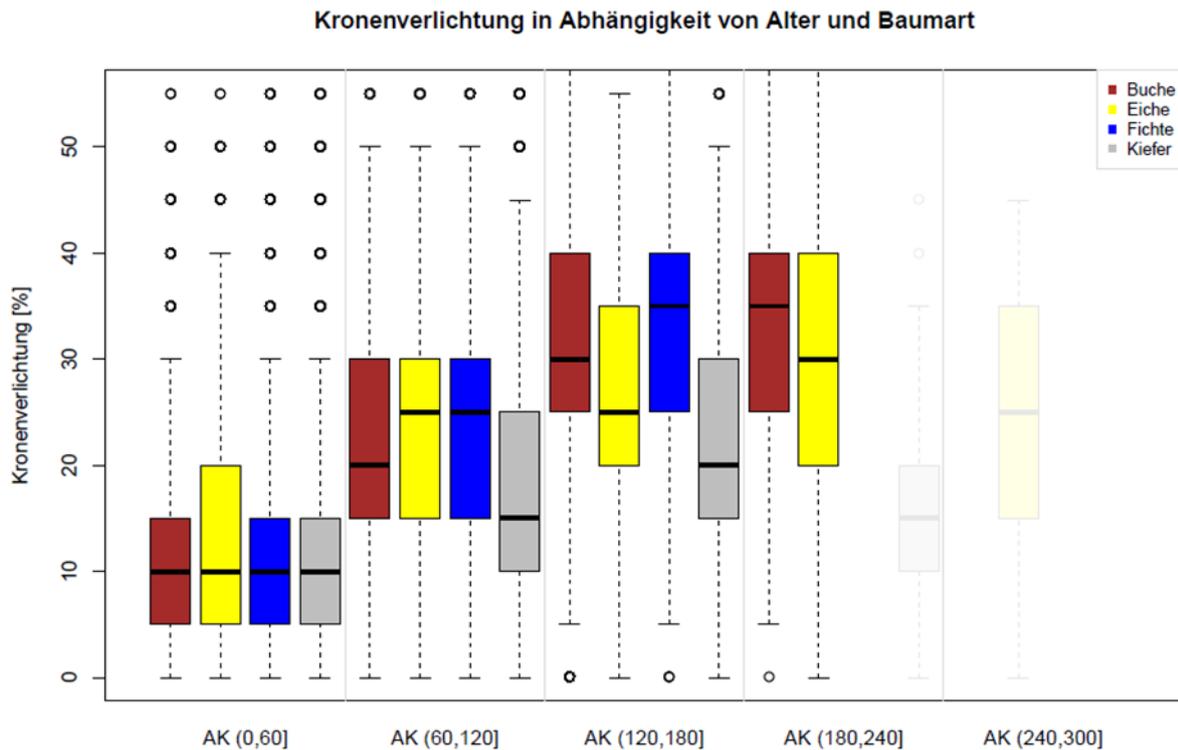


Abbildung 16: Abhängigkeit der Kronenverlichtung von Alter und Baumart.

Tabelle 8: Anzahl von Bäumen der jeweiligen Altersklassen und Baumarten in Abbildung 16.

Baumart	AK (0, 60]	AK (60, 120]	AK (120, 180]	AK (180, 240]	AK (240, 300]
Buche	795	1690	1859	76	
Eiche	256	356	425	64	2
Fichte	2400	2056	432		
Kiefer	1993	2094	643	3	

Ein Vergleich zwischen den Baumarten ist vor allem im Hinblick auf die unterschiedliche Lebensdauer nicht sinnvoll. Bei Buche liegt die Umtriebszeit zwischen 120 und 140 Jahren, bei Eiche zwischen 180 und 300, bei Fichte zwischen 80 und 120 und bei Kiefer zwischen 100 und 120 Jahren. Damit befindet sich eine 120-jährige Eiche in einem anderen Lebensabschnitt als eine gleichaltrige Fichte, was den direkten Vergleich zwischen den absoluten Kronenverlichtungswerten beider Bäume verbietet.

3.4.2 Kronenstruktur

Zusätzlich zum umfangreichen Datensatz der WZE liegen für einen Teil der Buchen und Eichen Angaben zur Kronenstruktur nach ROLOFF (2018) vor. Dieses Vitalitätskennzeichen baut auf der baumartenspezifischen Architektur von Baumkronen auf und erklärt die Veränderung von Baumkronen durch Alterung und Stress mit der Ausbildung kürzerer, sich weniger verzweigender Triebe (ROLOFF, 2018). Eine stressbedingte Verschlechterung der Kronenstruktur kann sich dabei durchaus wieder regenerieren.

Eine Verschlechterung der Kronenstruktur geht zwangsläufig mit der Erhöhung der Kronenverlichtung einher (Abbildung 17).

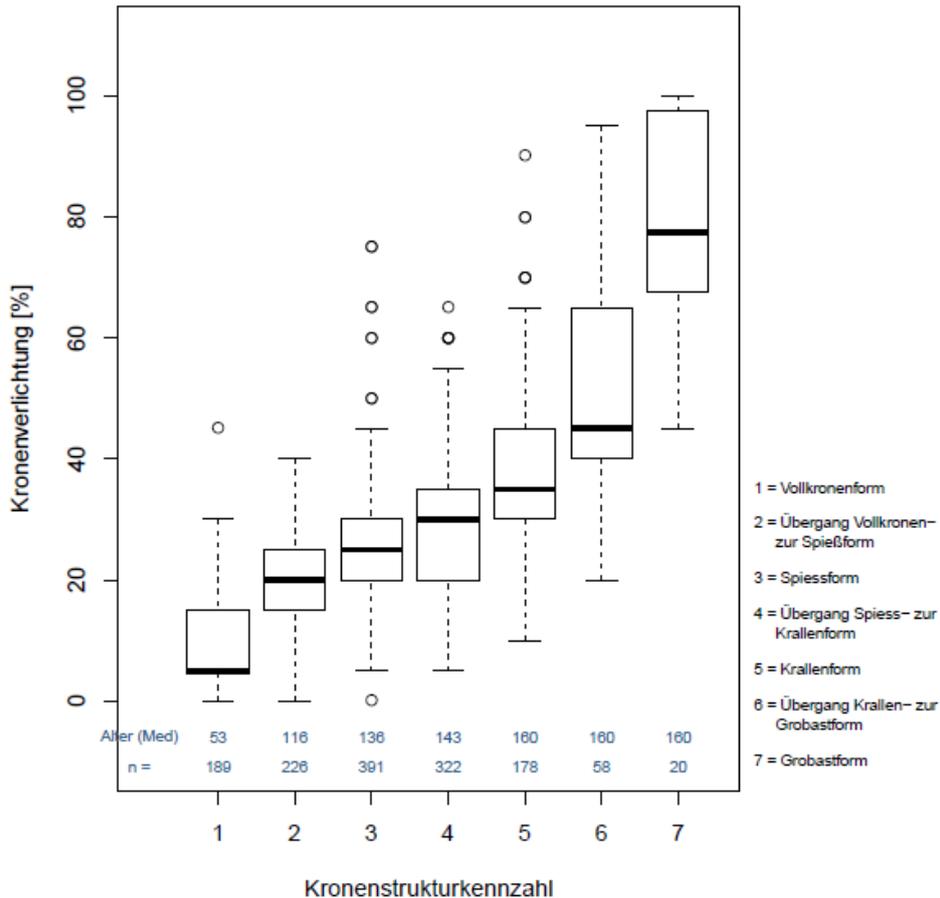


Abbildung 17: Zusammenhang zwischen Kronenstruktur nach Ro-loff und Kronenverlichtung bei Buche.

Umfangreich ausgewertet wurde der Datensatz zur Kronenstruktur im Rahmen einer Masterarbeit (WULF, 2020). Sie ist dem Bericht beigelegt. Hauptergebnisse der Arbeit sind:

- dass sich die Buche in ihrer Kronenstruktur besser regeneriert als bisher in der Literatur angenommen,
- dass Buchen mit einer geringeren potenziellen Wasserversorgung eine geringere Schädigung der Kronenstruktur vorweisen. Das weist darauf hin, dass die Buche sich an eine geringe Wasserversorgung anpassen kann.
- dass jüngere Buchen, die stärker fruktifizieren als andere, eine schlechtere Kronenstruktur haben.

Die Untersuchung der Eiche verdeutlicht, dass eine vielfältige Bestandesstruktur einen positiven Einfluss auf die Kronenstruktur hat. Allgemein lässt sich festhalten, dass die Reaktionszeit der Kronenstruktur geringer ist als die der Buche (WULF, 2020).

3.4.3 Fruktifikation bei Buche

Aus der Waldzustandserhebung ist bekannt, dass die Kronenverlichtung in Jahren starker Fruktifikation höher geschätzt wird als in Jahren mit geringer oder ohne Fruktifikation. Dieses Phänomen wird als reversibel beurteilt, so dass dieser Anstieg der Kronenverlichtung nicht als Vitalitätsverlust zu deuten ist.

Der Zusammenhang zwischen der Ausprägung der Kronenverlichtung und der Mastintensität einzelner Buchen wird in Abbildung 18 verdeutlicht. In diese Untersuchung sind nur Buchen in Niedersachsen eingegangen, die der Baumklasse 1 (herrschend) angehören und mit 120 bis 180 Jahren ähnlich alt sind. Sie unterscheiden sich nach ihrem Mastindex (MI), d.h. nach ihrer mittleren Fruktifikationsstärke. Dieser Wert kann bei minimal 0 (der Baum hat nie Früchte) und maximal 1,5 (der Baum fruktifiziert jedes Jahr sehr stark) liegen. Aus der Grafik wird deutlich, dass Bäume mit geringerem MI eine bessere Belaubung aufweisen als Bäume, die häufig und stärker fruktifizieren.

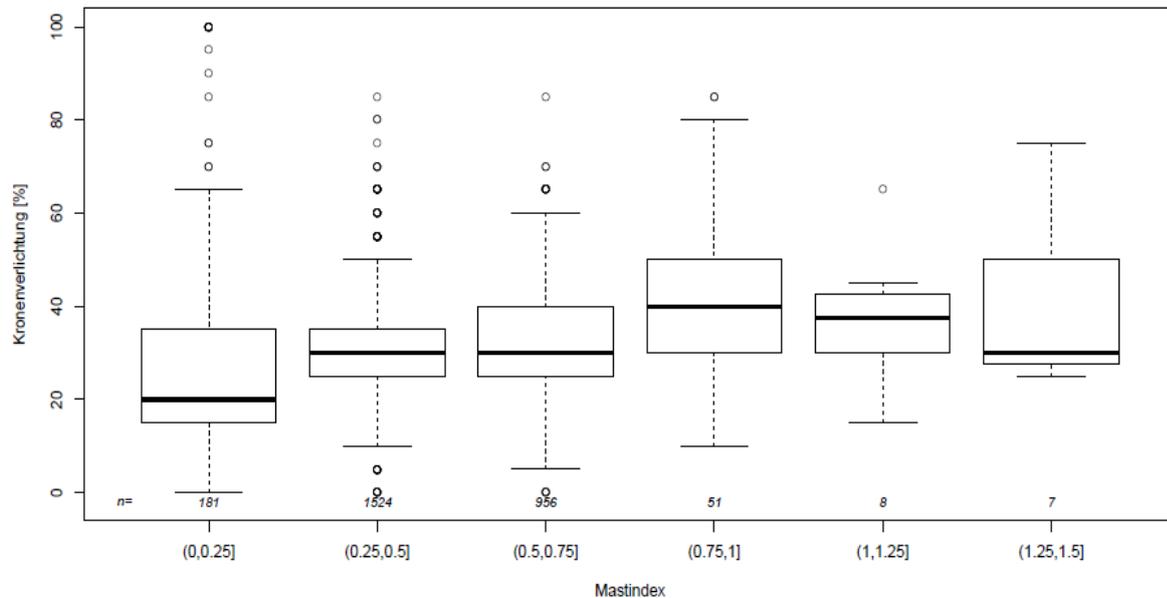


Abbildung 18: Vergleich der Kronenverlichtung bei Buche (120-180 Jahre, 1. BKL, Niedersachsen) bei unterschiedlicher mittlerer Mastintensität (MI)

Durch den Vergleich von Mustertabellen (vgl. Abbildung 12) fiel auf, dass die Kronenverlichtung in starken Mastjahren erhöht ist. Dieses Phänomen ist im Folgejahr verschwunden. Die Ursache dafür ist bisher noch unbekannt. Klar ist, dass die Blüte bzw. später die Frucht nicht anstelle eines Blattes am Zweig sitzt und dieses sozusagen verdrängt. Im Gegenteil sitzt die weibliche Blüte stets in einer Blattachsel, die männliche teilweise auch in der Achsel einer Knospenschuppe (Abbildung 19).

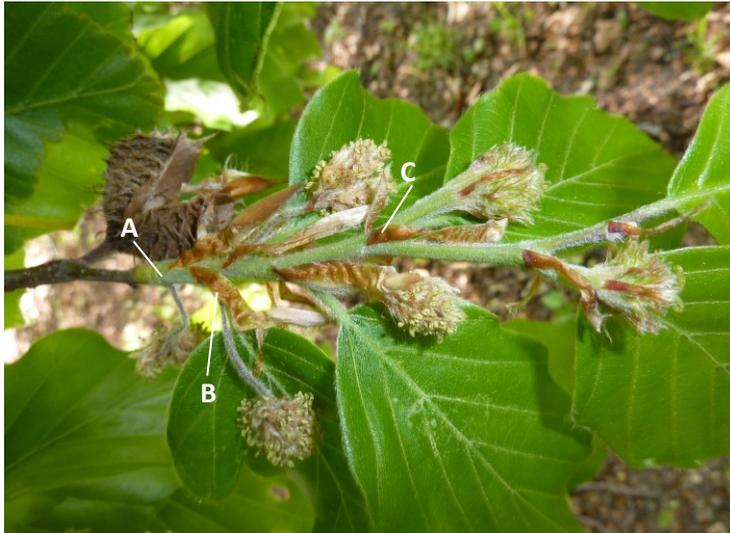


Abbildung 19: Buchenzweig mit Blüten. Männliche Blüte in Knospen-schuppenachsel (A), männliche Blüte in Blattachsel (B), weibliche Blüte in Blattachsel (C). Foto: Klinck, 2020

3.4.4 Witterung

Die Tatsache, dass eine Erhöhung der Kronenverlichtung und das Absterben von Bäumen in Einzeljahren verstärkt auftreten, lässt den Schluss zu, dass die sich jährlich ändernden Witterungsbedingungen einen erheblichen Einfluss darauf haben. Vor diesem Hintergrund wurden zwei Teildatensätze von Bäumen jeweils einer Baumart aus dem WZE-Datensatz extrahiert:

1. Fälle, in denen sich die Kronenverlichtung innerhalb eines Jahres um mehr als 50 % verschlechterte
2. Fälle, in denen sich die Kronenverlichtung um mehr als 25 % verbesserte.

Die Kronenverlichtung bezieht sich dabei stets auf die Sommeraufnahme im Juli/August. Beide Schwellenwerte sind extrem. Sie wurden gewählt, weil sie für alle Baumarten hinsichtlich der Aussagekraft Gültigkeit besitzen und bei ihrer Anwendung bei allen Baumarten bezüglich des Stichprobenumfangs relativ vergleichbare Gruppen entstanden.

Für beide Gruppen wurden die jeweils an den Plots und in den Jahren herrschenden Witterungsbedingungen zugewiesen und verglichen. Dabei fanden neben standardmäßig erhobenen Wetterdaten wie Tagesmitteltemperaturen, Tagesniederschlagssummen oder tägliche Summen der Globalstrahlung eine Vielzahl aggregierter und verrechneter Witterungsdaten Berücksichtigung. Explizit soll hier auf die Größe der Klimatischen Wasserbilanz (KWB) eingegangen werden, die sich aus der Niederschlagssumme abzüglich der potentiellen Verdunstung innerhalb eines definierten Zeitraumes ergibt. Diese Größe erlaubt eine Aussage über ein mögliches Wasserdefizit im Fall einer KWB mit negativen Werten innerhalb des Bezugszeitraumes, wobei nicht nur der gefallenen Niederschlag, sondern auch der temperaturabhängige Verdunstungsanspruch eingeht.

Die Klimatische Wasserbilanz wurde auf verschiedene Arten verrechnet, die jeweils unterschiedliche Aussagen zulassen:

1. KWB als Summe über das gesamte Jahr: sollte etwa ausgeglichen, also nahe Null sein
2. KWB als Summe über die Vegetationszeit, die hier pauschal von April bis September eingeht: kann deutlich negativ werden, je negativer, desto größer der Wasserstress
3. KWB als Summe über die Vegetationsruhe, hier definiert als Zeitraum von Oktober bis März: sollte deutlich positiv sein, um die Bodenwasserspeicher wieder aufzufüllen

4. Das Minimum der kumulativ über die Tage der Vegetationszeit summierten KWB: zeigt das Ausmaß einer Trockenperiode ohne zwischenzeitlichen Niederschlag deutlicher an als die Summe über den Zeitraum.
5. Das Mittel der kumulativ über die Tage der Vegetationszeit summierten KWB: ähnliche Aussagekraft wie die Summe über den Zeitraum.

Da davon ausgegangen wird, dass die Bäume an die langjährig herrschenden Bedingungen angepasst sind und nur auf Extreme reagieren, sind alle Größen nicht absolut, sondern als Abweichung vom langjährigen Mittelwert der Jahre 1981-2010 angegeben. So ist es außerdem möglich, Regionen mit unterschiedlich ausgeprägter Klimafärbung wie z.B. küstennahe Räume und Hochlagen des Harzes miteinander zu vergleichen. Diese Größen wurden sowohl für das jeweilige Bezugsjahr der Aufnahme der Kronenverlichtung berechnet als auch das Vorjahr bis zu 3 Jahre davor, damit auch längerfristige bzw. verzögerte Reaktionen abgebildet werden.

Aus Abbildung 20 geht hervor, dass eine besonders negative Klimatische Wasserbilanz in der Vegetationszeit bereits im gleichen Jahr Auswirkungen auf die Kronenverlichtung bei Buche, Eiche und Fichte zu haben scheint. Die Unterschiede zur Gruppe der sich erholenden Bäume sind jeweils hochsignifikant. Bei Kiefer ist kein Effekt zu erkennen. Die KWB der Vegetationszeit des Vorjahres hat demgegenüber bei allen Baumarten einen Effekt. Liegt sie in diesem Zeitraum deutlich unter dem Durchschnitt, erhöht sich die Kronenverlichtung im Folgejahr bei allen Baumarten signifikant gegenüber Jahren mit überdurchschnittlicher KWB. Für Buchen scheint es so, als würde eine unterdurchschnittliche KWB der Vegetationszeit zwei Jahre später zu verringerten Kronenverlichtungen führen.

Abweichung der KWB (Summe der Vegetationszeit April – September) vom Mittelwert 1981-2010

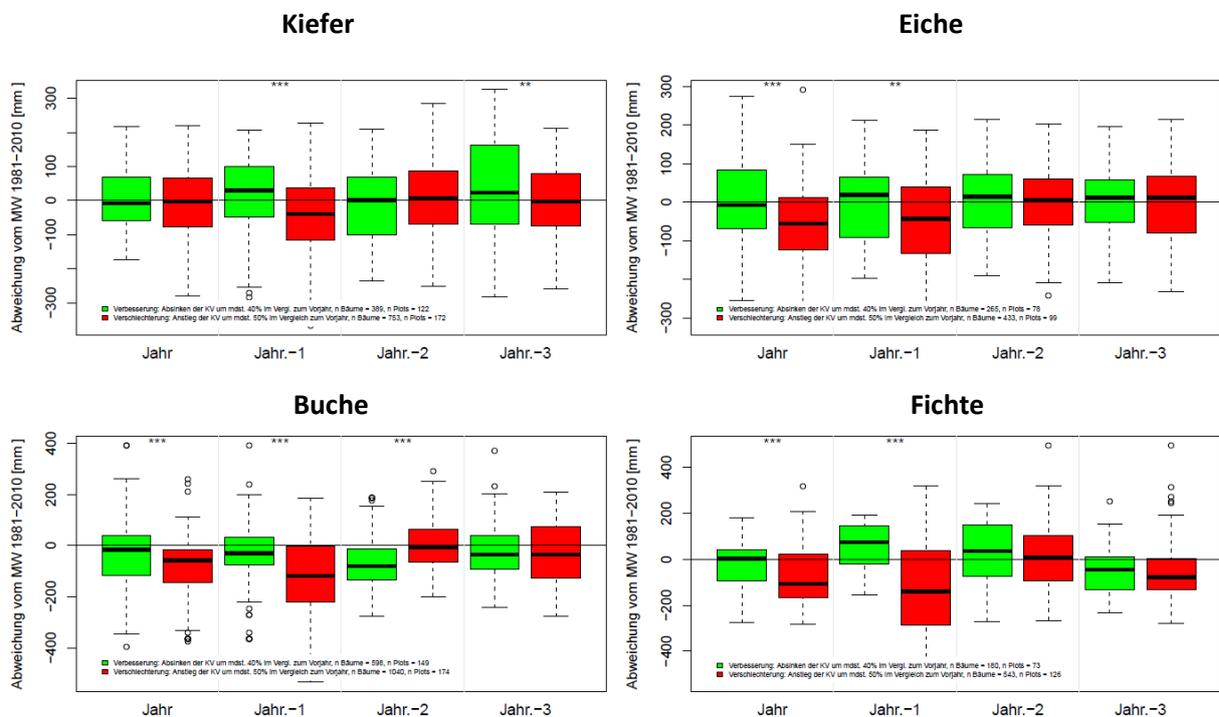


Abbildung 20: Auswirkungen von Abweichungen der über die Vegetationszeit (Apr-Okt) aufsummierten Klimatischen Wasserbilanz im Vergleich zum 30-jährigen Mittel 1981-2010 auf die Kronenverlichtung von Kiefer (links oben), Eiche (rechts oben), Buche (links unten) und Fichte (rechts unten). Betrachtungszeiträume sind das Jahr der Aufnahme der Kronenverlichtung („Jahr“), das jeweilige Vorjahr (Jahr-1) bzw. 2 (Jahr-2) und 3 (Jahr-3) Jahre vor der Aufnahme. Grün: Kronenverlichtung wird deutlich geringer, rot: Kronenverlichtung erhöht sich deutlich

Diese Auswertungen wurden für alle relevanten Witterungskenngrößen durchgeführt. Teilweise wurden so Erkenntnisse bestätigt, wie zum Beispiel bei der Betrachtung der Temperatur (Anhang 7). Hohe Temperaturen vor allem im Sommer lassen auf eine geringe KWB schließen. Eine bestimmte Witterungsausprägung wird demnach durch unterschiedliche Kenngrößen beschrieben. Für den Sommer 2018 sind das hohe Temperaturen, geringe (bis keine) Niederschläge, geringe Luftfeuchte, hohe Sonneneinstrahlung, hohe Verdunstung und in der Folge all dieser Faktoren eine sehr niedrige Klimatische Wasserbilanz.

Neben sommerlicher Trockenheit haben auch milde Winter einen negativen Einfluss auf den Kronenzustand, wobei die Reaktion hier zeitlich stark verzögert auftritt (Anhang 10). Eine Zusammenstellung der wichtigsten Witterungskenngrößen, die zu einer Erhöhung der Kronenverlichtung bei den Hauptbaumarten führen, gibt Tabelle 9.

Tabelle 9: Wichtigste Witterungsbesonderheiten, die zu einer Erhöhung der Kronenverlichtung bei Buche, Eiche, Fichte und Kiefer führen. Es sind nur Merkmale aufgenommen, die eine deutliche Abweichung vom langjährigen Mittel 1981-2010 zeigen.

Baumart	<u>Jahr</u>	<u>Vorjahr</u>	<u>Jahr -2</u>	<u>Jahr -3</u>
Buche	Längerer Zeitraum mit negativer KWB und hoher Strahlung in der Vegetationszeit, hohe Jahresmittel- und Wintertemperaturen	Stark negative KWB in Vegetationszeit und Jahr, geringe Niederschläge in Vegetationszeit und Jahr, höhere Strahlung in der Vegetationszeit	Positive KWB (über längeren Zeitraum im Jahr), höhere Jahresniederschläge und -temperaturen, geringere Strahlung in Vegetationszeit und Jahr	
Eiche	Schwach: lange stark negative KWB in der Vegetationszeit	lange stark negative KWB in der Vegetationszeit		Höhere Temperaturen im Winter
Fichte	Schwach: lange stark negative KWB in der Vegetationszeit	Negative KWB in Vegetationszeit und Jahr, sehr geringe Niederschläge in Vegetationszeit und Jahr, hohe Temperaturen in Vegetationszeit und Jahr	Höhere Jahresmitteltemperaturen, viel Strahlung in der Vegetationszeit	Sehr warme Winter
Kiefer		Leicht: hohe Strahlung in Vegetationszeit, geringe Jahresniederschläge, negative KWB in Vegetationszeit und Jahr	Höhere Temperaturen allgemein	

Es zeigt sich, dass vor allem die Witterungsbedingungen des Vorjahres, und hier speziell die Vegetationsperiode, entscheidend sind für die Ausprägung der Kronenverlichtung (Tabelle 9). Auf Trockenheit im gleichen Jahr können aber auch Fichten, Eichen und teilweise Buchen reagieren.

Abgesehen von den beschriebenen Tendenzen zeigten die Auswertungen aber auch, dass diese nicht immer eindeutig sind und dass es Faktoren geben muss, die zeitgleich puffernd oder verstärkend wirken. Abbildung 21 zeigt die Reaktion von Buchen unterschiedlicher Altersklassen in der Kronenverlichtung auf die Klimatische Wasserbilanz im Zeitraum April des Vorjahres bis September des Jahres der Aufnahme. Deutlich wird, dass bei sehr negativer Klimatischer Wasserbilanz (trockener als im

Mittel, links der senkrechten Nulllinie) der Großteil der Buchen, egal welchen Alters, mit einer Erhöhung der Kronenverlichtung reagiert (Werte über der waagerechten Nulllinie). Es ist jedoch auch gut zu erkennen, wie viele Fälle es für alle Altersklassen gibt, die sich trotz ungewöhnlich trockener Bedingungen hinsichtlich der Kronenverlichtung verbessert oder bei guten Bedingungen verschlechtert haben. Dies weist darauf hin, dass hier – altersunabhängig – andere als die Witterungsfaktoren ausschlaggebend sind.

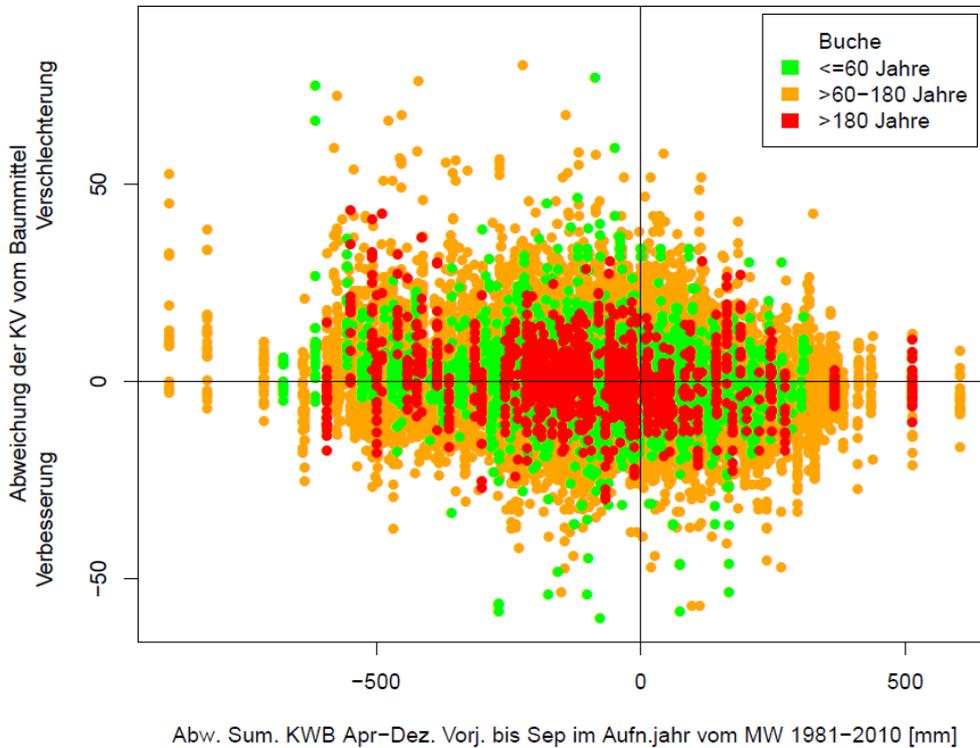


Abbildung 21: Abweichung der Kronenverlichtung bei Buche vom Baummittel in Abhängigkeit der Abweichung der Klimatischen Wasserbilanz vom Mittelwert 1981-2010, berechnet für den Zeitraum April des Vorjahres bis September des Aufnahmejahres. Angabe für Buchen unter 60 Jahre, zwischen 60 – 180 Jahren und älter als 180 Jahren.

3.4.5 Standortmerkmale

3.4.5.1 Buche

In der Literatur wird beschrieben, dass Buchen Standorte mit warm-feuchtem Klima, relativ milden Wintern und hohen Niederschlägen bevorzugen (z.B. EICHORN ET AL., 2008). Sie meiden staunasse oder zu trockene Böden. Optimales Wachstum haben Buchen auf gut wasserversorgten und nährstoffreichen Böden.

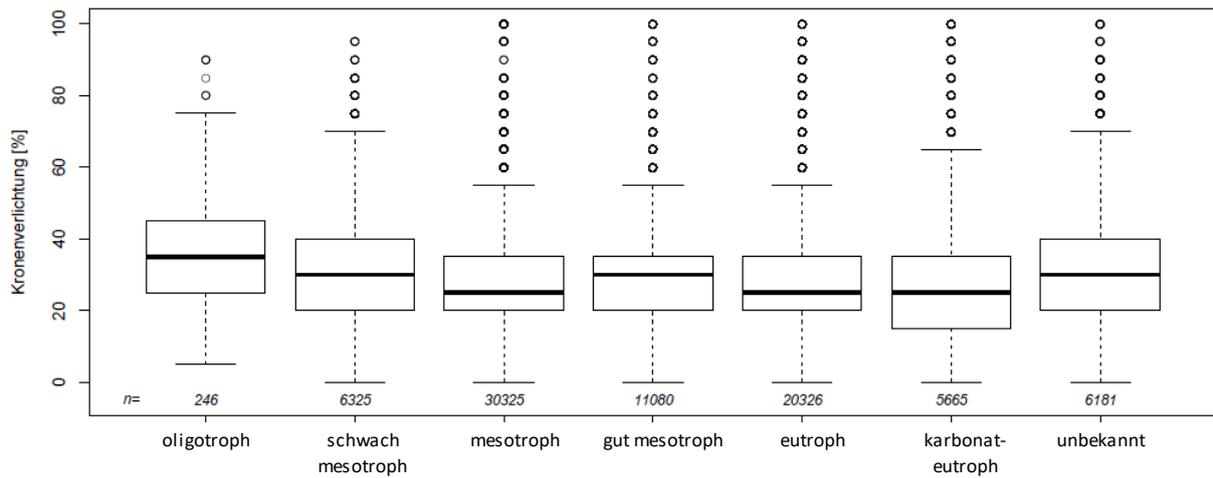


Abbildung 22: Kronenverlichtung bei Buche (über 60 Jahre) nach Trophiestufen

Im Datensatz konnte dieser Standortbezug für die Kronenverlichtung nur bedingt bestätigt werden. In Abbildung 22 sind leicht erhöhte Kronenverlichtungswerte auf nährstoffarmen (oligotrophen) Standorten gegenüber Standorten mit besserer Nährstoffversorgung zu erkennen, wobei die Anzahl an Buchen auf diesen Standorten sehr gering ist. Es ist keine Tendenz bei weiterer Verbesserung der Trophie zu erkennen. Bezüglich der Wasserhaushaltsstufen gibt es für Buche eine leicht bessere Kronenverlichtung auf feuchten Standorten (Anhang 20). Bei der Relieflage ergeben sich etwas geringere Werte an Unterhängen oder in Zentrallage sowie leicht erhöhte Werte im Bereich von Hangschultern (Anhang 21).

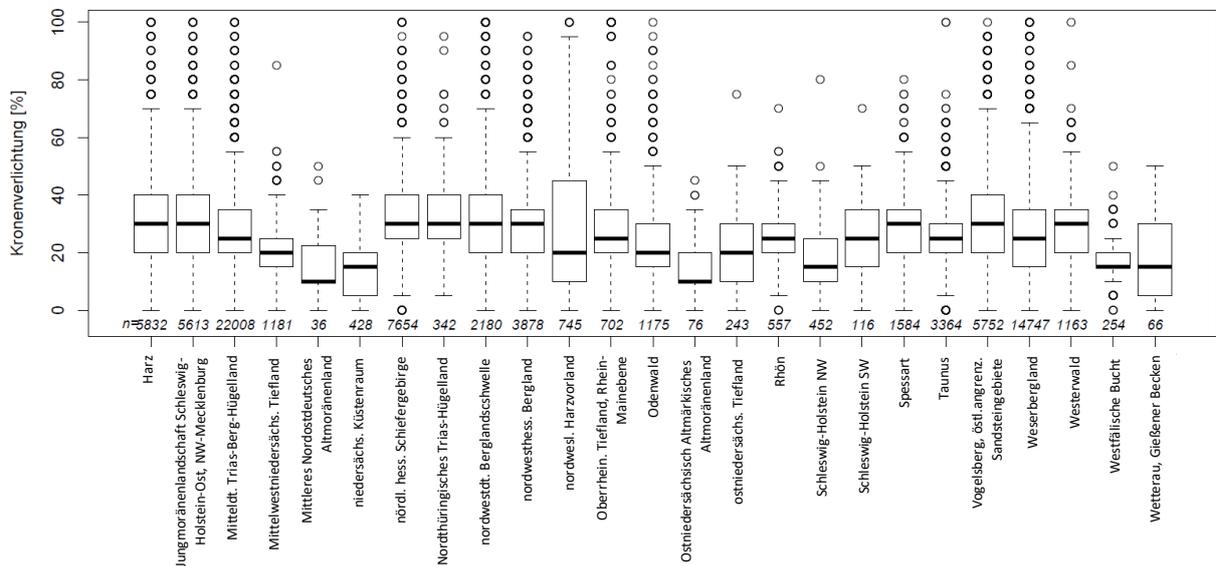


Abbildung 23: Kronenverlichtung bei Buche (über 60 Jahre) nach Wuchsgebiet

Deutlichere Unterschiede zeigen sich im räumlichen Vergleich. Wie in Abbildung 23 zu sehen ist, gibt es z.B. im niedersächsischen Küstenraum, in der Wetterau oder in der Westfälischen Bucht im Mittel geringere Kronenverlichtungen als beispielsweise im Westerwald oder um den Vogelsberg. Die Unterschiede sind aber durch die unterschiedlichen Fallzahlen sehr vorsichtig zu interpretieren.

Das Jahr 2018 stellte durch seine Trockenheit und Wärme eine bisher nie dagewesene Stresssituation für Bäume dar. Aus dieser Sicht wurde versucht, Standorte zu identifizieren, auf denen Buchen besonders stark bzw. besonders wenig reagierten.

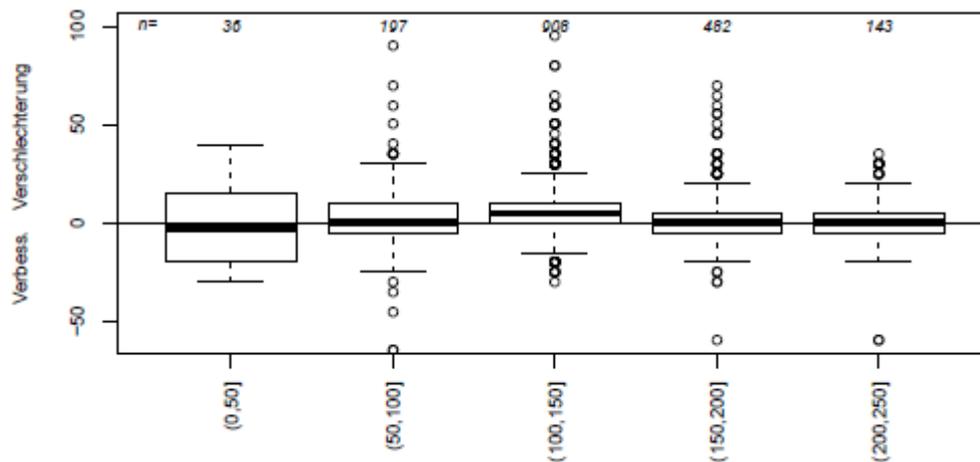


Abbildung 24: Veränderung der Kronenverlichtung von Buchen 2019 im Vergleich zum Vorjahr mit Bezug auf die nFK des Standorts

So geht aus Abbildung 24 hervor, dass die stärksten Verschlechterungen nicht auf Standorten mit sehr geringer (oder sehr hoher) Bodenwasserspeicherkapazität, sondern auf solchen mit mittlerer nFK festgestellt wurden. Auch hier unterscheiden sich die Fallzahlen jedoch stark. Außerdem ergab die Analyse, dass Buchen auf südost-, südwest- und westexponierten Standorten eine stärkere Verschlechterung aufwiesen als z.B. ostexponierte Standorte (vgl. Anhang 22). Erhöht im Vergleich zum Vorjahr war die Kronenverlichtung auch auf mäßig bis kaum frischen oder auch feuchten Standorten, während sie sich auf betont frischen oder frischen Standorten nur in Einzelfällen verschlechterte (Anhang 23).

3.4.5.2 Eiche

Zur Vitalität der Eiche fertigte HONEKAMP (2021) eine Masterarbeit an. Seinen Untersuchungen nach befinden sich die Eichen seit 1988 in einem weniger vitalen Zustand, der sich durch eine anhaltend hohe Kronenverlichtung ausdrückt. Seine Auswertungen ergaben, dass die Entwicklung der Kronenverlichtung maßgeblich durch das unterschiedlich ausgeprägte Vorkommen der Eichenfraßgesellschaft und der damit einhergehenden Fraßschäden bestimmt wird. In jüngster Zeit lässt sich die erhöhte Verlichtung nur noch bedingt durch das Auftreten der Fraßgesellschaft erklären, sodass womöglich klimabedingten Faktoren eine vermehrte Bedeutung in der Komplexkrankheit des Eichensterbens zukommt.

Des Weiteren scheint es einen Zusammenhang zwischen zunehmender Nährstoffversorgung der Standorte und vermehrten Schäden durch die Eichenfraßgesellschaften zu geben.

Zudem macht die Untersuchung deutlich, dass die Kronenverlichtung stark durch die Wasserversorgung eines Standorts beeinflusst wird. Auf wechselfeuchten Böden standen die vitalsten Eichen. Ansonsten ging mit einem zunehmenden Nässegrad des Standorts eine abnehmende Eichenvitalität einher. Besonders hohe Verlichtungswerte auf nassen Standorten sind vermutlich durch ein komplexes Zusammenwirken von starken Fraßschäden und grundwasserbedingten Schädigungen zu erklären. Keinen Einfluss scheint dagegen die nFK des Standortes zu haben.

Standortsbedingt schlechte Vitalität bei der Eiche könnte auch durchaus auf Fehlbestockungen zurückzuführen sein, da sich Trauben- und Stieleiche zwar im Habitus sehr ähneln, aber unterschiedliche Standortsansprüche haben.

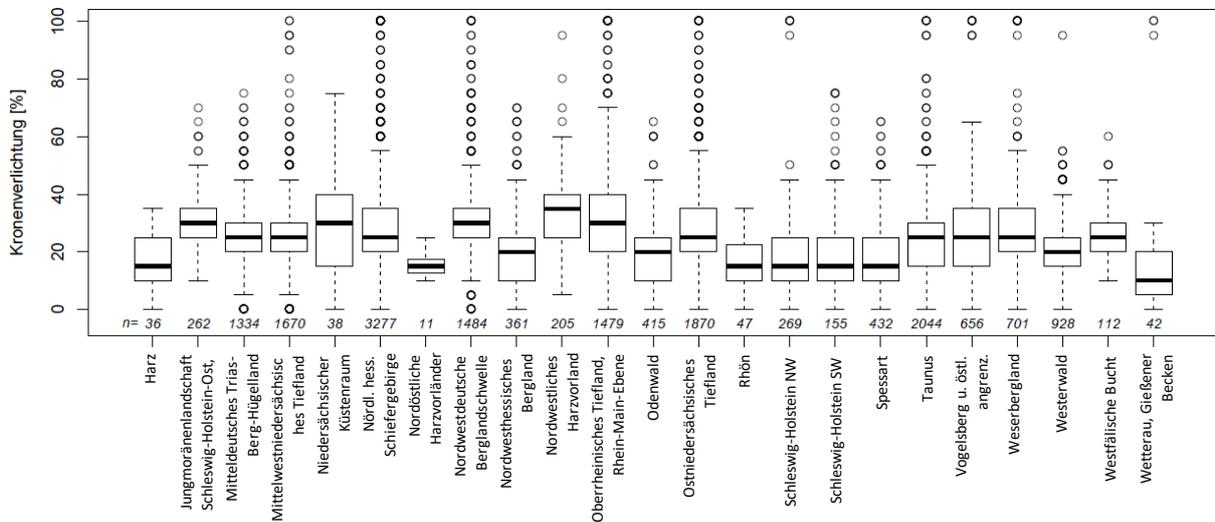


Abbildung 25: Kronenverlichtung bei Eiche (über 60 Jahre) nach Wuchsgebieten

Die Auswertung nach den Wuchsgebieten macht deutlich, dass es regional große Unterschiede gibt. Beispielsweise zeigen Eichen im Spessart oder im nordwesthessischen Bergland im Mittel eine relativ geringe Kronenverlichtung, Eichen in der Rhein-Main-Ebene oder im nordwestlichen Harzvorland dagegen eine höhere (Abbildung 25). Bei der Interpretation der Grafik muss aber die jeweils unterschiedliche Anzahl an Eichen berücksichtigt werden.

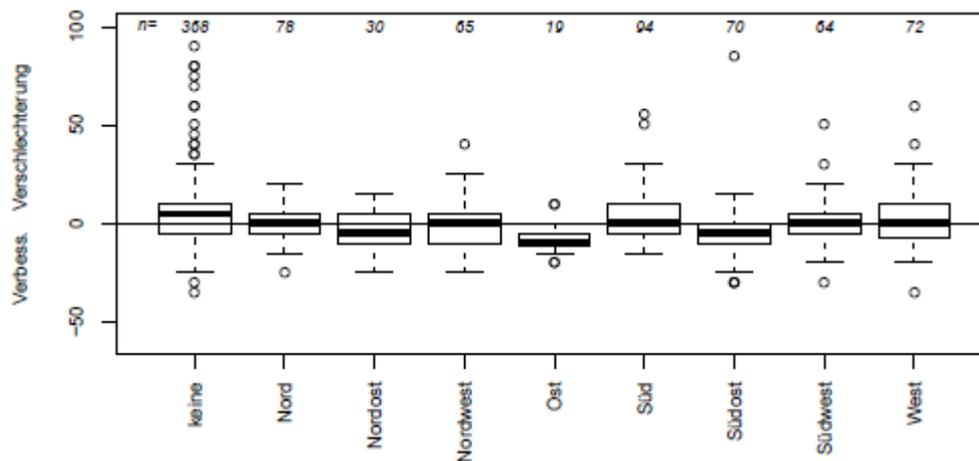


Abbildung 26: Veränderung der Kronenverlichtung von Eichen 2019 im Vergleich zum Vorjahr mit Bezug auf die Exposition des Standorts

Die Auswertung, auf welchen Standorten bei der Eiche im Jahr 2019 eine besonders starke Verschlechterung des Kronenzustandes zu beobachten war, brachte kein klares Ergebnis. Weder für die Substratgruppen noch Kenngrößen des Standortwasserhaushalts konnten relevante Unterschiede

aufgezeigt werden. Allerdings haben sich Eichen, die auf östlich exponierten Standorten stehen, 2019 sogar eher leicht erholt (Abbildung 26).

3.4.5.3 Fichte

Die Fichte hat von den vier Hauptbaumarten am häufigsten und schwersten unter Witterungsextremen gelitten. Vor allem in den letzten Jahren seit 2018 gab es bei Fichte die größten Ausfälle (Kapitel 3.7). Durch ihre Wurzelform und ihre Trockenstressanfälligkeit ist die Fichte waldbaulich nicht für jeden Standort geeignet.

Abbildung 27 zeigt, dass die Höhenstufe mit den höchsten Kronenverlichtungen bei Fichten zwischen 800 m und 900 m über NN liegt. Zu beachten ist allerdings, dass der Stichprobenumfang mit 504 Beobachtungen vergleichsweise klein ist. Bemerkenswert ist, dass die Fichte als Baumart der Mittelgebirge auch häufig in sehr niedrigen Lagen zwischen 0 und 100 m über NN vorkommt. Die Kronenverlichtungswerte in dieser Lage sind nicht höher als die der höheren Lagen.

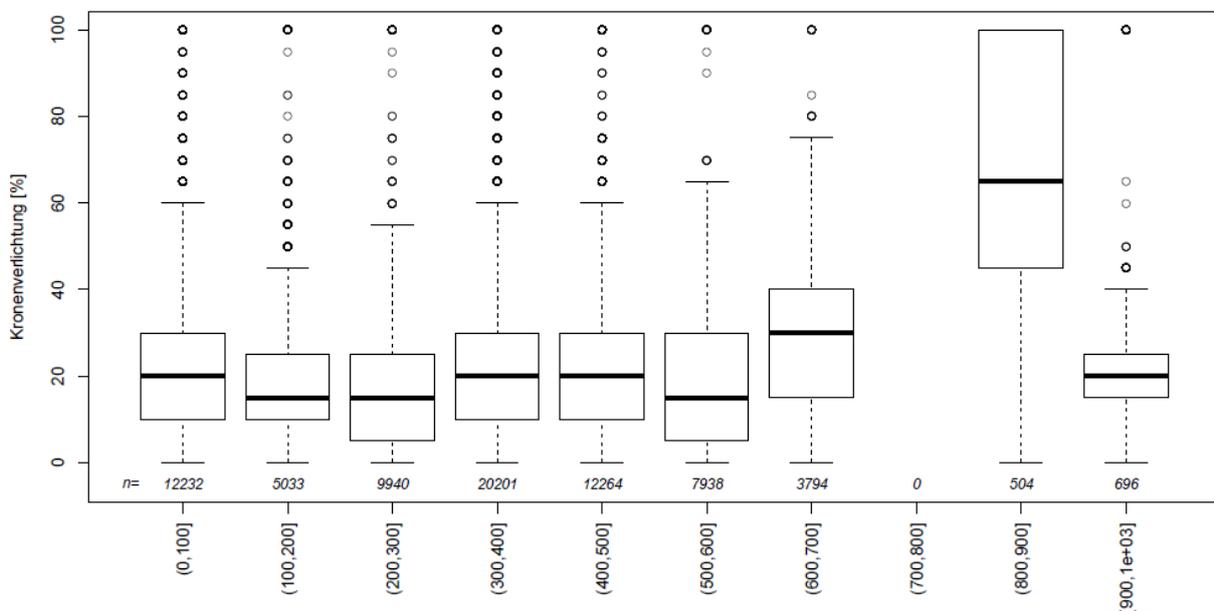


Abbildung 27: Kronenverlichtung bei Fichte nach Höhe über NN (alle Altersklassen, alle Jahre)

Fichten auf Standorten mit hoher Wasserspeicherkapazität (nFK) haben vergleichsweise geringe Kronenverlichtungen. Die Grafik hierzu ist Anhang 14 zu entnehmen. Auf Standorten mit geringer Wasserspeicherkapazität kommt die Fichte nicht vor. Zwischen diesen beiden Extremen gibt es keine Trends.

Wird die Wasserhaushaltsstufe der Fichtenstandorte betrachtet, fällt auf, dass Fichte auf nassen Standorten deutlich höhere Kronenverlichtungen aufweisen als auf allen anderen Standorten (Abbildung 28). Allerdings fallen die wenigsten Fichtenstandorte in diese Klasse. Auf feuchten Standorten ist die Kronenverlichtung im Mittel ebenfalls etwas erhöht.

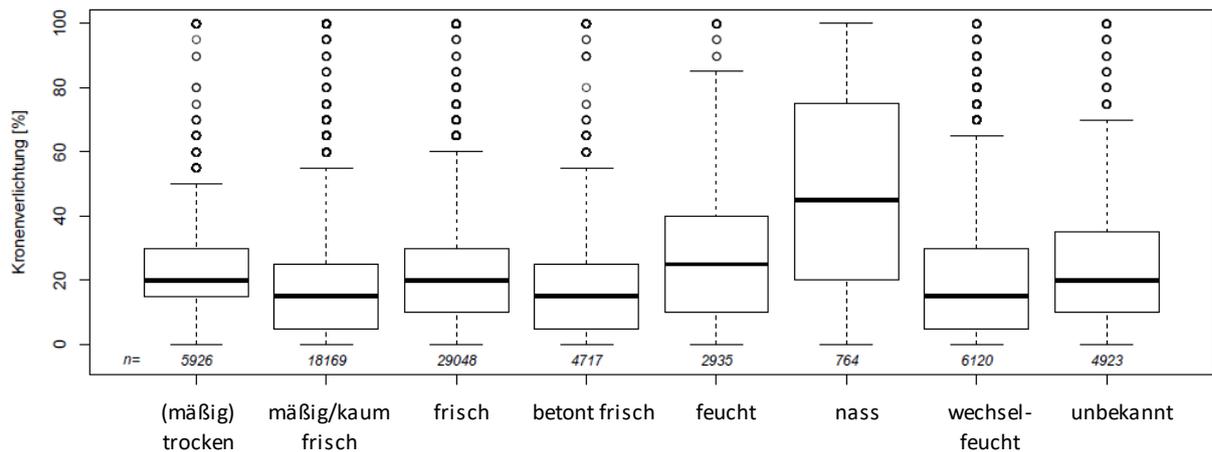


Abbildung 28: Kronenverlichtung bei Fichte (alle Alter) in Abhängigkeit vom Wasserhaushalt

Der Nährstoffhaushalt scheint für die Kronenverlichtung der Fichte insofern eine Rolle zu spielen, dass auf sehr nährstoffarmen, oligotrophen Standorten deutlich erhöhte Werte vorliegen (Abbildung 29). Diese zählen allerdings auch nicht als für Fichten geeignete Standorte. Für die anderen Trophie-stufen gibt es keine klaren Unterschiede.

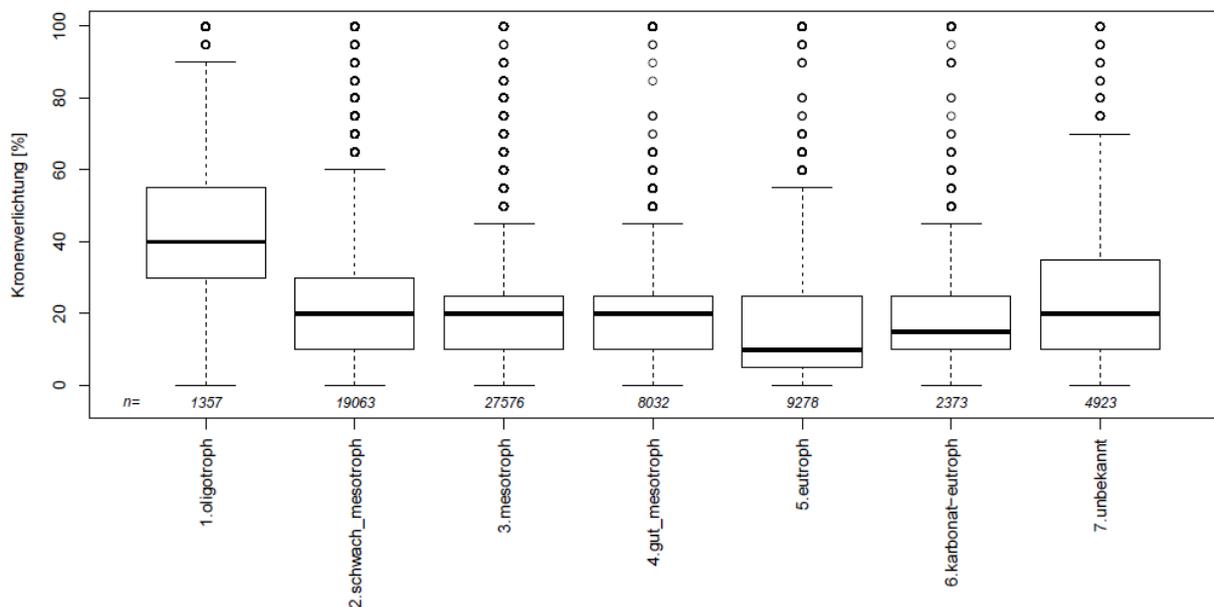


Abbildung 29: Kronenverlichtung bei Fichte (alle Alter) in Abhängigkeit von der Trophie

Diese Auswertungen wurden außerdem für Standortmerkmale nFK, nach Einheiten der forstlichen Naturraumgliederung (Wuchsbezirk und Wuchsgebiet, vgl. GAUER & KROIHER 2012), Exposition und Substratgruppe durchgeführt. Die Grafiken hierzu sind bis auf die für die Wuchsbezirke dem Anhang (Grafiken Anhang 15 bis Anhang 17) angefügt. Vor allem für die Wuchsbezirke, Wuchsgebiete und Substratgruppen sind teilweise klare Unterschiede erkennbar. Allerdings ist eine Auswertung hier schwierig, da die Gruppen sehr unterschiedlich besetzt sind. Klar wird, dass es regional bis lokal sehr

große Unterschiede bei der Kronenverlichtung der Fichte gibt. So gibt es beispielweise geringe Kronenverlichtungswerte auf organisch geprägten Standorten oder Basalt bzw. Diabas oder, nach Wuchsgebieten, in der Nordwestdeutschen Berglandschwelle, der Rhön oder dem Westerwald. Hohe Werte liegen für den Harz oder die Westfälische Bucht bzw. den Substratgruppen verlehmt Sand, organisch oder Granit vor.

Anhand der sehr hohen Schäden im Jahr 2019 wurde herauszufinden versucht, ob die Exposition eine entscheidende Rolle für das Schadausmaß spielt. Wie in Abbildung 30 zu erkennen ist, war die Kronenverlichtung der Fichte vor allem auf Hängen mit südlicher, östlicher und südöstlicher Exposition etwas höher als anderswo. Die Unterschiede sind allerdings nicht deutlich.

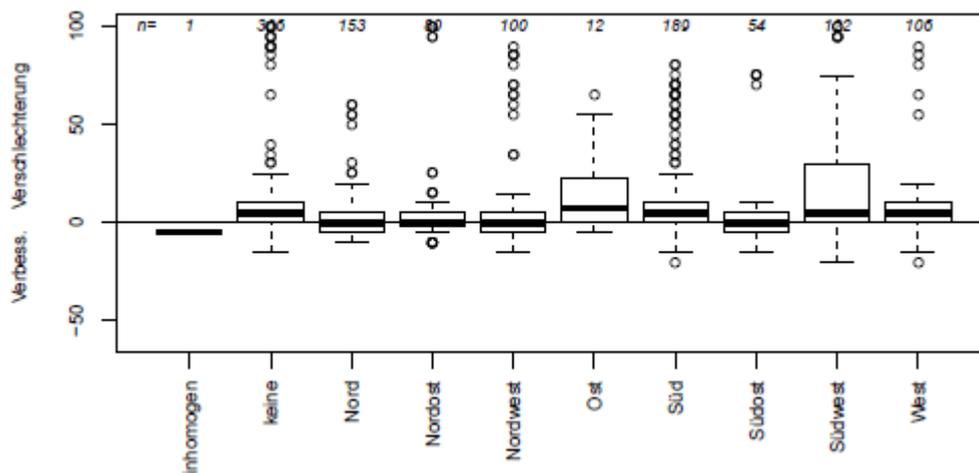


Abbildung 30: Veränderung der Kronenverlichtung von Fichten 2019 im Vergleich zum Vorjahr mit Bezug auf die Exposition des Standorts

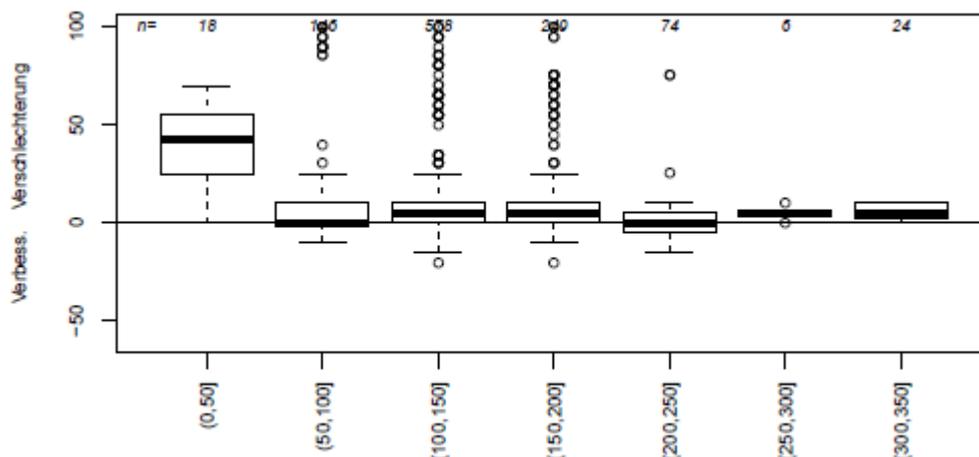


Abbildung 31: Veränderung der Kronenverlichtung von Fichten 2019 im Vergleich zum Vorjahr mit Bezug auf die nFK des Standorts

Deutlich verschlechtert hat sich dagegen die Kronenverlichtung 2019 auf Standorten mit sehr geringer Bodenwasserspeicherkapazität (nFK). In Abbildung 31 ist gut zu erkennen, dass die Fichten auf Standorten mit einer nFK zwischen 0 und 50 mm eine sehr deutliche Erhöhung der Kronenverlichtung

erfahren. Diese insgesamt 18 Fichten bilden aber nur eine sehr kleine Stichprobe ab und sind damit nur bedingt zum Vergleich geeignet. Die Entwicklung ist allerdings dramatisch, denn für alle 18 Bäume bedeutete dies das Absterben.

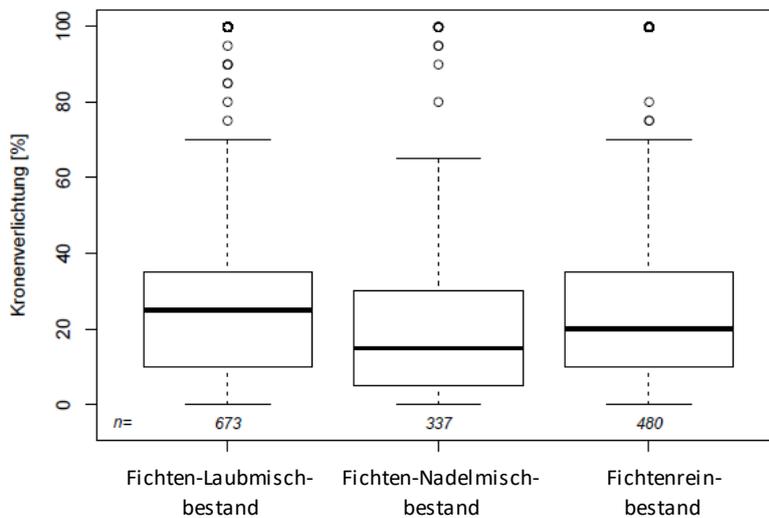


Abbildung 32: Kronenverlichtung bei Fichte nach Bestandesmischung, Stichjahr 2019 (alle vier Bundesländer, alle Alter)

Weiterhin wurde die Abhängigkeit der Kronenverlichtung von Fichten im Jahr 2019 von der Bestandesstruktur untersucht. Da davon ausgegangen werden kann, dass das WZE-Kollektiv eines Plots die Baumartenzusammensetzung des gesamten Bestandes weitestgehend abbildet, wurden die Bestandestypen nach den Baumarten des WZE-Kollektives eines Plots zugeordnet. Auf diese Weise wurden Reinbestände mit ausschließlich Fichte, Fichte in Laubmischbeständen und Fichte in Nadelmischbeständen ausgewiesen. Aus Abbildung 32 geht hervor, dass es für die Kronenverlichtung im Stichjahr 2019 keinen Unterschied machte, ob die Fichte in Rein- oder Mischkulturen vergesellschaftet waren. Die im Mittel geringsten Kronenverlichtungswerte hatten Fichten in Nadelmischbeständen, allerdings sind die Unterschiede zu den andern Bestandestypen sehr gering.

3.4.5.4 Kiefer

Die Kiefer kann auf armen, trockenen Böden, sandigen und moorigen Standorten sowie auf trockenen Kalkböden wachsen (z.B. WALENTOWSKI ET AL., 2007). Abbildung 33 zeigt, dass Kiefern sowohl auf nassen und als auch auf trockeneren Standorten geringere Kronenverlichtungswerte als auf anderen Standorten haben.

Bei Exposition und Trophie können keine klaren Unterschiede gefunden werden. Regional sind, wie bei den anderen Baumarten auch, größere Unterschiede zu erkennen. Niedrigere Kronenverlichtungswerte sind z.B. im ostniedersächsischen Tiefland oder im mittelwestniedersächsischen Tiefland zu finden, höhere dagegen beispielsweise im nordwesthessischen Bergland oder im Spessart (vgl. Abbildung 34).

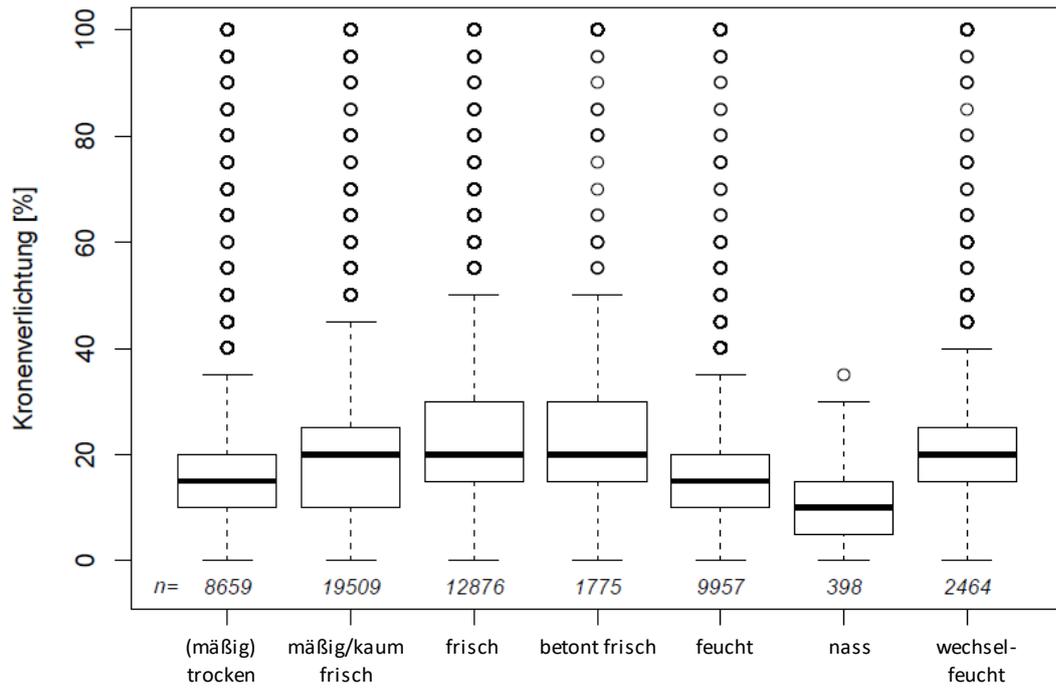


Abbildung 33: Kronenverlichtung bei Kiefer (ü. 60 J.) nach Wasserhaushaltsstufe

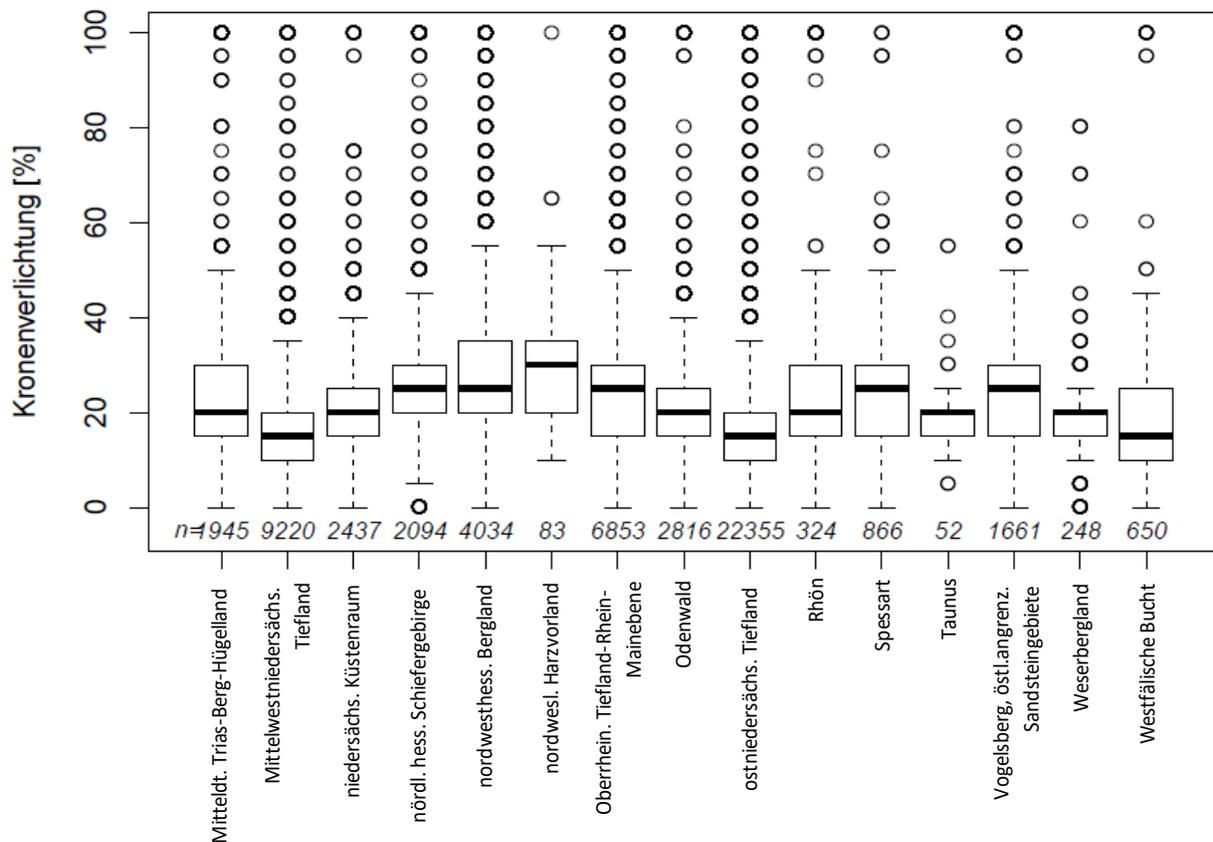


Abbildung 34: Kronenverlichtung bei Kiefer (ü. 60 J.) nach Wuchsgebiet

Von allen Baumarten reagierte die Kiefer am wenigsten auf das Trockenjahr 2018, wobei die Kronenverlichtung der jungen Kiefern deutlicher angestiegen ist als die der älteren (Abbildung 13).

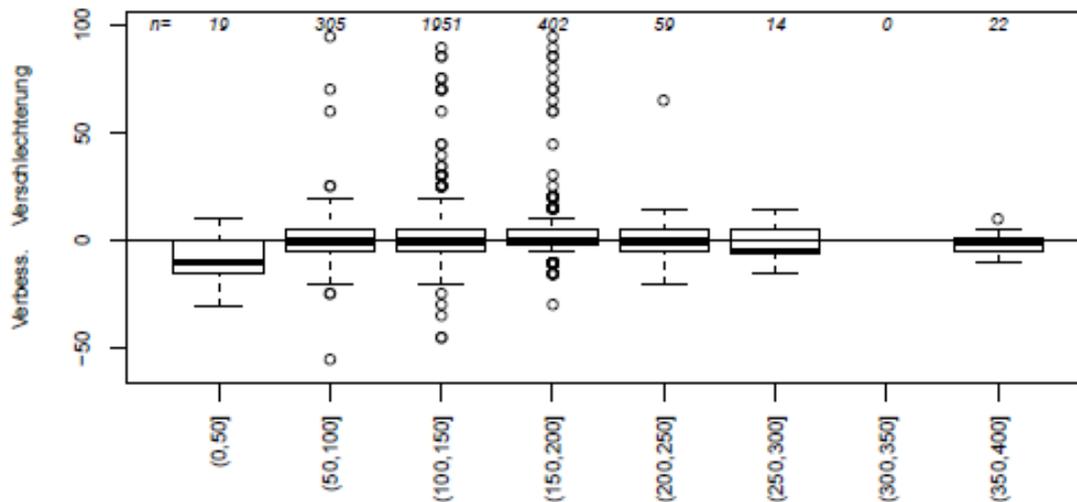


Abbildung 35: Veränderung der Kronenverlichtung von Kiefern 2019 im Vergleich zum Vorjahr mit Bezug auf die nFK des Standorts

Die Veränderungen unterscheiden sich nicht nach den Wasserhaushaltsklassen oder der Exposition. Interessanterweise verbessern sich die Kronenverlichtungen der Kiefern im Jahr 2019 gegenüber 2018 ausgerechnet auf Standorten mit sehr geringen Bodenwasserspeicherkapazitäten (Abbildung 35), wobei die geringe Fallzahl zu beachten ist.

3.4.6 Modellierung der Kronenverlichtung als vitalitätsbeschreibende Kenngröße

Durch die extreme Witterung des Jahres 2018 und auch der nachfolgenden Jahre ist es in den Wäldern Niedersachsens, Hessens, Sachsen-Anhalts und Schleswig-Holsteins zu teilweise dramatischen Vitalitätsverlusten gekommen, die sich in der zunehmenden Verlichtung der Baumkronen und vielerorts auch dem Absterben von Bäumen äußern. Dieser Vitalitätsverlust soll mit Hilfe eines Modells beschrieben werden, das zunächst die Erhöhung der Kronenverlichtung und abschließend das Absterben der Bäume abbildet. Dabei sollen Bestandesstrukturen, Standortsbedingungen und baumspezifische Merkmale (z.B. Alter) berücksichtigt werden. Dieser Aufgabenkomplex konnte im September 2020 als Masterarbeit vergeben werden. Aufgrund des Arbeitsumfangs erfolgt eine Beschränkung auf die Buche. Ziel der Arbeit ist die Identifizierung kritischer Witterungsbedingungen in Abhängigkeit von Standortsbedingungen, Bestandesstruktur und Baumalter. Die Basis der Auswertung bilden die bisherigen, zweidimensionalen Auswertungen. In Anlehnung an EICKENSCHIEDT ET AL. (2019) wird für die Modellierung der (klimatischen) Einflussfaktoren ein verallgemeinertes additives Mischmodell (GAMM = Generalized Additive Mixed Model) gewählt. Mit der Fertigstellung der Arbeit ist im Sommer 2021 zu rechnen.

3.5 Einflüsse auf die Fruktifikation

Bei der Auswertung der Fruktifikationsdaten lag der Fokus auf der Baumart Buche. Dies ist einmal begründbar mit der Tatsache, dass die Buche die häufigste Baumart in Hessen darstellt (vgl. Kapitel 3.1).

Zum anderen fruktifizieren Fichten und Kiefer häufig und ausreichend, um bei geeigneten Bedingungen Naturverjüngung zu sichern. Bei den schwerfruchtigen Baumarten wie Eiche und Buche sind bzw. waren die Mastjahre seltener, so dass es teilweise waldbaulicher Maßnahmen bedarf, um eine Verjüngung zu etablieren. Da die Daten für die Eiche nicht ausreichend belastbar scheinen, wird im Folgenden ausschließlich auf die Buche eingegangen.

3.5.1 Standorts- und Bestandeseinfluss

Die Analyse der Mustertabellen zur Fruktifikation hat vor allem für Buche gezeigt, dass Bäume gleichen Alters unterschiedlich häufig und stark fruktifizieren können. Diese Unterschiede bestehen sowohl zwischen Buchen eines Bestandes als auch zwischen unterschiedlichen Aufnahmeplots. Mit Hilfe eines multivariaten statistischen Modells wurde versucht, diese räumlichen Unterschiede zwischen der Mastintensität von Buchen bzw. Buchenbeständen zu erklären. Das Ziel der Analyse war die Identifikation von Standorts- und Bestandesparametern, die die räumlichen Muster der Fruktifikationsstärke von Buchen beeinflussen.

Das für diese Zielstellung geeignete Modell ist ein kategoriales Regressionsmodell (vgl. FAHRMEIR ET AL., 2009) der Modelklasse der Generalisierten Additiven Modelle. Bei diesem Modellansatz werden alle Einflüsse stetiger Kovariablen semiparametrisch über Spline-Basisfunktionen geschätzt. Erklärt werden sollten Unterschiede des Mastindex' als Zielvariable. Als Kovariablen gingen einerseits standortsbeschreibende Variablen zur Differenzierung auf regionaler und überregionaler Ebene und andererseits Bestandeskenngößen zur Beschreibung der Bestandesheterogenität ein (Tabelle 10). Die Umsetzung erfolgte über das R-Paket 'mgcv' (WOOD, 2018).

Tabelle 10: Kovariablen des Modells zur Schätzung der Fruktifikationsstärke bei Buche

Bezug	Kovariablen
Standort	– Höhe ü. NN
	– höhenunabhängige Niederschlags- und Temperaturmittelwerte (1981-2010)
	– Exposition
	– Rechts- und Hochwert
	– Substratgruppe
	– Wasserhaushaltsstufe
	– Trophie
	– Anzahl der Kalkungen
Bestand	– Begründungsjahr
	– Baumklasse nach Kraft

Das Modell testet alle unabhängigen Variablen auf ihren Einfluss auf die Zielvariable (abhängige Variable). Dieser Einfluss wird als Marginaler Effekt bezeichnet. Sie wird jeweils schrittweise um eine Einheit verändert, während die anderen unabhängigen Variablen konstant gehalten werden (ceteris paribus).

Von allen Kovariablen hat das Bestandesalter den größten Einfluss auf den Mastindex. Der Effekt ist bei geringen Baumaltern am größten, wenn die Bäume zwischen etwa 50 und 60 Jahren beginnen, zu fruktifizieren. Dann steigt die Wahrscheinlichkeit, dass der Mastindex größer als 0 wird, sehr schnell an. Bis zu einem Alter von etwa 80 Jahren besteht dann ein positiver Zusammenhang zwischen beiden Größen. Bei weiterhin steigendem Alter steigt die Wahrscheinlichkeit, dass sich der Mastindex weiter erhöht, nur noch sehr wenig (vgl. Abbildung 36).

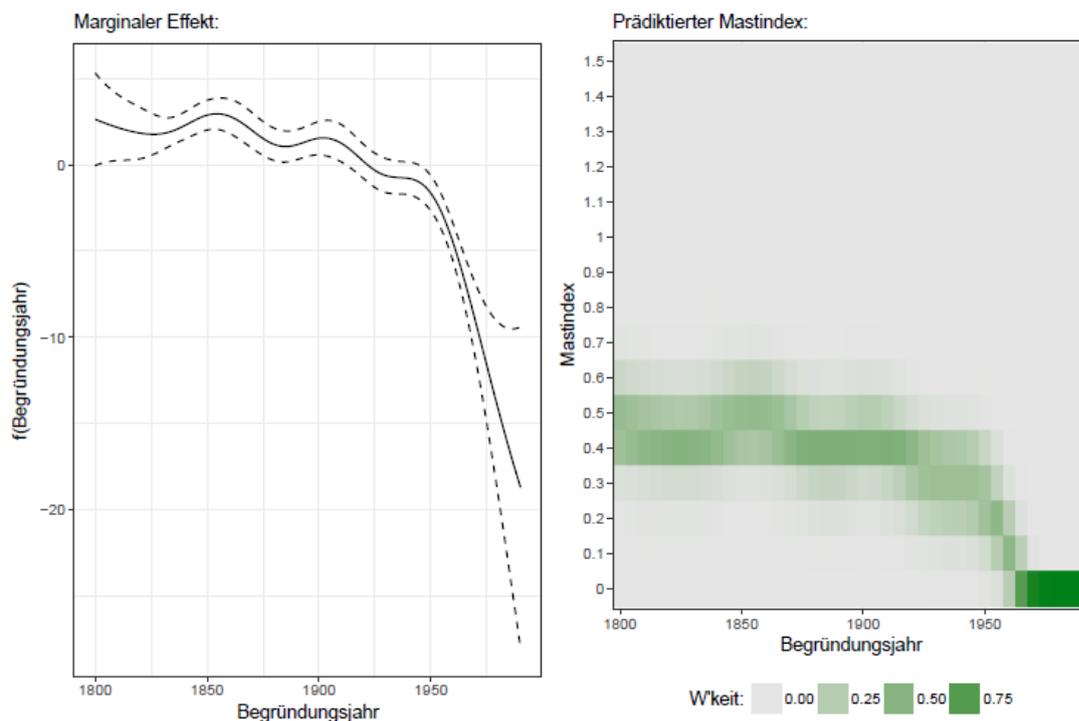


Abbildung 36: Einfluss des Baumalters auf den Mastindex bei Buche. Marginaler Effekt = Effekt, den eine unabhängige auf die abhängige Variable hat bei Änderung um eine Einheit und Konstanthaltung der anderen unabhängigen Variablen. Durchgezogene Linie = Median, gestrichelt = Standardabweichung. Prädiktierter Mastindex = Anwendung des Modells auf die Zielvariable (modellierter Mastindex).

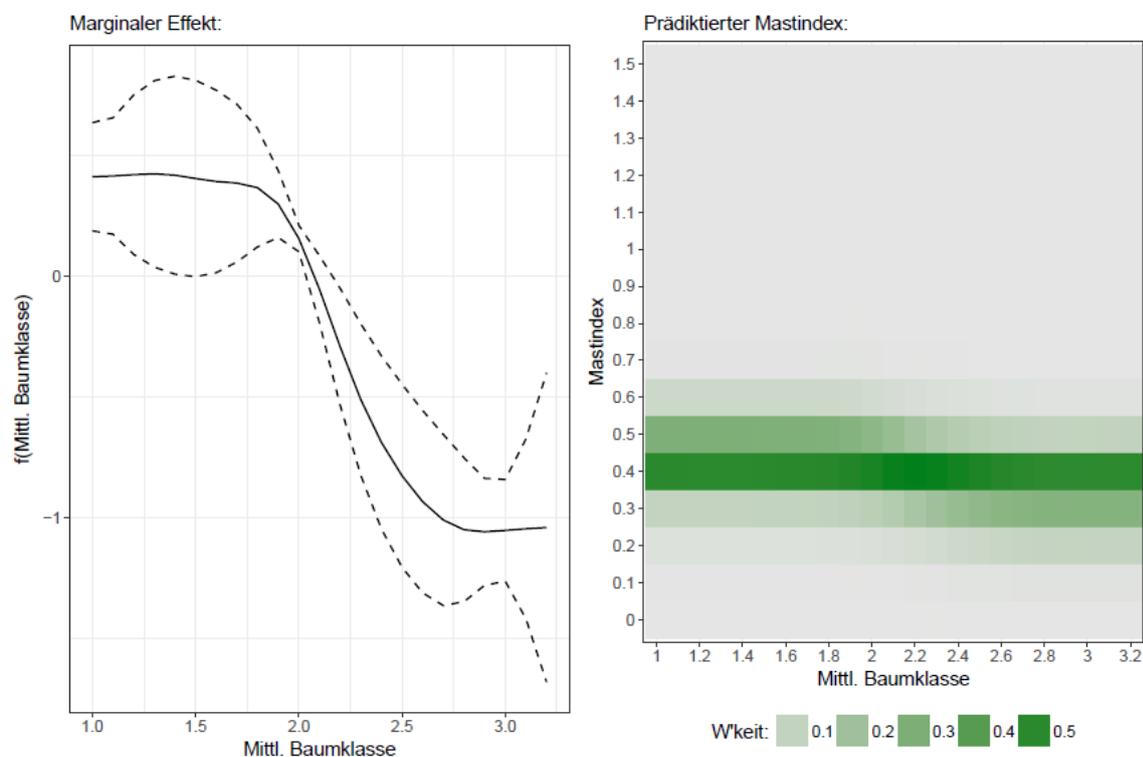


Abbildung 37: Einfluss der sozialen Stellung des Baumes auf den Mastindex bei Buche (vgl. auch Abbildung 36).

Als zweite Kovariable zeigte die soziale Stellung des Baumes im Bestand einen Effekt. Im Datensatz sind nur Bäume der Kraftschen Klasse 1-3 (in der sozialen Stellung innerhalb der Bestände dominierende Bäume) und einige sehr wenige Fälle mit Klasse 4 enthalten.

Das Modell ermittelt bei einer Zunahme der Baumklasse eine Abnahme der Wahrscheinlichkeit für einen höheren Mastindex. Die Wahrscheinlichkeit, dass der Mastindex 0,4 ist, ist über alle Baumklassen gleich hoch. Insgesamt ist der Effekt sehr schwach (Abbildung 37).

Weitere, jedoch nur sehr schwache Effekte konnten durch das Modell für die Höhenlage gefunden werden. Wie zu erwarten besteht ein Effekt der Höhenlage mit abnehmender Fruktifikationsstärke bei zunehmender Höhe. Die Standorte befinden sich in Höhenlagen zwischen 10 m ü. NN und 585 m ü. NN. Der Effekt ist allerdings nur sehr schwach, was in dieser Ausprägung nicht zu erwarten war.

Insgesamt scheinen Bestandeskenngrößen wie das Alter oder die Kraft'sche Klasse eine größere Rolle zu spielen als standörtliche Voraussetzungen.

3.5.2 Einfluss der Witterung

Da regional und überregional sowohl Mastjahre als auch Nichtmastjahre bei Buche beobachtet werden können, muss ein Einfluss der Witterung auf die Blütenbildung bei Buche vermutet werden. Diese Überlegung wird durch verschiedene Literaturquellen gestützt (Tabelle 11).

Tabelle 11: Ergebnisse der Literaturrecherche zur Auslösung der Blütenbildung bei Buche

Autor, Jahr	Raumbezug	Beschreibung
ÖVERGAARD ET AL., 2007	Schweden	Allg. steigende Temperaturen
PAAR ET AL., 2011	Hessen	Warm-trockener Vorsommer, kühl-feuchter Sommer im Mastjahr, N-Einträge
EICHHORN ET AL., 2008	Hessen	Allg. Großwetterlagen, Lichtgenuss und soziale Stellung
ASCOLI ET AL., 2017	Südschweden	Warm-trockener Vorsommer und warm-feuchter Folgewinter
DROBYSHEV ET AL., 2010	Südschweden	Kalter Vorvorsommer, warmer Vorsommer
HACKET-PAIN ET AL., 2015	Südengland	Kalter Vorvorsommer, warmer Vorsommer
KASPRZYK ET AL., 2014	Polen	Warmer Vorsommer, trockenes Frühjahr im Mastjahr
PIOVESAN & ADAMS, 2001	Europa	Kalter Vorvorsommer, warm-trockener Vorsommer
GRUBER, 2006	Hessen, Niedersachsen	kalt, wenig Strahlung und Sonnenschein im Vorvorsommer sowie warm und viel Strahlung im September + Oktober des Vorjahres
FORSCHUNGSANSTALT FÜR WALDÖKOLOGIE UND FORSTWIRTSCHAFT (FAWF) RHEINLAND-PFALZ	Rheinland-Pfalz	Fördernd wirken warm-trockene Vorsommer bei ausgewogener Nährstoffversorgung. Dämpfend wirken Mast im Vorjahr und Spätfröste im Mastjahr

Viele Autoren in Tabelle 11 weisen auf Witterungseinflüsse weniger des Fruktifikationsjahres selbst, sondern eher des Vorjahres hin. In die eigenen Untersuchungen wurde vor allem die Witterung des Vorjahres, aber auch des Vorvorjahres einbezogen.

Der Datensatz zur Fruktifikation der Buche wurde geteilt in „Nichtmast“, in den alle Fälle aufgenommen wurden, in denen 90 % der Buchen eines Plots nicht fruktifiziert hatten, und „Mast“ mit allen stark fruktifizierenden Buchen in Jahren, in denen 2/3 der Buchen des jeweiligen Plots mittel bis stark fruktifizierten. Als Randbedingung ging ein, dass im jeweiligen Vorjahr bei den Einzelbäumen keine Fruktifikation stattgefunden haben sollte. Es ergab sich eine Stichprobe von 126 Fällen für die Gruppe „Mast“ und eine von 358 Fällen für „Nichtmast“.

Für die Fälle beider Gruppen wurden die standortsgetreuen Klimabedingungen der entsprechenden Jahre, der Vorjahre sowie der Vorvorjahre ermittelt und gegenübergestellt. Abbildung 38 zeigt diesen Vergleich für die Temperatur des jeweiligen Vorjahres von Mast bzw. Nichtmast. Es fällt auf, dass sich die Julitemperaturen signifikant unterscheiden mit deutlich höheren Werten für die Gruppe „Mast“.

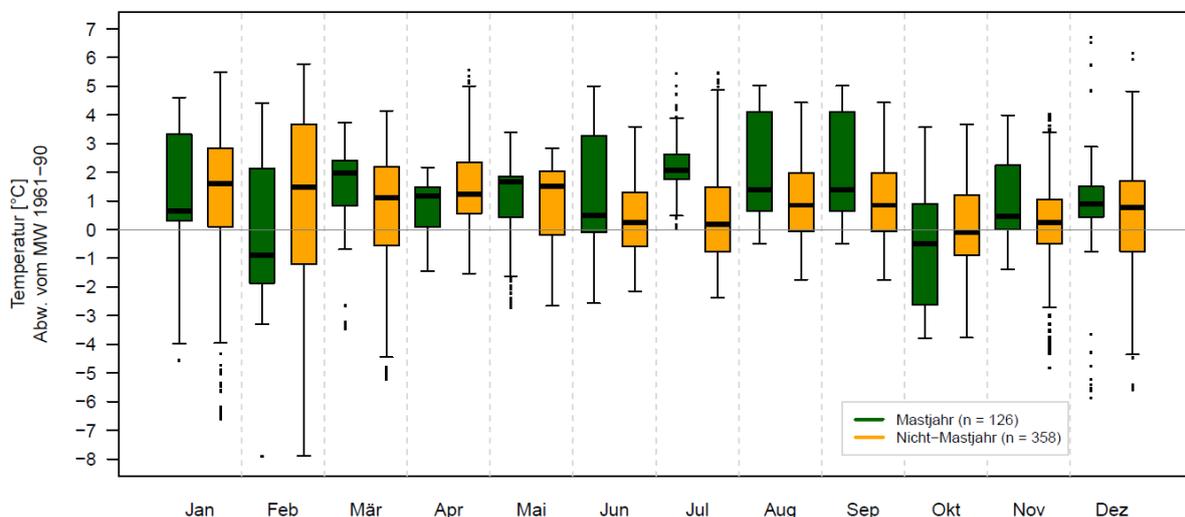


Abbildung 38: Abweichung des Monatsmittelwertes der Temperatur in Jahren vor einer starken Mast (mind. 2/3 der Bäume eines Plots fruktifizieren mittel bis stark) bzw. einer Nicht-Mast (90 % der Bäume eines Plots fruktifizieren nicht) vom langjährigen Mittel 1961-1990 auf BZE-Buchenflächen in Hessen, Niedersachsen, Sachsen-Anhalt und Schleswig-Holstein

Hohe Temperaturen im Sommer herrschen in der Regel bei Hochdruckwetterlagen mit geringer Bewölkung und damit hoher Globalstrahlung. Aus Abbildung 39 geht dieser Zusammenhang für den Monat Juli hervor, da auch hier die Werte der Gruppe „Mast“ deutlich über denen der Gruppe „Nicht-Mast“ liegen. Auch für Juni und August sind Unterschiede erkennbar, die allerdings nicht so stark ausgeprägt sind und sich in den Temperaturen nicht wiederfinden.

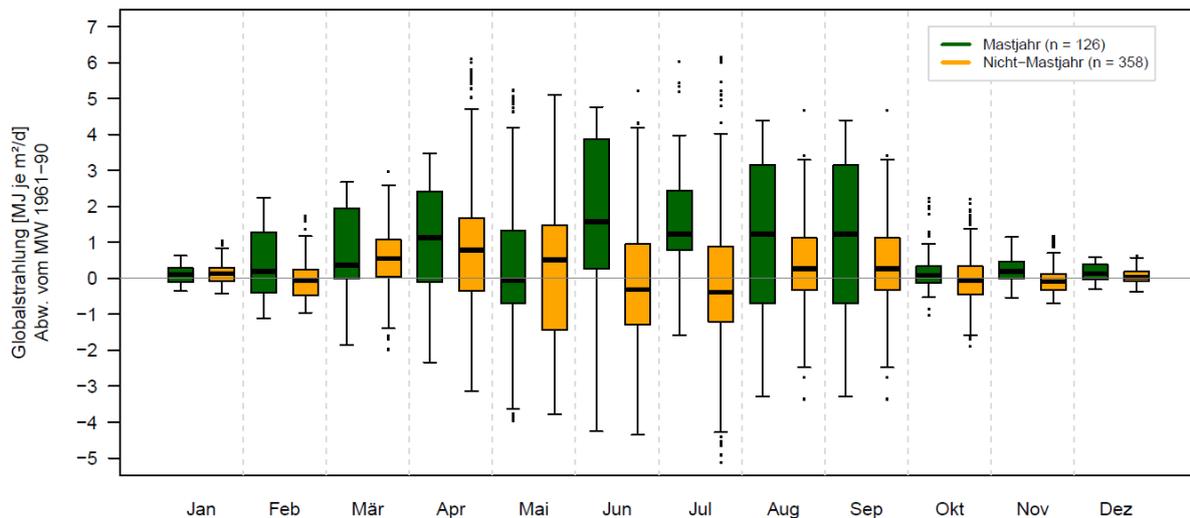


Abbildung 39: Abweichung des Monatsmittelwertes der Globalstrahlung in Jahren vor einer starken Mast (mdst. 2/3 der Bäume eines Plots fruktifizieren mittel bis stark) bzw. einer Nicht-Mast (90 % der Bäume eines Plots fruktifizieren nicht) vom langjährigen Mittel 1961-1990 auf BZE-Buchenflächen in Hessen, Niedersachsen, Sachsen-Anhalt und Schleswig-Holstein

Diese Ergebnisse lassen die Interpretation zu, dass Jahre mit strahlungsreichem Sommer zu einer Buchenmast im Folgejahr führen können. Abbildung 40 bestätigt für die Jahre 2013, 2006 und 1991 diese These. Im Umkehrschluss wären unterdurchschnittliche Strahlungssummen im Sommer für das Ausbleiben einer Mast verantwortlich. Das scheint in Jahren wie 2000 oder 1984 zuzutreffen, wie Abbildung 41 zeigt, für 2016 stimmt das jedoch nur bedingt. Auch in anderen Jahren kann aus dem Strahlungsgenuss im Vorsommer nicht eindeutig auf die Fruktifikationsstärke geschlossen werden.

Eine Erklärung für das Ausbleiben einer Mast in einem Jahr, dem ein strahlungsreicher Sommer vorangegangen ist, liefert die These, dass Blüten zwar angelegt werden, der Baum aber nicht genügend Reservestoffe gespeichert hat, um die Früchte auszubilden. Als Reaktion wäre ein Großteil der Früchte taub oder würde vor der Reife abfallen. Außerdem können Spätfröste die Blüte absterben lassen. Extreme Trockenheit nach der Blüte kann zu vorzeitigem Fruchtabfall führen. All dies lässt sich bei der WZE nicht überprüfen, da hierfür eine einmalige Aufnahme im Sommer nicht ausreicht, sondern eine kontinuierliche Beobachtung vom Frühjahr an nötig wäre. Auch die Intensität der Blüte ist aus dem gleichen Grund für die WZE-Bäume nicht bekannt.

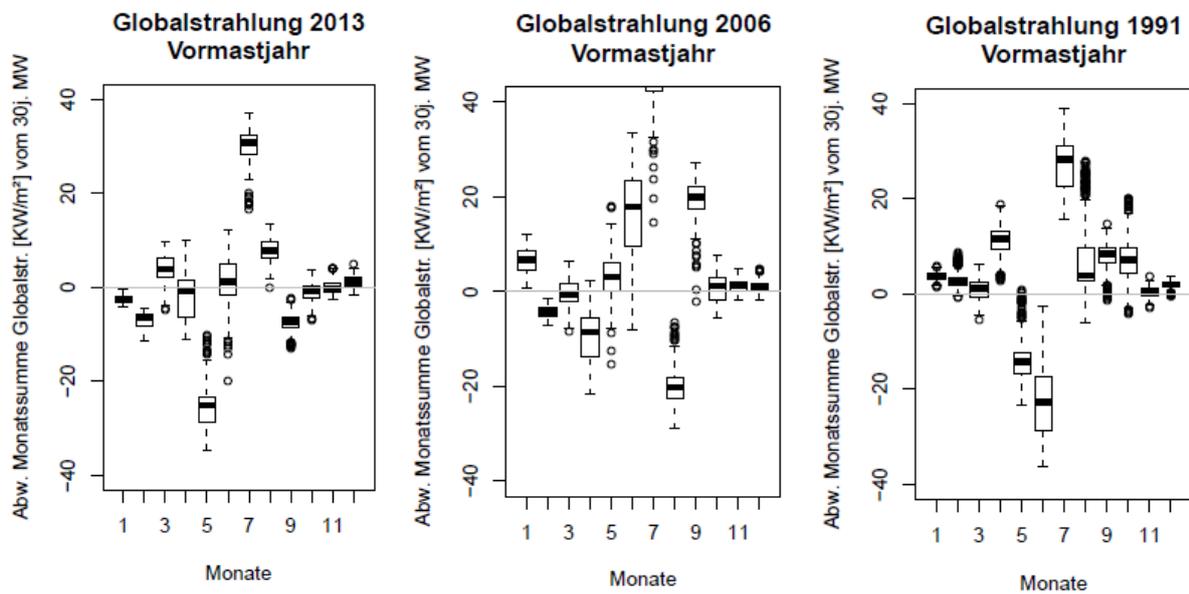


Abbildung 40: Globalstrahlung vor den starken Buchen-Mastjahren 2013, 2006 und 1991

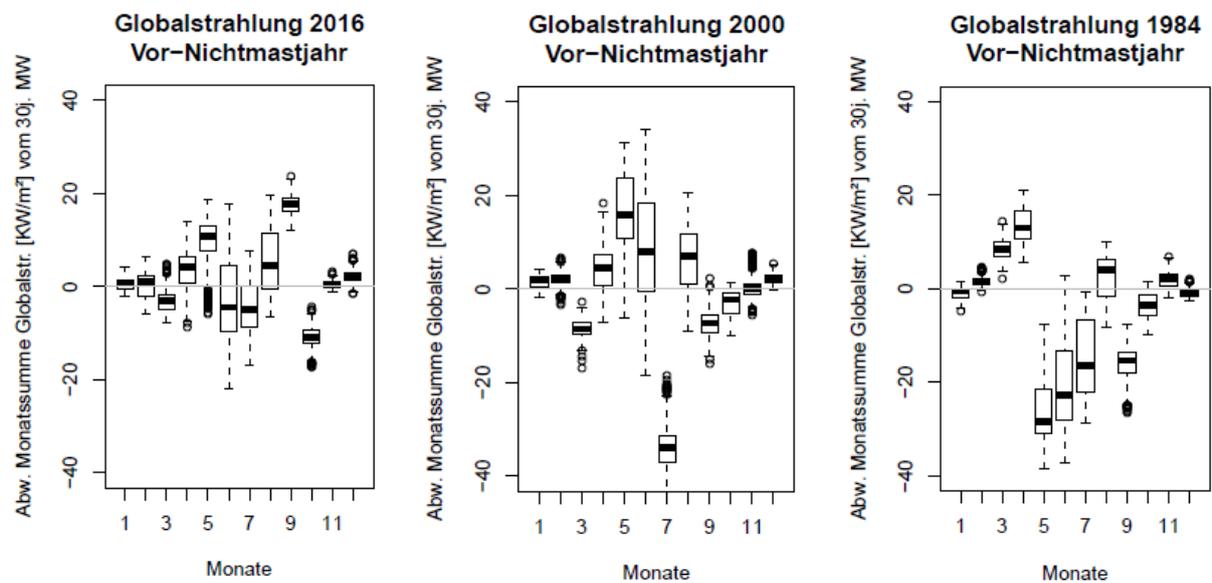


Abbildung 41: Globalstrahlung vor Jahren ohne Fruktifikation bei Buche 2016, 2000 und 1984

Ein Grund dafür könnte sein, dass auch die Bedingungen des Vorjahres eine Rolle spielen. Zu diesem Schluss kam auch GRUBER (2006, vgl. Tabelle 11).

Wie Abbildung 42 zeigt, ist für die Globalstrahlung kein deutlicher Unterschied zwischen beiden Gruppen zu erkennen. Die Strahlung im Sommer ist zwei Jahre vor einer Mast geringfügig niedriger als vor der Nichtmast. Ebenso ist der Niederschlag zwei Jahre vor der Mast nur etwas höher als vor der Nichtmast (vgl. Anhang 13).

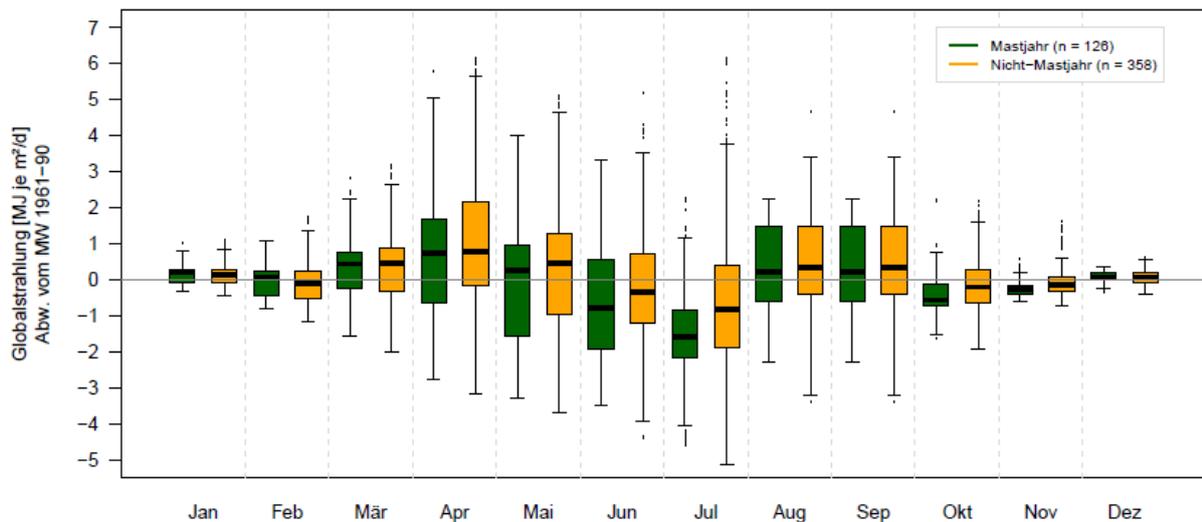


Abbildung 42: Abweichung des Monatsmittelwertes der Globalstrahlung 2 Jahre vor einer starken Mast (mdst. 2/3 der Bäume eines Plots fruktifizieren mittel bis stark) bzw. einer Nicht-Mast (90 % der Bäume eines Plots fruktifizieren nicht) vom langjährigen Mittel 1961-1990 auf BZE-Buchenflächen in Hessen, Niedersachsen, Sachsen-Anhalt und Schleswig-Holstein

Neben der Witterung scheinen demnach noch andere Faktoren für die Anlage von Blüten relevant zu sein. Nach MITSCHERLICH (1975) können Blüten nur angelegt werden, wenn der Baum zuvor ausreichend Reservestoffe bilden konnte.

3.6 Einflüsse auf den Zuwachs bei Buche in Hessen

Für einen Teil der Buchen auf WZE-Flächen in Hessen liegen seit 2006 Wachstumsinformationen vor. So können die Vitalitätskenngrößen der WZE und das Wachstum in Zusammenhang gebracht werden.

Zunächst wurde untersucht, ob Bäume gleichen Alters, die oft und stark fruktifizieren (Mastindex ist hoch), insgesamt schlechter wachsen, da sie ihre „erwirtschaftete“ Energie öfter in den Früchten binden als im Holz. Es zeigte sich jedoch, dass im Gegenteil diese Bäume im Mittel einen höheren Zuwachs haben können als Bäume, die selten und wenig fruktifizieren (vgl. Anhang 5).

Im Jahr mit starker Fruktifikation verringert sich jedoch der Zuwachs im Vergleich zu den Zuwächsen in Jahren ohne Früchte signifikant (Abbildung 44). In nicht ganz so starkem Ausmaß gilt dies auch für Jahre mit mittelstarker Fruktifikation (Abbildung 43 rechts). Wenn Buchen nur wenige Früchte (geringe Fruktifikation) haben, bleibt der Zuwachs auf gleichem Niveau (Abbildung 43 links).

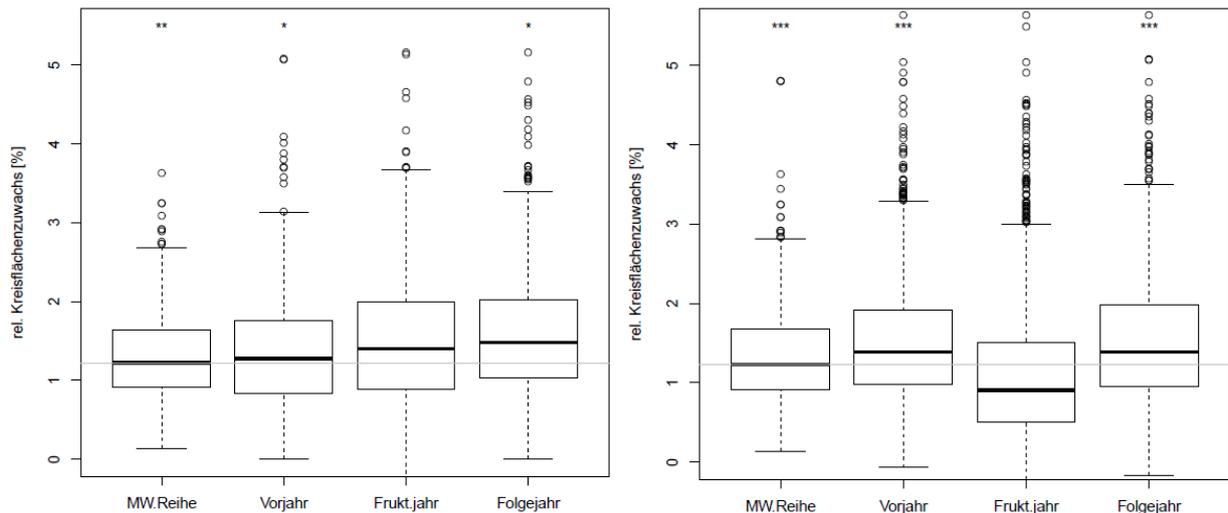


Abbildung 43: Vergleich des Zuwachses von Jahren mit geringer Fruktifikation (links) und mit mittelstarker Fruktifikation (rechts) mit dem des jeweiligen Vor- und Folgejahres und dem Zeitreihenmittelwert der entsprechenden Bäume (n = 573, Signifikanzniveaus der Unterschiede: ≤ 0.05 : *, ≤ 0.01 : **, ≤ 0.001 : *)**

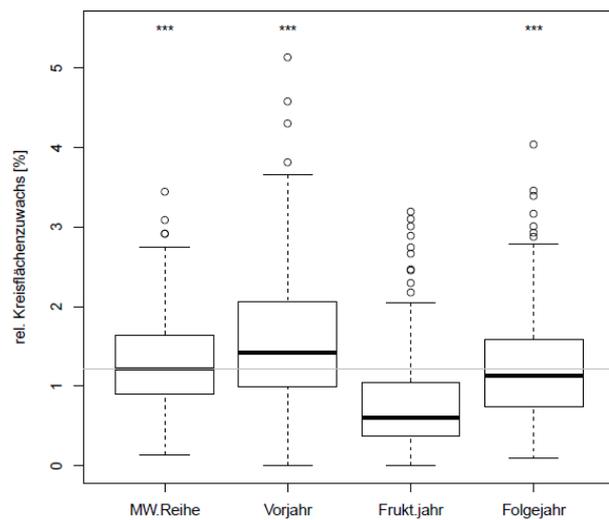


Abbildung 44: Vergleich des Zuwachses von Jahren mit starker Fruktifikation mit dem des jeweiligen Vor- und Folgejahres und dem Zeitreihenmittelwert der entsprechenden Bäume (n = 230, Signifikanzniveaus der Unterschiede: ≤ 0.05 : *, ≤ 0.01 : **, ≤ 0.001 : *)**

Abgesehen von der bekannten Beziehung von steigender Kronenverlichtung bei steigender Fruktifikation (Kapitel 3.4.3) ist zu vermuten, dass Bäume mit erhöhter Kronenverlichtung weniger Photosynthese betreiben können und dadurch einen geringeren Zuwachs haben. Abbildung 45 bestätigt das für ähnlich alte Buchen, die der herrschenden und vorherrschenden Baumklasse angehören. Die Unterschiede sind nicht sehr deutlich, die Fallzahlen der ersten vier Kronenverlichtungsstufen lassen jedoch auf ein stabiles Ergebnis schließen. Die Fallzahlen der letzten Stufe der sehr schwer geschädigten Bäume sind zu gering, um das Ergebnis als belastbar bezeichnen zu können.

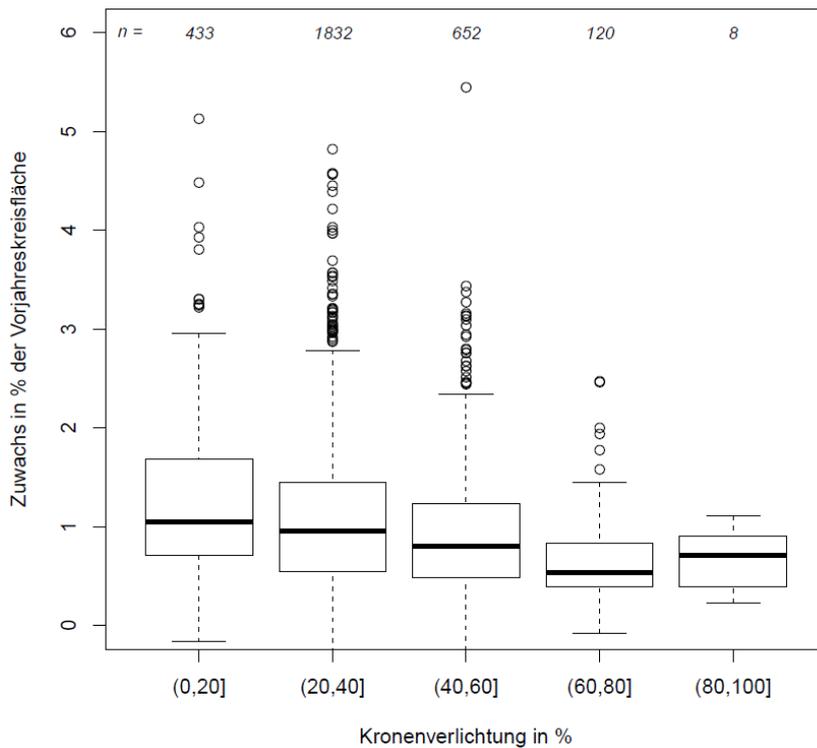


Abbildung 45: Zusammenhang zwischen Kronenverlichtung und Zuwachs bei hessischen Buche für ähnlich alte Bäume (120-180 Jahre) der Baumklassen 1 und 2.

Ebenso wie bei Fruktifikation und Kronenverlichtung lässt sich auch für das Wachstum ein Einfluss der Witterung vermuten. Eine Auswertung, bei der wachstumsstarke und wachstumsschwache Jahre gegenübergestellt wurden, zeigt einen signifikanten Unterschied für die Temperatur im September und Oktober (Abbildung 46). Allerdings ist dann das Dickenwachstum bei Buche eigentlich bereits abgeschlossen (HAUSER, 2003), ganz auszuschließen ist ein Zuwachs im September zumindest jedoch nicht (LISTING, 2011). Abschließend klären lassen sich die Unterschiede zwischen den September- und Oktobertemperaturen zuwachsstarker und zuwachsschwacher Jahre auf Basis der nur jährlich vorliegenden Daten nicht.

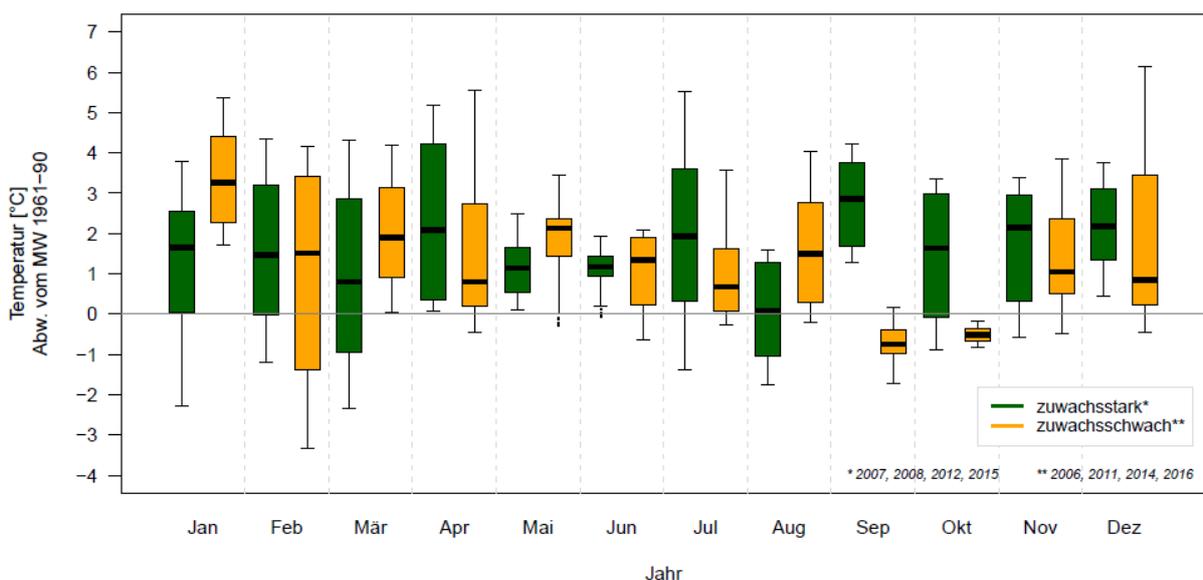


Abbildung 46: Monatsmitteltemperaturen als Vergleich zwischen wachstumsstarken und wachstumsschwachen Jahren bei hessischen Buchen. Angabe der Temperaturen als Abweichung vom langjährigen Mittel.

3.7 Mortalität

Das Absterben eines Baumes hat im Kontext der Vitalitätsbetrachtung ein besonderes Gewicht. Es definiert den unumkehrbaren Endpunkt aller Vitalität. Dadurch, dass im bewirtschafteten Wald nicht davon ausgegangen werden kann, dass Bäume aus Altersschwäche sterben, bedeutet jedes beobachtete Absterben eine Reaktion auf einen Stressor.

Um die Frage, ob das Absterben eines Baumes bereits im Vorfeld (und damit im Vorjahr bei der WZE) erkennbar ist, zu beantworten, wurden alle Fälle des Datensatzes, in denen Bäume allmählich abstarben und die bis zum vollständigen Blatt- bzw. Nadelverlust im Bestand verblieben, extrahiert. Für diese Bäume wurde der Verlauf der Kronenverlichtung vor dem Absterben ermittelt, indem das Jahr des Absterbens als das „Jahr Null“ gesetzt wurde und die Zeiträume davor als relative Jahre auf diesen Nullpunkt zulaufend definiert wurden. Je später das Absterben in der WZE-Zeitspanne erfolgte, desto länger kann die Zeitreihe im Diagramm sein. Für Ausfälle zu Beginn der Zeitreihe oder auch für Bäume, die als Ersatz für einen ausgefallenen Baum in das WZE-Kollektiv aufgenommen wurden, kann die Zeitreihe daher relativ kurz sein. Darum unterscheiden sich die Baumzahlen für die relativen Jahre vor dem Absterben. Der Betrachtungszeitraum reicht hier von 1984 bis 2018, da diese Auswertung bereits im Jahr 2019 erfolgte und nicht noch um das Jahr 2019 erweitert wurde.

Für Buche ist in Abbildung 47 zu erkennen, dass es in den Jahren vor dem Absterben einen deutlichen Anstieg der Kronenverlichtung gibt. Insgesamt 49 Buchen starben im WZE-Zeitraum ab. Diese Buchen hatten im Vorjahr des Absterbens eine deutlich erhöhte Kronenverlichtung von im Mittel 80 %, und auch im Vorvorjahr erhöhte Werte von im Mittel 50 %. Die mittlere Kronenverlichtung liegt bei Buche im Gesamtdatensatz unter 30 % (vgl. WZE-Berichte, NW-FVA 2019 a-d). Bereits drei Jahre vor dem Absterben liegen die mittleren Kronenverlichtungswerte absterbender Buchen darüber.

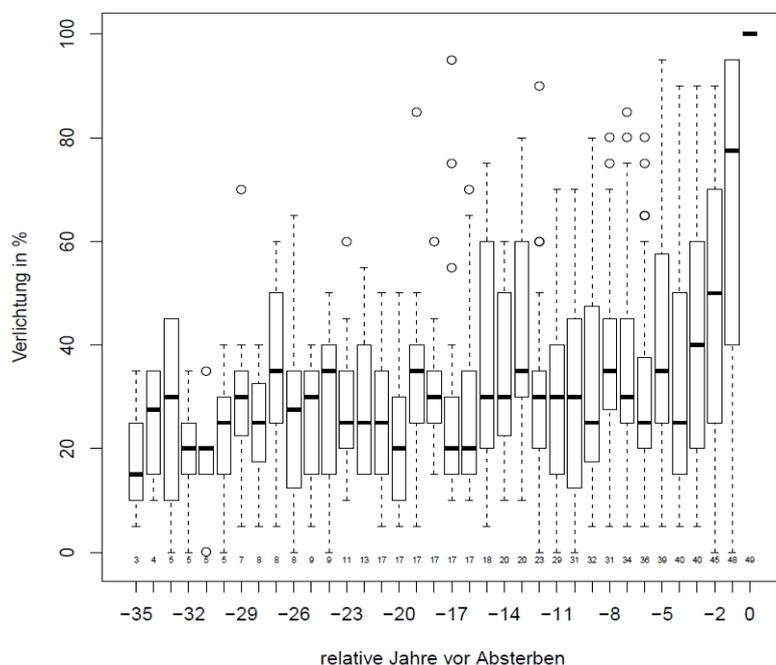


Abbildung 47: Entwicklung der Kronenverlichtung bei Rotbuche vor ihrem Absterben. Gesamtzahl absterbender Bäume = 49 (Auswertungszeitraum 1984 – 2018)

Dass für Eichen ein ähnliches Bild gilt, zeigt Abbildung 48. Insgesamt 81 Eichen starben ab und verblieben stehend tot im Bestand. Eichen über 60 Jahre haben aktuell eine mittlere Kronenverlichtung

von knapp über 30 % (NW-FVA 2019 a-d). Absterbende Eichen liegen mindestens zwei Jahre vor ihrem Tod deutlich über diesem Wert.

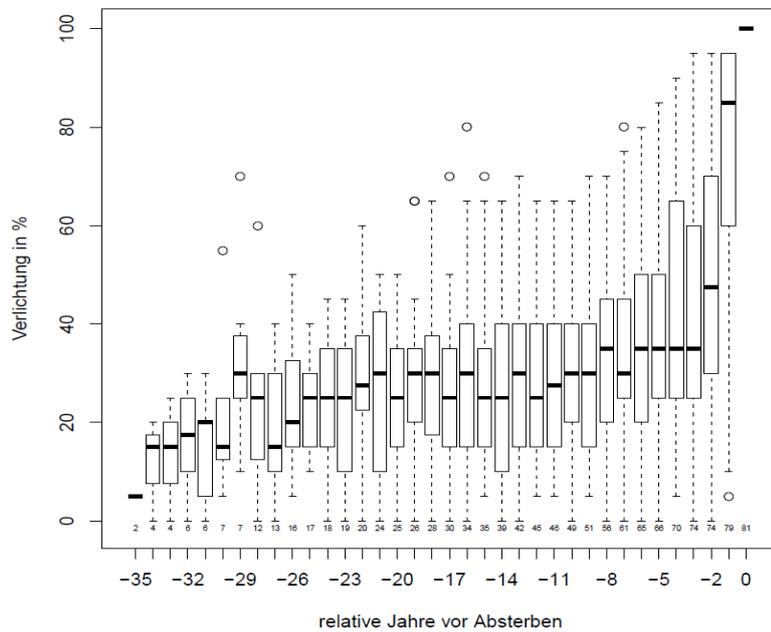


Abbildung 48: Entwicklung der Kronenverlichtung bei Eiche vor ihrem Absterben. Gesamtzahl absterbender Bäume = 81 (Auswertezeitraum 1984 – 2018)

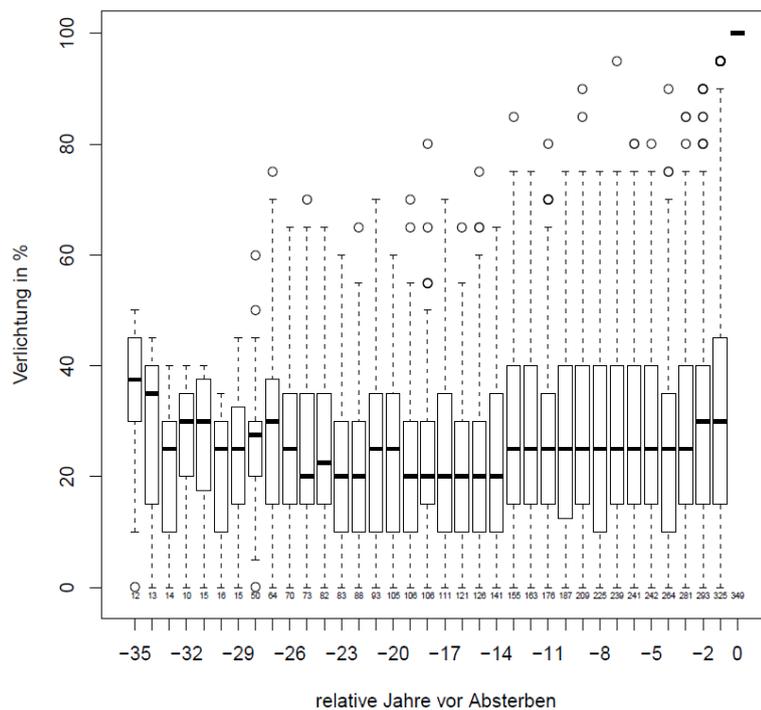


Abbildung 49: Entwicklung der Kronenverlichtung bei Fichte vor ihrem Absterben. Gesamtzahl absterbender Bäume = 349 (Auswertezeitraum 1984 – 2018)

Bei der Fichte zeigt sich ein anderes Bild als für die zwei Laubbaumarten (vgl. Abbildung 49). Die mittleren Kronenverlichtungen vor einem Absterben bewegen sich im Rahmen der Werte des Gesamtdatensatzes und spiegeln somit die Geschwindigkeit des Vitalitätsverlustes wider, der durch den Befall mit holzbohrenden Insekten wie Borkenkäfer einhergeht. Insgesamt 349 Fichten, von denen noch im Vorjahr mehr als die Hälfte eine mittlere Kronenverlichtung von unter 30 % hatten und die damit als vital zu betrachten sind, starben innerhalb eines Jahres ab.

Im Gegensatz dazu ist bei Kiefer wie auch bei den Laubbaumarten ein allmählicher Anstieg der Kronenverlichtungswerte in den Jahren vor dem Absterben zu erkennen (vgl. Abbildung 50). Insgesamt 301 Kiefern starben im WZE-Zeitraum ab, und mehr als die Hälfte dieser Bäume hatten schon im Vorjahr eine erhöhte Kronenverlichtung. Auch zwei Jahre vor dem Absterben sind die Werte überdurchschnittlich hoch.

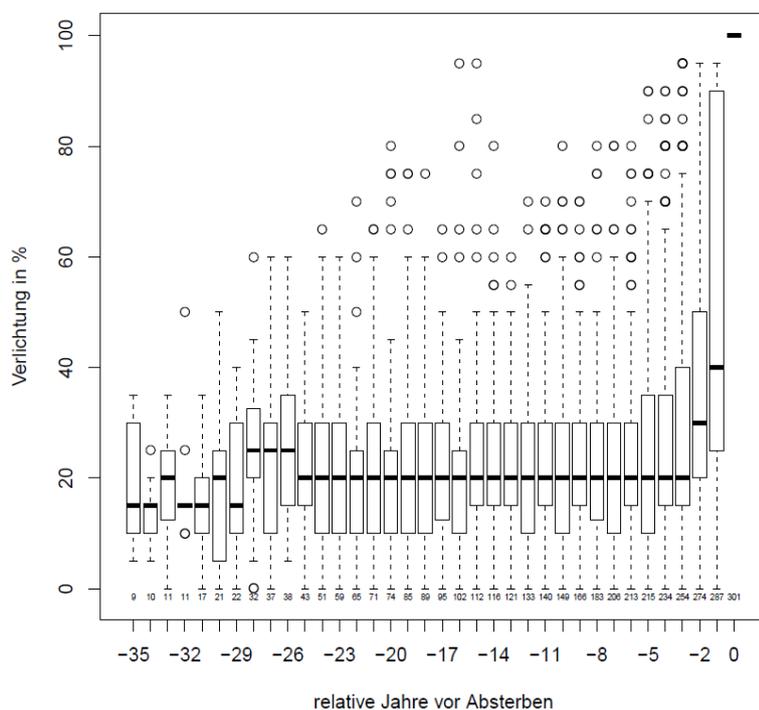


Abbildung 50: Entwicklung der Kronenverlichtung bei Kiefer vor ihrem Absterben. Gesamtzahl absterbender Bäume = 301

Für die vier Hauptbaumarten kann demnach festgehalten werden, dass dem Absterben von Buche, Eiche und Kiefer in den meisten Fällen eine erhöhte Kronenverlichtung vorausgeht. Dies wird auch durch Angaben aus der Literatur bestätigt (BRAUN ET AL., 2018). Allerdings bedeutet das im Umkehrschluss nicht, dass erhöhte Kronenverlichtungswerte zwangsläufig zum Absterben führen. Die Absterberate vor allem für Eichen und Kiefern mit hoher Kronenverlichtung ist zwar größer als für Bäume mit geringer Kronenverlichtung (Abbildung 51), der überwiegende Teil der Bäume überlebte jedoch bisher. Bei Eiche liegt die Absterberate von Bäumen mit erhöhter Kronenverlichtung (über 60 %) mit 25 % deutlich über der von Bäumen mit geringerer Kronenverlichtung, die bei 0,06 % liegt. Die höchste Absterberate von Bäumen mit geringerer Kronenverlichtung hat erwartungsgemäß mit 5,4 % die Fichte, Kiefer und Buche liegen mit 2,9 % bzw. 0,36 % darunter. Ebenfalls erwartungstreu ist die sehr niedrige Absterberate von Buchen mit hoher Kronenverlichtung, die bei 4,4 % liegt, während sie für Fichte bei 11 % und für Kiefer bei 26 % liegt. Das Absterberisiko für Bäume mit hoher Kronenverlichtung ist demnach für Eiche am höchsten.

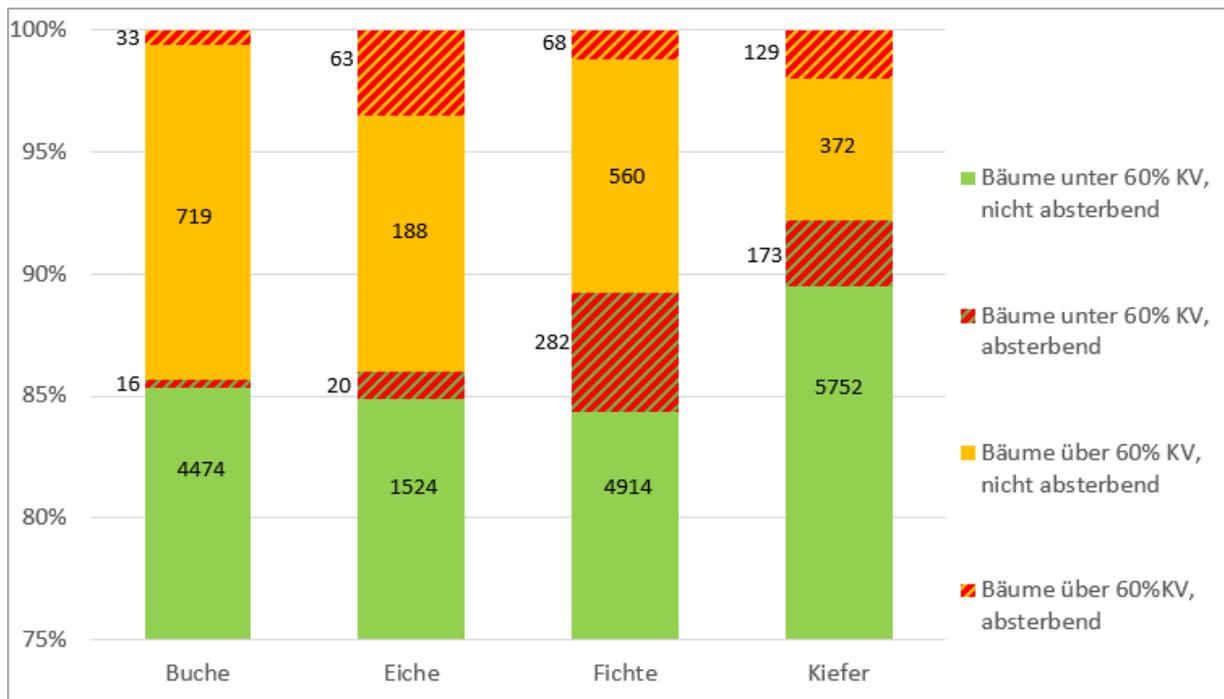


Abbildung 51: Absterberaten von Buchen, Eichen, Fichten und Kiefern mit geringerer Kronenverlichtung (< 60%) und mit hoher Kronenverlichtung (>= 60%). In und neben den Balken stehende Zahlen sind absolute Anzahlen, die Ordinate zeigt den prozentualen Anteil am Gesamtkollektiv der Baumart.

Bei Fichte können Absterbeprozesse, die auf Insektenbefall zurückzuführen sind, sehr schnell vor sich geht und damit auch zwischen zwei WZE-Aufnahmen stattfinden. Häufige Gründe für das Ausscheiden eines Baumes aus dem WZE-Kollektiv sind neben der planmäßigen Nutzung biotische (Insekten, Pilze) und abiotische (z.B. Stürme) Einflüsse.

Ob das Absterben von Bäumen einer Baumart regional gehäuft auftritt, ist in Abbildung 52 zu sehen. Die Karte zeigt die vier untersuchten Bundesländer mit den WZE-Punkten, auf denen es bereits Ausfälle von Buchen (braun), Eichen (gelb), Fichten (blau) und Kiefern (grau) gab. Je höher die Zahl der Ausfälle, desto intensiver der Farbton. Das Maximum wird hier bei Fichte mit insgesamt 93 Ausfällen für einen Plot im gesamten Betrachtungszeitraum erreicht.

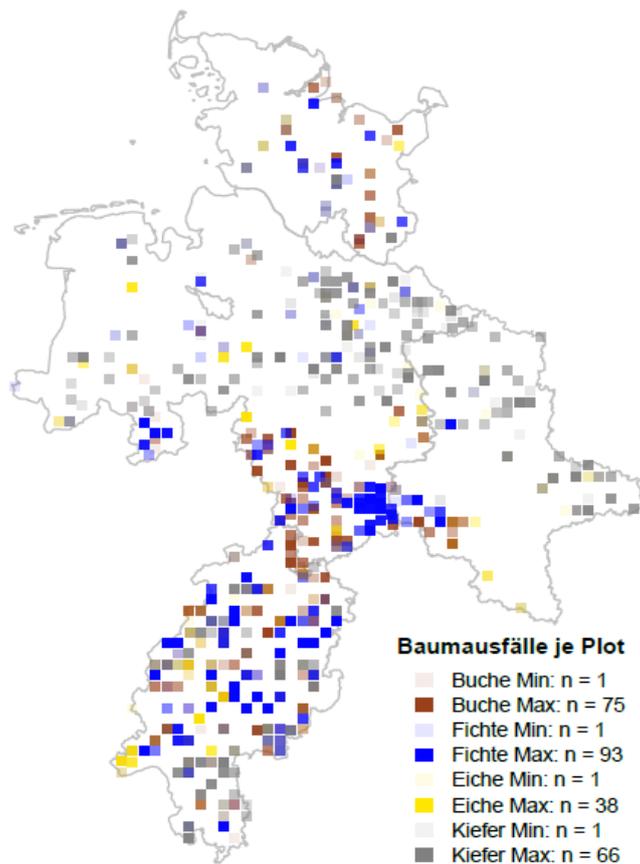


Abbildung 52: Überblick über ausgefallenen Bäume auf WZE-Standorten in den Trägerländern der NW-FVA im Zeitraum 1985-2018 (ohne methodenbedingte Ausfälle, vgl. Kap. 3.1 und ENGELHARD, 2020). Die Farbtintensität zeigt für die Hauptbaumarten die Anzahl der Ausfälle an.

Die Karte in Abbildung 52 zeigt indirekt den Schwerpunkt der Baumartenvorkommen wie z.B. der Fichte im Harz, der Kiefer in Sachsen-Anhalt, Niedersachsen und Südhessen und der Buche hauptsächlich in Hessen, aber auch Südniedersachsen und Schleswig-Holstein. Die Vorkommen der Eiche verteilen sich über die tieferen Lagen der vier Bundesländer. Auffällig sind höhere Ausfälle für Buche, aber auch Fichte in Hessen und Südniedersachsen. Vor allem der südhessische Raum (Hessisches Ried) fällt mit vielen Ausfällen bei allen vier Hauptbaumarten auf. Hohe Fichtenausfälle sind in Südniedersachsen und dem Südwesten Sachsens-Anhalts (Harz) zu erkennen. Kiefern haben in den Reinbeständen Sachsens-Anhalts oder Niedersachsens erhöhte Ausfälle, liegen jedoch insgesamt unter den Zahlen von Fichte. Die Eiche hat die geringsten Ausfälle, sie ist allerdings auch nicht so stark vertreten wie die anderen Baumarten und kommt im Kollektiv der WZE seltener in Reinbeständen vor.

Zur Mortalität von Buchen, Eichen, Fichten und Kiefern aus dem WZE-Kollektiv wurde im Rahmen des Projektes eine Masterarbeit angefertigt, nach welcher die Fichte insgesamt am häufigsten ausfiel, gefolgt von Kiefer, Buche und Eiche (ENGELHARD, 2020). Diese absolute Einschätzung begründet sich zum einen mit der starken Verbreitung der Fichte in den betrachteten Wäldern auf teilweise auch nicht optimal geeigneten Standorten (z.B. Windexposition oder Bestandesstruktur) und zum anderen mit der hohen Anfälligkeit der Fichte in Trockenjahren gegen Schadinsekten und gegen Sturm. Bei allen Baumarten erhöhten sich die Ausfälle nach Extremjahren wie 2003 (Trockenheit), 2007 (Sturm) oder 2018 (Trockenheit und Sturm), wobei die Nadelbäume schneller reagierten als die Laubbäume.

3.8 Analyse einer Abfolge vitalitätsbeschreibender Symptome

Im Zuge einer stärkeren Beeinflussung des Kronenzustandes durch veränderliche Witterungsbedingungen wurde das methodische Konzept der Waldzustandserhebung angepasst. Merkmale, die einen

Zusammenhang mit Witterungsereignissen erkennen lassen, erhielten in der Inventur eine höhere Beachtung und wurden im Qualitätsmanagement stärker berücksichtigt. Dies umfasst sowohl morphologische als auch biotische Indikatoren. Die Standard-Inventur im Juni/Juli des Jahres wurde durch eine zweite ergänzt, die das spätsommerliche Erscheinungsbild vor dem herbstlichen Laubfall zahlenmäßig abbildet.

Auf Grundlage einer Anzahl dieser Parameter sollte im Rahmen der Projektarbeit ein Summenindex erstellt werden, der eine allmähliche Vitalitätsschwäche dokumentiert. Damit sollten sowohl klimatische als auch parasitäre Belastungen abgebildet werden. Ziel sollte sein, morphologische Veränderungen abzubilden, für die ein Zusammenhang mit nacheinander bzw. gleichzeitig auftretenden, auch miteinander gekoppelten Stressoren zu erwarten ist. Als Indikatoren sollten folgende Kenngrößen einfließen:

- Nadel-Blattverlust (Kronenverlichtung) im Sommer sowie Frühherbst
- Insektenbefall,
- Pilzbefall
- Harz-/Schleimfluss
- Vergilbung
- Vorzeitige Blattverfärbung
- Vorzeitiger Blattabwurf
- Vorzeitiger Fruchtfall
- Grüne Blätter auf dem Boden
- Gerollte Blätter
- Mortalität

Das sukzessiv erhöhte Auftreten möglicher Stresssymptome wie gerollte Blätter, Kleinblättrigkeit, frühzeitiger Blattabwurf, Insektenbefall oder auch Pilzbefall sollte auf einen Zusammenhang mit erhöhter Kronenverlichtung, verringertem Wachstum und letztendlich Mortalität geprüft werden. Zusätzlich wurden Literaturhinweise genutzt.

Die so aufgenommenen Symptome weisen auf Stresslevels der Bäume hin. Nach WOHLGEMUTH ET AL. (2020) ist beispielsweise der vorzeitige Blattfall vermutlich ein Symptom sehr starken Stresses, der vor allem bei Buche auf ein erhöhtes Absterberisiko schließen lässt. Das Phänomen des Blattrollens, das in den vergangenen Jahren offenbar vermehrt beobachtet werden konnte, scheint in Zusammenhang mit einem Verdunstungsschutz der Bäume zu stehen und könnte als Anpassungsreaktion auf warm/trockene Bedingungen in der Vegetationszeit verstanden werden.

Um solche modellhafte Ansätze weiter verfolgen zu können, werden Daten bestimmter Qualität benötigt. Zunächst lag daher ein Arbeitsschwerpunkt in der Schaffung einer soliden Basis für eine gesicherte statistische Auswertung. Dafür sind kontinuierlichen Zeitreihen zu erstellen, was zum aktuellen Zeitpunkt noch nicht möglich ist. Die Merkmale sind definiert, dennoch ist die Homogenität der Daten aktuell nicht sichergestellt.

In der Qualität der Daten bestehen Unterschiede. Unter Feldbedingungen recht schwierig zu erheben ist beispielsweise das Merkmal des vorzeitigen Blattfalls, das in der Literatur als starkes Stresssymptom beschrieben ist (Wohlgemuth et al. 2020) und auch aus diesem Grund als wertvolle Kenngröße betrachtet werden kann. Aktuell liegen für die vier betrachteten Bundesländer keine lückenlosen Datensätze vor. Begründet ist dies etwa in der schwierigen Deckungsgradschätzung frühzeitig heruntergefallener Blätter, insbesondere, wenn in der Anfangsphase nur sehr wenige Blätter heruntergefallen sind. Zudem liegen die Blätter morphologisch in sehr unterschiedlichen Ausprägungen vor. Mögliche Windverwehungen erschweren die Zuordnung zu Einzelbäumen.

Noch ist offen, ob sich mit diesen methodischen Anpassungen eine bessere Dokumentation von Veränderungen der Wälder durch Witterungsextreme abbilden lässt. Der Ansatz der kombinierten Betrachtung ist vielversprechend und sollte weiter verfolgt werden.

4 Diskussion und Bewertung der Ergebnisse

Das hier vorgestellte Projekt hatte das Ziel, ein gesamtheitliches Bild über den Vitalitätszustand der vier Hauptbaumarten Buche, Eiche, Fichte und Kiefer zu erarbeiten. Als Basis dienen die Daten der Waldzustandserhebung, die mit ihren vielfältigen Aufnahmen integrierender Vitalitätskenngrößen eine sehr gute Basis für eine solche Auswertung bieten. Vitalität bezeichnet dabei einen Zustand, der ein optimales Wachstum und eine optimale Vermehrung gewährleistet und die Langlebigkeit der Individuen sichert (nach GEHRING, 2004).

Um der Kernfrage des Projektes nachzugehen, soll analysiert werden, welche Witterungseinflüsse aktuell die größten Risiken für die Wälder darstellen. Generell ist davon auszugehen, dass Bäume als sehr langlebige und standortsgebundene Lebewesen an ihren Standort angepasst sind. Veränderungen, die sich i.d.R. durch Witterung oder Strukturänderungen des Bestandes ergeben, müssen sie in einem gewissen Rahmen verkraften können. Hier zeigt sich die baumindividuelle Resistenz oder Resilienz: reagiert der Baum auf Störungen mit z.B. erhöhter Kronenverlichtung oder einem verringerten Zuwachs, ist das als verminderte Resistenz zu werten. Erholt er sich jedoch schnell wieder, gilt er als resilient, d.h. er findet zu dem Level zurück, welches er vor der Störung aufwies.

Im folgenden Kapitel werden Störungen aufgezeigt, die im Betrachtungszeitraum zu Reaktionen auf die Baumvitalität geführt haben.

4.1 Risikofaktoren in der Vergangenheit

4.1.1 Sturm

Stürme sind ein natürliches Phänomen, das in unseren Breiten natürlicherweise immer wieder vorkommt. Gemäß dem DWD (2021) ist Sturm die Bezeichnung für Wind von großer Heftigkeit, mit Stärken nach der Beaufort-Skala von 9 bis 11 (74 bis 117 km/h), der erhebliche Schäden und Zerstörungen anrichten kann. Vor allem für den Wald bedeutet er immer eine natürliche Störung, wenn Bäume umstürzen oder Baumteile abgebrochen werden. Dabei sind Entwurzlungen oder Stammbrüche tödliche Störungen, die für die betroffenen Bäume nicht reversibel sind.

Eine detaillierte Untersuchung von Stürmen war im vorliegenden Projekt nicht möglich. Die zur Verfügung stehenden Witterungsdaten können zwar Auskunft über mittlere Tageswindgeschwindigkeiten geben, nicht jedoch zu Spitzengeschwindigkeiten, die für eine solche Auswertung ausschlaggebend sind. Eine Auswertung der Daten zeigte, dass sich im Betrachtungszeitraum keine nennenswerten Änderungen der Sturmhäufigkeiten oder Windstärken ergaben (Anhang 18).

Stürme sind eine Ursache für das nicht beeinflussbare Ausscheiden von Bäumen, die als Baumausfall mit „abiotischer Ursache“ in den Datenbestand eingeht und alle Baumarten treffen. Die Auswirkungen von Stürmen wie Daria, Vivian und Wibke Anfang 1990, nach Kyrill im Januar 2007 oder Friederike im Januar 2018 sind deutlich in den Baumausfällen zu erkennen (vgl. ENGELHARD, 2020). Besonders anfällig für Sturmschäden ist die Fichte, die als Tellerwurzler nicht die größte Standfestigkeit besitzt. Ungünstig können sich dabei

- Standorte in windexponierten Lagen (westliche Hangexposition, Kammlagen),
- Fehlbestockungen (z.B. Fichte auf staunassen Standorten) und
- Winterstürme in milden Wintern ohne Bodenfrost nach sehr feuchten Bedingungen (Böden sind aufgeweicht)

auswirken. In gleichförmigen Beständen (Reinbestände mit gleichalten Fichten) können so ganze Bestände vernichtet werden. Windgeworfene Fichten stellen für die Forstwirtschaft insofern eine Gefahr dar, dass sie Brutraum für den Borkenkäfer darstellen (NW-FVA, 2015). Werden Windwürfe

nicht schnellstmöglich aufgearbeitet, werden sie zur Quelle einer folgenden, dann biotischen Störung für den noch stehenden Bestand in der darauf folgenden Vegetationsperiode.

Ob sich Stürme in Zukunft verstärken oder häufiger auftreten, kann bisher schwer abgeschätzt werden. Nach JACKSON ET AL. (2015) werden zukünftig stärkere Winterstürme wahrscheinlich. Unbestritten bleibt, dass Stürme nach wie vor eine Rolle spielen und auch weiterhin als natürliche Störung der Waldökosysteme auftreten werden.

4.1.2 Trockenheit

Der Begriff „Trockenheit“ ist als Störung für Wälder nicht eindeutig definierbar. Es bezeichnet einen Zustand, der sich am langjährigen Mittel orientiert und eine Abweichung zum Trockeneren beschreibt. Die Baumarten können unterschiedlich mit Trockenheit umgehen. Die Sensitivität ist dabei neben der Artabhängigkeit situationsbezogen. Folgende Umstände können kritische, vitalitätseinschränkende Folgen haben:

- Trockenheit (mehrere Wochen ohne Niederschlag) bei gleichzeitig hohen Temperaturen: Erhöhung der Verdunstung, stark negative Klimatische Wasserbilanz. Die Bodenwasserspeicher reichen im Extremfall nicht aus, um dem Verdunstungsanspruch der Vegetation zu erfüllen. Zusätzlicher Wind kann die Situation verschärfen.
- milde und niederschlagsarme Winter: Das Wasserdefizit, das sich über die Vegetationszeit aufbaut, kann nicht ausgeglichen werden. Es fehlt Wasser zu Beginn der neuen Vegetationsperiode.

In der Fachliteratur gibt es mehrere Indikatoren, die sich unter Klimabezug zur Beurteilung des Trockenstressrisikos einzelner Baumarten eignen. CZÚCZ ET AL. (2011) bezeichnen die Temperaturen und Niederschläge des späten Frühjahres und des Sommers entscheidend für das Vorkommen sowohl von Buche als auch (Trauben)Eiche, wobei für Buche noch Sommertrockenheit als Risiko hinzukommt. Für die Betrachtung der Buchenvorkommen in Ungarn befürchten sie infolge der Klimaveränderungen einen Rückgang der Buchen- und Eichenvorkommen bis zum Jahr 2050 um mehr als die Hälfte (CZÚCZ ET AL., 2011). Als kritische Grenze für die Verbreitung der Buche geben sie eine langjährige Jahresmitteltemperatur von 9,3 °C bei mittleren Jahresniederschlägen von mindestens 680 mm an. Als kritischen Ellenberg-Quotienten geben CZÚCZ ET AL. (2011) einen Wert von 28,9 °C/mm an (vgl. auch Tabelle 12).

Tabelle 12: Klimaindikatoren zur Beurteilung des Trockenstressrisikos (* Grenzwert für hohes Trockenstressrisiko)

Indikator	Quelle	Herleitung	Grenzwert Buche	Grenzwert Eiche	Grenzwert Fichte	Grenzwert Kiefer
Ellenberg-Quotient (EQ)	CZÚCZ ET AL. (2011)	$EQ = (1000 * \text{Juli-Temp.}) / \text{Jahresniederschlag}$	28,9			
Forestry aridity index (FAI)	FÜHRER ET AL. (2011)	$FAI = 100 * MW \text{ Temp (Jul-Aug) / (Sum Nied (Mai-Jul) + Sum Nied (Jul-Aug))}$	< 4,75	6,00 - 7,25		
Standortswasserbilanz	BÖCKMANN ET AL. (2019)	$StWB = KW B_{veg.} + nFK$	< -100 mm*	< -350 mm*	< -80 mm*	< -450 mm*

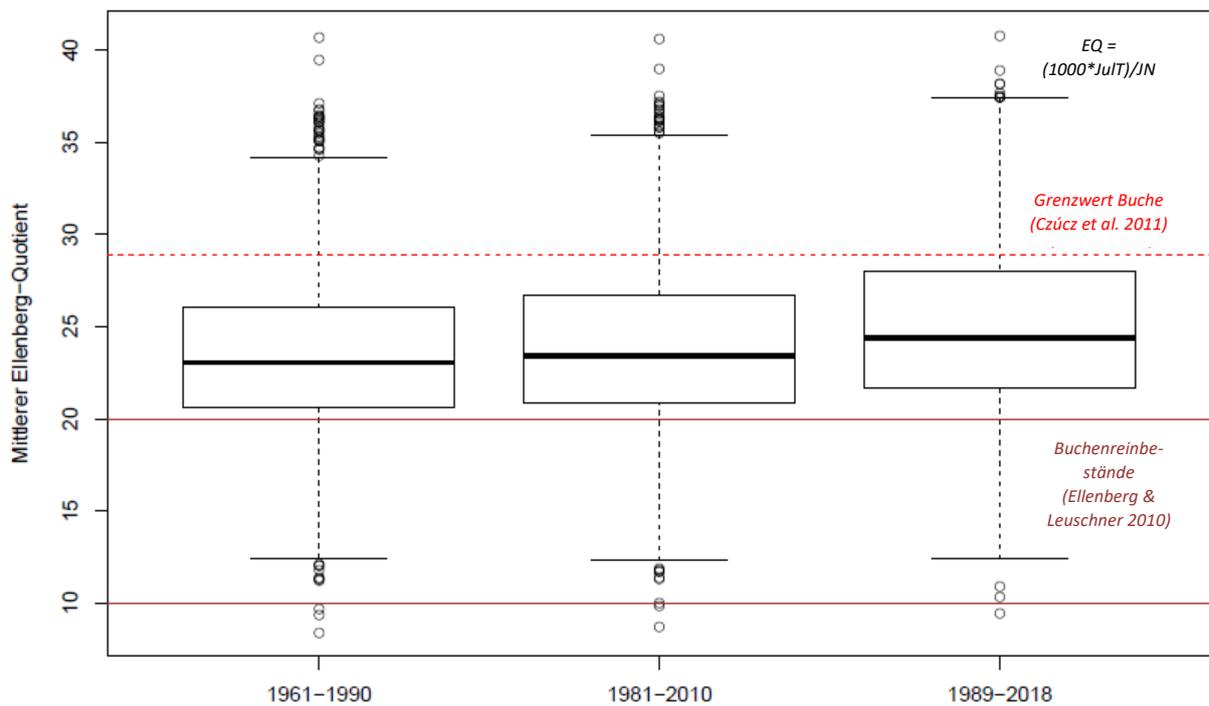


Abbildung 53: Ellenberg-Quotient (EQ) auf BZE-Plots mit Buchenreinbeständen in Hessen, Niedersachsen, Sachsen-Anhalt und Schleswig-Holstein

Abbildung 53 gibt einen Überblick über die mittleren Ellenberg-Quotienten der Buchenreinbestände im vorliegenden Datensatz. Verglichen werden jeweils 30-jährige Mittelwerte von 1961-1990, 1981-2010 und 1989-2018. Der Quotient für die gleichen Plots steigt allmählich an, da sich die Julitemperatur langsam erhöht, ohne dass sich die Niederschläge adäquat verändern. Für den Großteil der Plots wurden Werte berechnet, die sich über dem Wert, den ELLENBERG & LEUSCHNER (2010) für Buchenreinbestände angeben, befinden und noch deutlich unter dem Wert, den CZÚCZ ET AL. (2011) als Verbreitungsgrenze für Buche angeben. Es ist allerdings ein Trend zu erkennen, der in Richtung der Trocken- grenze nach CZÚCZ ET AL. (2011) führt. Der Grenzwert bezieht sich zwar auf längere Zeiträume, dennoch soll hier ein Blick auf die Jahreswerte geworfen werden.

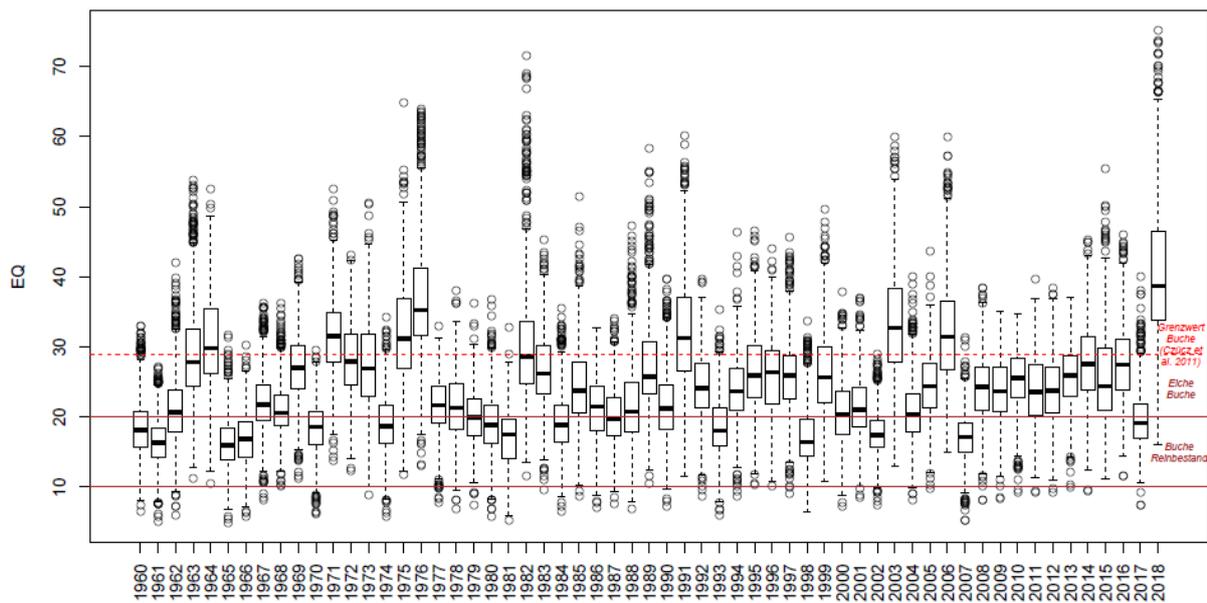


Abbildung 54: Ellenberg-Quotient auf BZE-Flächen mit Buchen-Reinbeständen in Hessen, Niedersachsen, Schleswig-Holstein und Sachsen-Anhalt.

Abbildung 54 macht deutlich, um wieviel wärmer und trockener das Jahr 2018 im Vergleich zu den Vorjahren war. Auf fast allen Buchenplots herrschten Bedingungen, die für Buchen zu deutlichem Trockenstress führen. Der Wert liegt höher als im Jahr 1976, das bisher immer als Jahr mit dem höchsten Trockenstress galt. Nach dem Jahr 1976 gab es aus Forstbüchern und mündlichen Berichten Informationen zu verstärktem Absterben von Buchen in Hessen.

Tabelle 12 enthält Grenzwerte nach verschiedenen Methoden, die auf die Trockengrenze vor allem der Buche, aber auch von Eiche, Fichte und Kiefer schließen. Sie verstehen sich als langjährige Mittel, die einen Anbau der jeweiligen Baumart empfehlen oder in Frage stellen. Diese Grenzwerte gelten nicht absolut und uneingeschränkt, wie Abbildung 53 verdeutlicht. Zwar liegt der Ellenberg-Quotient des Großteiles der Buchenflächen unterhalb des von CZÚCZ ET AL. (2011) angegebenen Grenzwertes, aber einige auch darüber, ohne dass diese Buchen bisher abgestorben sind. Ähnliches zeigt der Grenzwert von BÖCKMANN ET AL. (2019), wobei betont werden muss, dass dieser Wert einen Hinweis über die Wirtschaftlichkeit des Anbaus der betreffenden Baumart geben soll.

In Abbildung 55 gut zu erkennen ist, dass die Jahre 2003 und 2018 als trockenste Jahre der Zeitreihe – hier abgebildet als Standortwasserbilanz – deutlich nach unten ausschlagen. Ebenfalls erkennbar sind vergleichsweise niedrige Werte in den 90er Jahren. Dies passt zusammen mit der Erhöhung der Kronenverlichtung (vgl. Abbildung 13) in diesen Jahren. Hieraus sollte allerdings kein direkter Rückschluss gezogen werden, da andere Einflussfaktoren unberücksichtigt bleiben.

In Abbildung 55 sind zusätzlich die Werte der jährlichen Standortwasserbilanzen von Plots eingefügt, auf denen 2019 Buchen, Eichen Fichten oder Kiefern (von oben nach unten in der Abbildung) abgestorben sind. Bei der Analyse kam heraus, dass bei allen 2019 abgestorbenen Buchen und Eichen das Minimum der Zeitreihe im Jahr 2018 lag. Bei den Fichten und Kiefern war es überwiegend auch so, mit einigen Ausnahmen, wo das Jahr 2003 noch trockener war. Es ist aber auch zu erkennen, dass die Plots mit abgestorbenen Bäumen nicht zwingend die allertrockensten im Jahr 2018 waren.

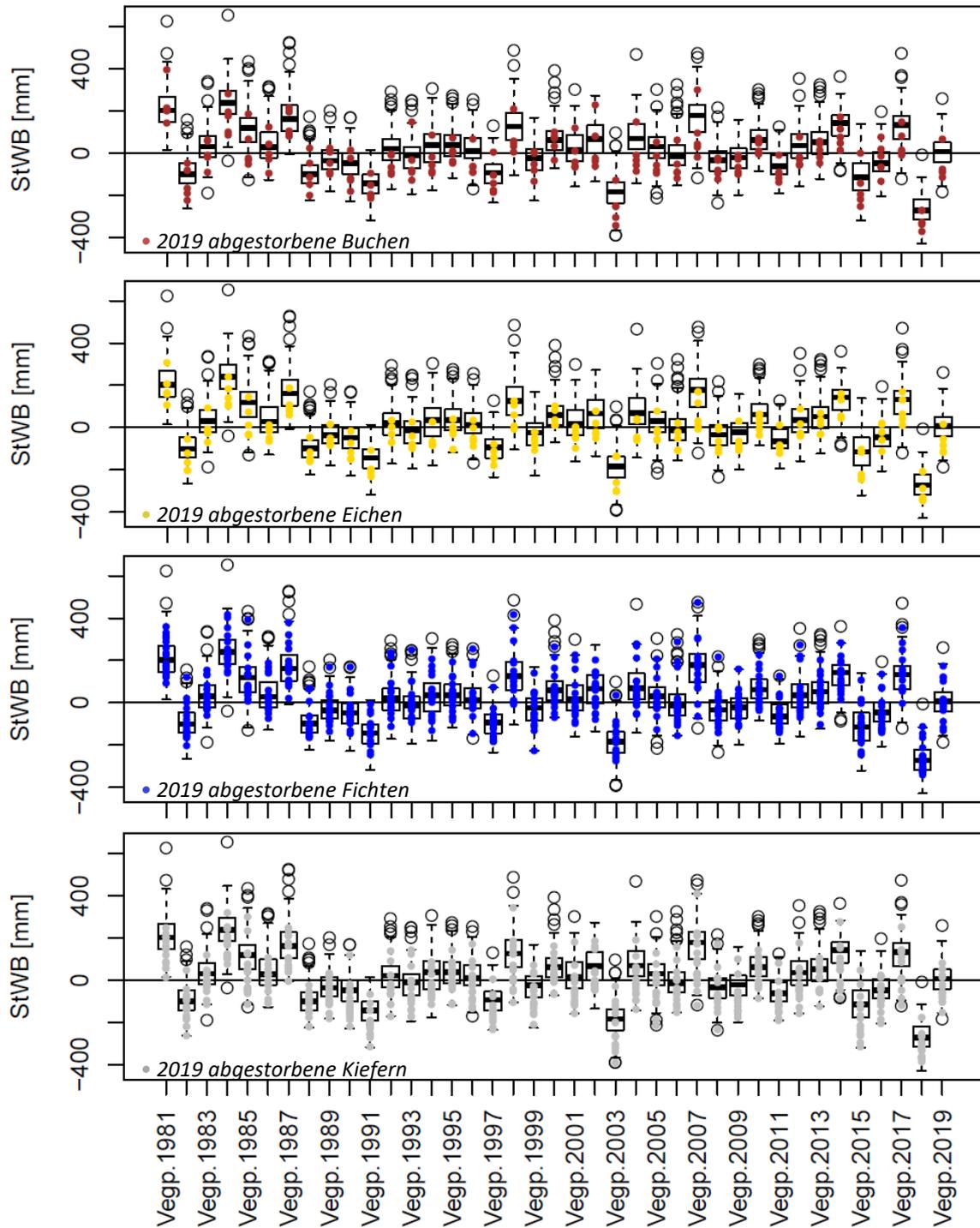


Abbildung 55: Standortwasserbilanz ($KWB_{Veg.} + nFK$) auf hessischen BZE-Plots in den Jahren der Waldzustandserhebung

Ohne Erfolg wurde versucht, einen Schwellenwert für die Standortwasserbilanz zu ermitteln, ab welchem Bäume der Hauptbaumarten absterben. Sowohl absolute Angaben als auch relative, ausgedrückt als Abweichungen vom Mittelwert 1981-2010, wurden geprüft, um mögliche Kipppunkte definieren zu können. Die Werte sind zu unterschiedlich, als dass Grenzwerte davon abgeleitet werden können. Das legt den Schluss nahe, dass die Trockenheit zwar ein vitalitätsreduzierender Faktor ist,

der aber bei günstigen Begleitumständen nicht zwingend zum Absterben führen musste. Zu den Begleitumständen zählen dabei die Bestandesstruktur, Bestandesdynamik oder auch die Dynamik von biotischen Schädlingen.

Ein weiterer Punkt könnte sein, dass die Standortwasserbilanz als Kenngröße für die Betrachtung des Trockenstresses 2018/19 nicht die richtige Größe ist. Immerhin setzt sie voraus, dass sich im Winter der Bodenwasserspeicher wieder füllt. Das muss nicht zwingend so gewesen sein, und bei einem unvollständig aufgefüllten Speicher hätte sich der Trockenstress im Frühjahr 2019 ungebremst fortgesetzt.

Die Beschäftigung mit der Fichte mit Blick auf ihre hohe Absterberate brachte die Bestätigung der Trockenheitsanfälligkeit dieser Baumart. Es konnten Tendenzen gezeigt werden, etwa die erhöhten Kronenverlichtungen auf nährstoffarmen Standorten oder solchen mit sehr geringer nFK (vgl. Kap. 3.4.5.3). Es konnten jedoch keine eindeutigen zweidimensionalen Zusammenhänge gefunden werden, etwa, dass abgestorbene Fichten alle in bestimmten Expositionen zu finden sind. Die Erkenntnis daraus ist, dass Trockenheit in den meisten Fällen prädisponierend für einen weiteren Stressor war. In diesem Fall war das der Borkenkäfer, der mit seiner Populationsdynamik das Muster teilweise überprägt.

4.1.3 Insekten

Keine der vier heimischen Hauptbaumarten hat derzeit so große Vitalitätsprobleme wie die Fichte. Vor allem in den letzten Jahren seit Anfang 2018 waren Fichtenbestände durch die Abfolge von Witterungsereignissen sehr hohem Stress ausgesetzt. So verursachten die Stürme im Herbst und Winter 2017 bis 2018 umso mehr Schäden, als die Böden im niederschlagsreichen Jahr 2017 wassergesättigt waren und im Winter 2017/18 bei milden Temperaturen nur in exponierten Lagen Bodenfrost herrschte. Dadurch gab es bei Stürmen nicht nur Stammbrüche und Entwurzungen, sondern es wurden auch Bäume angeschoben. Bei angeschobenen Bäumen sind Teile des Wurzelgeflechts abgerissen, so dass sie weniger standfest sind und sich in der Folge schlechter mit Nährstoffen und Wasser versorgen können.

Die Witterung vor allem während der Vegetationszeiten stellten durch lang anhaltende Trockenheit und großer Wärme optimale Bedingungen für die Entwicklung von Borkenkäfer dar. Dies fiel zusammen mit durch Trockenstress geschwächte Fichten und einer großen Menge Totholz, die zusätzlichen Brutraum für die Käfer darstellen. Daraus ergab sich eine derart explosive Vermehrung der Schadinsekten, dass die Schäden großräumig und flächendeckend auftraten. So ergab die Analyse der Standortsituationen, dass die stärksten Schäden im Stichjahr 2019 nicht zwingend exponierten Standorten zugewiesen werden konnten. Auch Baumartenmischungen konnten die Fichte nicht vor Vitalitätsverlust retten. Allerdings ist aus der Mischung des Bestandes nicht auf die Mischung der umliegenden Bestände zu schließen. Diese Erkenntnisse unterstreichen das Ausmaß der Borkenkäferkalamität, die bis heute andauert und sowohl räumlich als auch hinsichtlich ihrer Dauer bisherige Schadereignisse übertrifft.

Für die Buche kann vor allem der Befall des Prachtkäfers als Symptom der Buchenkomplexkrankheit gewertet werden. Auch der Befall mit Laubnutzholzborkenkäfern ist bekannt und kann auch optisch vitale Bestände treffen. Im Vergleich mit den Insektenschäden der anderen Hauptbaumarten ist die Buche aber deutlich seltener betroffen.

Auf die Kiefer haben sich wesentlich mehr Insekten spezialisiert. Nonne, Kiefernspinner, Kiefernspanner, Forleule und Blattwespen sind als Kiefernscädlinge bekannt und können im Einzelfall ganze Bestände kahlfressen. Den Insekten kommt entgegen, wenn Kiefern in Reinkultur angebaut wurden.

Der Befall ist unabhängig vom Vitalitätszustand und kann auch gesunde Kiefern zum Absterben bringen.

Insekten, die der Eichenfraßgesellschaft angehören, sind Frostspanner, Eichenwickler, Eichenprozessionsspinner und Schwammspinner. Auch sie können, wie die Kieferschädlinge, vitale Bäume befallen und vollständig kahlfressen. Im Unterschied zur Kiefer ist es vitalen Eichen jedoch möglich, den durch die Fraßschäden verursachten Blattverlust durch die Ausbildung von Johannistrieben zu kompensieren. Nach NW-FVA (2020) geht das allerdings auf Kosten der Reservestoffe, die auch für die Bildung des Frühholzes benötigt werden. Kann aufgrund fehlender Reservestoffe nicht genug Frühholz ausgebildet werden, besteht die Gefahr, dass die Wasserversorgung nicht mehr gewährleistet ist und die Eiche entweder plötzlich oder über mehrere Jahre abstirbt (NW-FVA, 2020). Nach HONEKAMP (2021) konnte in der Vergangenheit eine verringerte Vitalität in der Regel mit dem Auftreten von starkem Fraß durch Insekten erklärt werden. In jüngster Zeit lässt sich erhöhte Verlichtung jedoch nur noch bedingt durch das Auftreten der Fraßgesellschaft erklären, sodass womöglich klimabedingten Faktoren eine vermehrte Bedeutung in der Komplexkrankheit des Eichensterbens zukommt.

4.1.4 Pilze

Neben Schadinsekten können Pilze eine große Rolle im Schadgeschehen von Wirtschaftswäldern spielen. Sie sind, wie Schadinsekten auch, Teil der Ökosysteme und stellen daher im natürlichen Gleichgewicht keine akute Gefahr für das Vorkommen einer Art dar.

Im Wirtschaftswald dagegen kann es schwierig werden, wenn Pilze an vitalitätsgeschwächten Bäumen häufig und flächig auftreten und ihre Schadwirkung zum Absterben der Bäume führt. Primärschwächungen können z.B. bei Fichte Borkenkäferbefall, bei Eichen nach Insektenfraß oder bei Buchen Trockenstress sein.

Der aktuell häufigste und forstwirtschaftlich gefährlichste Pilz ist *Sphaeropsis sapinea* oder *Diplodia pinea*, der die Kiefer befällt und ihre jeweils diesjährigen Triebe zum Absterben bringt. Massiver Befall schwächt den Baum so, dass er ganz abstirbt. Befallen werden insbesondere sonnenexponierte Randlagen und aufgelichtete, wärmere Bestandesteile, teilweise nach stärkeren Durchforstungen. Da der Pilz wärmeliebend ist, ist davon auszugehen, dass der Klimawandel für ihn günstigere Bedingungen schafft (NW-FVA, 2013 a).

Auch der *Hallimasch* kann eine Gefährdung für den Wirtschaftswald darstellen. Er kann örtlich verstärkt auftreten und befällt vor allem geschwächte Bäume. Beobachtet wird er an Fichten mit Buchdruckerbefall oder an vitalitätsgeschwächten Eichen und Buchen und anderen Baumarten. Besondere Bedeutung bekommt er nach Witterungsstress (NW-FVA, 2013 b) als Sekundärschädling.

Buchen können vom Pilz der Art *Phytophthora* befallen werden. Auch befällt der Pilz geschwächte Buchen, z.B. nach Trockenstress und Befall durch rindenbrütenden Käfer wie den Prachtkäfer. Der Befall mit dem Pilz gehört zum Krankheitsbild der Buchenkomplexkrankheit, die verstärkt nach Trockenstress, in Verbindung mit Bestandsauflichtung bzw. starker Freistellung einzelner Buchen auftreten kann. Verbunden ist die Komplexkrankheit mit starkem Vitalitätsverlust bis zum Absterben (NW-FVA, 2013 c).

Mehltau kann bei günstiger Witterung zu einer Schwächung bei Eiche führen (NW-FVA 2013 d).

Auch Pilzbefall bleibt unter den Bedingungen eines fortschreitenden Klimawandels ein schwer zu kalkulierendes Risiko. Da Pilze sich häufig bei geschwächten Individuen einfinden, kommt vor allem der in Abschnitt 4.1.2 diskutierte Trockenheit, aber auch Spätfrost eine große Bedeutung zu.

4.1.5 Stoffeinträge

Jahrelang verursachten schwefelsaure Stoffdepositionen Schäden an Waldökosystemen. Seit Beginn der 90er Jahre sind diese Einträge massiv zurückgegangen (KÖNIG ET AL., 2017). Zurück bleiben bis heute versauerte Böden, wobei im Wirtschaftswald versucht wird, diese Versauerung mit Kalkungen zu kompensieren. Der Rückgang der schwefelsauren Einträge mit dem Regen wird in Verbindung gebracht mit dem Rückgang der Vergilbung (Kap. 3.3). Aktuell spielen Schwefeldeposition keine Rolle mehr, daher wird an dieser Stelle auf eine spezielle Auswertung verzichtet.

Die Deposition von Stickstoff (N) dagegen hat auch heute noch eine Dimension, die sich schädigend auf die Ökosysteme auswirkt (z. B. BRAUN ET AL., 2018; MEIWES ET AL., 2012; MELLERT 2010). Die Rate liegt bei über 10 kg/ha*a in Hessen (SCHELER, 2017).

Inwiefern diese Entwicklung vitalitätsbeeinflussend sein kann, hängt von vielerlei Faktoren ab. Einerseits wurden viele Waldflächen historisch sehr intensiv genutzt. So passierte durch Streunutzung aus dem Wald lange Zeit eine Stoffausfuhr aus dem Wald mit dem Ergebnis der Verarmung der Böden. Der daraus resultierende Stickstoffmangel konnte inzwischen kompensiert werden, inzwischen sind viele Standorte bedenklich überversorgt (SCHELER, 2017). Andererseits unterscheiden sich die Baumarten hinsichtlich ihres Stickstoffbedarfes. Die Baumart, die am wenigsten damit klarkommt, ist die Kiefer. Nach WALENTOWSKI ET AL. (2007) gehört sie zu den Pionieren unter den Baumarten und kann ohne Probleme sehr karge, nährstoffarme Standorte besiedeln. Ihre Stärke liegt in der Ausbildung von Ektomykorrhiza. Genau dies könnte das Problem ihrer Anfälligkeit gegenüber hohen Stickstoffeinträgen zu sein. Nach VAN DER LINDE ET AL. (2018) gibt es Zusammenhänge zwischen Stickstoffeinträgen und der Vitalität von Mykorrhizen.

Nach Abbildung 56 kann ein schwacher Zusammenhang zwischen hohen Stickstoffvorräten und höheren Kronenverlichtungen gefunden werden. Andere Analysen wie der Vergleich von N-Gehalten in den Nadeln oder der Vergleich der Kronenverlichtung mit vom Umweltbundesamt regionalisierten Stickstoffdepositionsraten deckte keine Zusammenhänge auf.

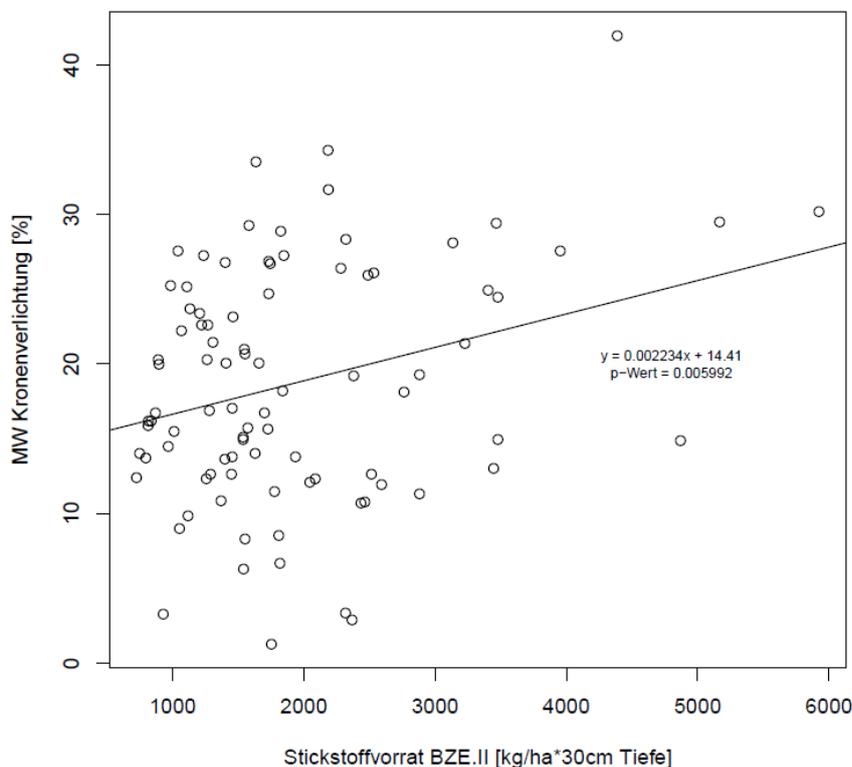


Abbildung 56: mittlere Kronenverlichtung bei Kiefer in Hessen, Niedersachsen, Sachsen-Anhalt und Schleswig-Holstein im Vergleich zum Stickstoffvorrat (BZE II, 2006-2008).

Abbildung 57 zeigt, dass hohe N-Einträge vor allem in (West)Niedersachsen stattfinden, ohne dass dort die höchsten Kronenverlichtungen vorliegen. In Hessen gibt es dagegen auch hohe Kronenverlichtungen bei Kiefer bei niedrigen Stickstoffeinträgen.

Im Projekt wurde ein Zusammenhang zwischen Stickstoff- und Schwefelvorräten im Boden und der Kronenverlichtung bei Buche, Eiche, Fichte und Kiefer geprüft. Für Stickstoff wurde auch die Vorratsänderung zwischen BZE I und BZE II betrachtet. Außer dem oben gezeigten schwachen Zusammenhang für Kiefer und Stickstoff konnten keine klaren Abhängigkeiten gefunden werden. Der von BRAUN ET AL. (2018) berichtete Zusammenhang zwischen der Anfälligkeit der Fichte gegenüber Borkenkäferbefall auf Standorten mit Kalium- und Magnesiummangel bei gleichzeitig hoher Stickstoffbelastung konnte hier nicht bestätigt werden.

Der Einfluss der Stoffeinträge auf die Baumvitalität spannt sich als ebenso breites Feld auf wie der Einfluss der Witterung. Die bisher durchgeführten Analysen konnten kein klares Bild über eindeutige Zusammenhänge zeichnen. Daraus sollte jedoch nicht abgeleitet werden, dass es keine Einflüsse auf die Vitalität gibt.

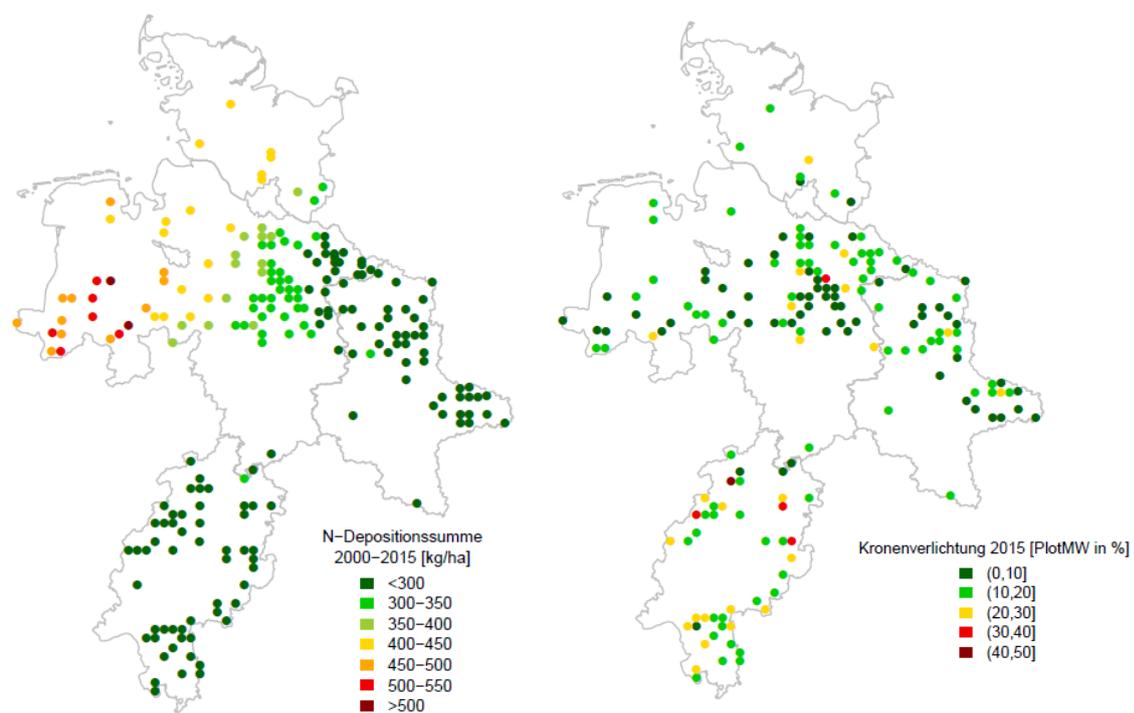


Abbildung 57: Vergleich der N-Depositionssumme als Summe 2000-2015 auf BZE-Kiefernplots (links) mit der Kronenverlichtung der Kiefern 2015 (rechts)

4.2 Risikobewertung der Hauptbaumarten unter zukünftigen klimatischen Bedingungen

Zukünftige klimatische Bedingungen werden die Wälder Hessens stark herausfordern. Der Klimawandel, der vielfach zitierbar bereits Realität und Gegenwart geworden ist und ein Stückweit sogar schon Vergangenheit darstellt, wird auch weiterhin für eine Veränderung der Umweltbedingungen der Wälder sorgen.

Klimawandel in der Vergangenheit meint, dass in Hessen gegenüber dem langjährigen Mittel von 1971-2000 bereits ein Temperaturabstieg von 0,9 °C stattgefunden hat (HLNUG, 2018). Selbst im bestmöglichen Fall sofortiger Maßnahmen gegen weitere CO₂-Emissionen würde die Temperatur bis zum Ende des Jahrhunderts auch weiterhin steigen um Werte von bis zu 0,8 °C. Wird klimapolitisch nichts getan, kann dieser Anstieg nach HLNUG (2018) noch etwa 3 °C betragen. Dass der Anstieg nicht gleichmäßig über das Jahr verteilt geschieht, kann bereits jetzt beobachtet werden. Laut HLNUG (2018) würden vor allem die Sommer- und Herbstmonate überproportional wärmer. Auch die Wintermonate verzeichnen einen stärkeren Temperaturanstieg. Die geringste Erwärmung wäre für die Frühlingsmonate zu erwarten, wobei auch weiterhin mit Spätfrösten gerechnet werden muss (HNLUG, 2018). Da sich zusätzlich der Niederschlag vom Sommer in den Winter verlagern kann, muss mit stark erhöhtem Trockenstress für die Vegetation gerechnet werden. Besonders kritisch sind aufeinanderfolgende Trockenjahre zu bewerten, ohne dass sich aktuell abschätzen lässt, mit welchen Häufungen und Intensitäten dabei zu rechnen ist. Nach HLNUG (2017) muss zum Ende des Jahrhunderts damit gerechnet werden, dass viele der heutigen Buchenstandorte dann für Buche zu trocken geworden sind. Besonders in Südhessen besteht dann ein viel höheres Trockenstressrisiko als heute (HNLUG, 2017). Sie wird daher aktuell dort nicht mehr als führende Baumart empfohlen. Noch stärker trifft der Klimawandel die Fichte: nach SPELLMANN (2018) hat die Fichte in Hessen nur noch in den höheren Lagen der Mittelgebirge zukünftig eine Chance. Für Eiche und Kiefer hält sich in Hessen das zukünftige Trockenstressrisiko in tolerierbaren Grenzen. Eine Ausnahme bildet die Rhein-Mainebene, in der es bereits heute bei allen Hauptbaumarten zu teilweise starken Vitalitätsschwächen kommt.

Wenig sichere Aussagen lassen sich für den Wind ableiten. Da die Wahrscheinlichkeit sehr hoch ist, dass Stürme auch zukünftig als Störgröße eine Rolle spielen werden, ist es möglich, dass Sturmschäden im Wald auch bei gleichbleibenden Sturmhäufigkeiten und –intensitäten zunehmen. Hintergrund hier ist die Niederschlagsumverteilung, die bei steigenden Wintertemperaturen zu häufigeren Regenereignissen und damit weicherer Böden im Winter führen. Bodenfrost wird als stabilisierender Faktor seltener. Fallen Stürme häufiger in den Sommer, ist infolge der dann herrschenden Vollbelaubung bei Laubbaumarten mit höheren Schäden zu rechnen.

Bei jeder Betrachtung von zukünftigen Risiken durch Klimaveränderung muss einerseits der direkte Einfluss der Witterung betrachtet werden, etwa die Umverteilung von Niederschlägen von Sommer- in Wintermonate, andererseits bedacht werden, dass zu einer akuten Bestandsschädigung stets das Zusammenspiel mehrerer Einflussfaktoren führt. Stark vereinfacht heißt das, dass die Witterung die Schwächung der Bäume hervorruft, welche dann anfällig gegenüber Schädlingen sind, die oftmals stets latent vorkommen und nur unter extremen Bedingungen eine Gefährdung darstellen. Diese Abfolge von Ereignissen ist in ihren möglichen Auftretskombinationen, der Wahrscheinlichkeit ihres Eintretens und ihrer möglichen Schadintensität äußerst komplex.

Um eine Vorstellung von zukunftsfähigen Waldbildern zu bekommen, ist ein Blick in Regionen hilfreich, in denen derzeit Klimabedingungen herrschen, wie sie zukünftig für unsere Regionen wahrscheinlich sind. Dies können Gebiete in Südosteuropa oder auch in Südwesteuropa sein, sofern der ozeanische Einfluss nicht zu stark ist.

Der Blick nach Rumänien empfiehlt sich, weil die Baumarten der mitteleuropäischen (sub-) mesophytischen Buchen- und Hainbuchenwälder hier auch vorkommen, aber bereits an ihre Trockengrenzen gelangen. Sie werden von wärmeliebenden und trockenstresstoleranten südosteuropäischen Zerreißen- und Balkaneichenwäldern abgelöst (SCHMIDT 2020). So beobachtete SCHMIDT (2020) im Almärgebirge in Westrumänien die Zurückdrängung von Buche in Hanglage zugunsten von Eiche (v.a. *Quercus petraea*) und Elsbeere (*Sorbus torminalis*) vermutlich aufgrund von Trockenheit. Ergebnisse von CZÚCZ ET AL. (2011) unterstützen das. Klimatisch wird das Gebiet durch Jahresmitteltemperaturen

von 11,2 °C und Jahresniederschlägen von 619 mm gekennzeichnet. Dies entspricht etwa Verhältnissen, wie bereits heute sie in der Hessischen Rhein-Main-Ebene herrschen. WZE-Plots, die sich in dieser Region befinden, sind von Kiefer dominiert.

BERKI ET AL. (2009) berichten von einem Zerfall von Buchenbeständen in Ungarn nach einer extremen Trockenperiode in den Jahren 2000 – 2003. Besonders die Witterung im Mai und Juni wurde als ausschlaggebend für die Vitalität der Buche erkannt. Als kritisch wurden sehr warm-trockene Verhältnisse in dieser Zeit erachtet, wenn dies über mehrere Jahre so auftritt.

In Ungarn kommt die Buche bereits heute nur in den gebirgigen Randlagen vor. CZIMBER & GÁLOS (2016) beurteilen die aktuelle Entwicklung des Klimas als extrem kritisch für das Vorkommen der Buche und ermittelten in einem DSS (decision support system) für Ungarn das fast vollständige Verschwinden von Buchenwäldern bis zum Ende des Jahrhunderts. BIDLÓ ET AL. (2016) nennen das Zusammenspiel von verändertem Klima mit vor allem geringeren Niederschlägen und den standörtlichen Bedingungen als Ursache für das vermehrte Baumsterben der vergangenen Jahre in Ungarn (BIDLÓ ET AL., 2016; BIDLÓ ET AL., 2017).

Für alle vier hier relevanten Baumarten Buche, Eiche, Fichte und Kiefer gaben BUSSOTTI ET AL. (2018) auf Basis des Level I –Datensatzes Italiens eine stetige Erhöhung der Kronenverlichtung seit Ende der 90er Jahre an. Ihre Untersuchung ergab, dass bei der Kronenverlichtung kein Zusammenhang zur Baumartendiversität des Bestandes besteht.

Eine Analyse von MELLERT ET AL. (2016) kam zu dem Ergebnis, dass in Zentraleuropa neben dem Makroklima vor allem lokale Bedingungen wie Boden und Standort, aber auch mikroklimatische Standortigenschaften ausschlaggebend für die Vitalität der Buche sind.

Aus Frankreich berichten MERLIN ET AL. (2015) von ähnlicher Fähigkeit zu Resilienz und Resistenz bei Eiche (Traubeneiche) und Kiefer. Unterschiede ergeben sich in der größeren Resistenz gegenüber Frühjahrstrockenheit bei Kiefer und der größeren Resistenz der Eiche gegenüber Sommertrockenheit – jeweils im Vergleich mit der anderen Baumart. Keinen Einfluss auf die jeweilige Anfälligkeit gegenüber Trockenstress hatte die Baumartenzusammensetzung des umliegenden Bestandes (MERLIN ET AL., 2015).

4.3 Thesenprüfung

Die Umsetzung der Zielstellung erfolgte im Projekt thesenbasiert. Bereits im Vorfeld und während der Bearbeitung des Projektes wurden Thesen aufgestellt, geprüft, widerlegt oder bestätigt.

1. Witterungsbezogener Stress bewirkt eine verschlechterte Vitalität der Wälder.

Diese These kann eindeutig bestätigt werden. Als Jahre mit dem größten Trockenstress gingen 2003 und 2018 in die Auswertungen ein, wobei 2018 die Trockenheit deutlich größer war. Vor allem bei Fichte, aber auch bei Buche und Eiche erhöhten sich die Kronenverlichtungswerte in den Folgejahren (Abbildung 13). Ebenso ist ein vermehrtes Absterben zu beobachten (Abbildung 15).

2. Klimatischer Stress wirkt sich, differenziert nach forstlichen Standorten und Baumarten, unterschiedlich aus.

Dass Baumarten unterschiedlich gut mit Trockenheit klarkommen, ist eine waldbauliche Grundlage. Es ist neben den Nährstoffansprüchen eines der Entscheidungskriterien bei der Baumartenwahl. Bisher nicht nötig war im Waldbau die Berücksichtigung einer Veränderung des Klimas, die auch standortgerecht angebauten Baumarten auf bisher trockenstressfreien Standorten abverlangt, mit trockenen Perioden klarzukommen. Diese Tendenz nimmt in den letzten Jahrzehnten zu. Sie wirkt sich

negativ auf die Baumvitalität aus und kann bis zum Absterben führen. Besonders betroffen sind Fichten, die infolge der Kombination von Sturm und Trockenheit nach besonders starkem klimatischem Stress oftmals noch massivem Borkenkäferbefall ausgesetzt waren.

Bisher konnte für keine Baumart eindeutig nachgewiesen werden, dass klimatischer Stress bei standortgemäßem Anbau auf bestimmten Standorten (z.B. Wasserhaushaltsstufen oder Substratgruppen) zu einer deutlichen Vitalitätsverschlechterung führt. Es sind Tendenzen zu erkennen, etwa für Fichte auf oligotrophen oder nassen Standorten, die allerdings keinen standortgemäßen Anbau darstellen. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf.

3. Witterungsbedingt nehmen Schäden durch Insekten und Pilze zu. Sie sind Vorboten eines möglichen Absterbens der Bäume.

Diese Aussage kann überwiegend bestätigt werden. Vor allem Trockenheit schwächt die Abwehrkräfte der Bäume. Da viele Schädlinge geschwächte Bäume befallen, ist ihr Auftreten indirekt mit der Witterung gekoppelt. So ist beispielsweise der Borkenkäferbefall vor allem seit 2018 sehr stark angestiegen. Auch das Auftreten der Buchenkomplexkrankheit nahm in den letzten Jahren zu (NW-FVA, 2013 c). Durch Trockenheit geschwächte Eichen starben 2019 vermehrt durch den Befall von Pilzen wie *Diplodia sp.* oder Insekten wie Pracht- oder Werftkäfer ab (NW-FVA, 2019 e). Die Mistel befällt überwiegend exponierte und geschwächte Kiefern und kann bei starkem Befall den Wirtsbaum weiter so schwächen, dass er durch das nächste Stressereignis abstirbt (HÜLSMANN ET AL., 2013). Für nur wenige Schädlinge sind hohe Temperaturen und Trockenheit eher nicht förderlich. Nach ROHDE ET AL. (2019) haben die hohen Temperaturen im Sommer 2018 und 2019 in einigen Eschenbeständen zum einen zur Verlangsamung des Schadensfortschritts und zum anderen zur Verringerung von Neuinfektionen geführt. Dennoch ist die Absterberate für Esche in den Jahren 2018 und 2019 hoch (DAMMANN ET AL., 2019).

Zusätzlich erschwerend ist das Auftreten bisher unbekannter Schädlinge, die sich aufgrund der veränderten Witterungsbedingungen auch in Mittel- oder Norddeutschland etablieren können. Dazu kann man den Eichenprozessionsspinner zählen, der sich seit den 2000er Jahren immer mehr ausbreitet.

4. Die Vitalität von Bäumen definiert sich insbesondere über den Grad von Kronenverlichtung, Fruktifikation und Wachstum sowie das Absterben oder den Ausfall von Probestämmen.

Die intensive Beschäftigung mit dem Thema lässt den Schluss zu, dass diese These zu bestätigen ist, sofern alle genannten Kriterien gleichwertig berücksichtigt werden. Dabei ist besonders zu beachten, dass das Wachstum bei den Baumarten außer Buche für den WZE-Datensatz unbekannt ist. Allein aus Kronenverlichtung und Fruktifikation kann ohne Informationen über das Wachstum keine umfassende Beurteilung der Baumvitalität erfolgen. Das Absterben von Bäumen lässt einen sehr eindeutigen Schluss auf die Vitalität (oder ihr Nichtvorhandensein) zu. Im Nachgang lässt sich anhand der Zeitreihen aus den Kronenverlichtungen und anderen Vitalitätskenngrößen dann eindeutig nachweisen, wie die Vitalität nachlässt. Im Umkehrschluss muss eine nachlassende Vitalität, erkennbar an höheren Kronenverlichtungswerten, nicht zwangsläufig zum Absterben führen (vgl. Kap. 3.4 und 3.7).

5. Die Kronenverlichtung ist im Jahr vor dem Absterben deutlich erhöht.

Für Buche und Eiche wurde festgestellt, dass dem Absterben in den meisten Fällen ein Anstieg der Kronenverlichtung vorausgeht. Dies ist bis zu 3 Jahre im Voraus deutlich zu erkennen. Für Kiefer gilt ähnliches mit einem Vorlauf von ca. 2 Jahre. Fichte kann dagegen sehr schnell absterben, innerhalb eines Jahres kann sich die Kronenverlichtung sprunghaft auf bis zu 100 % erhöhen (vgl. Kap. 3.7). Auch hier ist zu betonen, dass der Umkehrschluss nicht zwingend gilt: stark verlichtete Kronen können bei günstigen Bedingungen in gewissem Rahmen wieder regeneriert werden.

6. Besondere Belastungssituationen stellen sich als Kippunkte der Waldentwicklung dar.

Störungen gehören zu den natürlichen Zyklen von Ökosystemen. Natürlicherweise folgt nach der Besiedlung eines waldfreien Gebietes durch Pionierbaumarten der Übergang zum Wald der Klimaxbaumarten, zu denen auch die Buchenwaldgesellschaften gehören. Unter natürlichen Bedingungen können Störungen Lücken verursachen, die zur Strukturierung des Waldes beitragen und deren Artenvielfalt erhöhen. Vor allem Totholz stellt hierbei ein wichtiger Aspekt dar. Im Wirtschaftswald bedeuten Störungen ein nicht planbares Risiko. Im schlimmsten Fall kann die über Jahrzehnte oder in Einzelfällen sogar Jahrhunderte geleistete Arbeit zerstört und Holz entwertet werden.

Als besondere Belastungssituationen gelten solche Störungen, die bisher außerhalb der Kalkulierbarkeit lagen. Dies kann nur unter sich ändernden Bedingungen stattfinden, wie es aktuell im Klimawandel passiert. Die Trockenheit der vergangenen Jahre stellte ein solches Ereignis dar, das bisher noch nicht dagewesen ist und an das die Wälder dementsprechend auch kaum angepasst sein können. Damit markiert diese Trockenheit für einige Waldbestände einen Kippunkt. Auch starke Stürme können als solche Belastungssituation gelten. Ein Beispiel stellt ein abgestorbener oder sturmgeworfener Fichtenbestand dar. Durch das Absterben eines gesamten Bestandes ist aus einer Wald- eine Freifläche geworden, auch wenn dieser Zustand vorübergehend ist. Die nun freie Fläche kann die Funktionen des Waldes – wie Nutz- und Schutzfunktion – nur noch sehr reduziert erfüllen und der Zustand des Systems hat sich hinsichtlich seiner Stoff- und Wasserflüsse komplett verändert (KLINCK ET AL., 2013; KLINCK ET AL., 2011). Sind allerdings beispielsweise in einem Mischbestand nur Einzelbäume betroffen, kann sich im besten Fall nur die Waldstruktur ändern, indem sich allmählich eine andere Baumartenverteilung ergibt. Hier würden die Waldfunktionen weitestgehend gewahrt werden, es sei denn, es fallen bestimmte, artbezogene Habitate durch den Ausfall von Baumarten weg.

7. In wiederholt extremen Witterungssituationen steigt die Mortalität der Hauptbaumarten an.

Extreme Witterungssituationen sind in den gemäßigten Breiten vergleichsweise selten. Als Gefahr für den Wald gelten hier Witterungen mit starkem Wind (Sturm, Orkan) oder mit langanhaltender Trockenheit. Nach Stürmen wie Kyrill (2007) oder Friedericke (2018) stieg die Mortalität bei allen Baumarten (außer Eiche 2018), vor allem aber von Fichte, stark an. Die Auswirkungen von starker Trockenheit zeigt eindrücklich das Jahr 2018. Dieses Jahr markiert den größten Trockenstress in der Zeitreihe. Die Schäden werden im Anstieg der abgestorbenen Bäume sichtbar (Abbildung 15). Auch das Jahr 2003 stellte ein extremes Jahr dar. Der Anstieg der Mortalität ist hier nicht ganz so deutlich wie nach 2018 und streckt sich vor allem bei Buche über die nachfolgenden zwei bis drei Jahre (Abbildung 15). Die These kann damit bestätigt werden.

8. Nach der Überschreitung von bestandesbezogenen Kippunkten verändern sich Waldstrukturen und Waldfunktionen.

Kippunkte markieren Situationen, die ein System aus seinem Gleichgewicht bringen und dadurch in einen neuen Zustand überführen (EICHHORN ET AL., 2016). Im Fall eines Waldbestandes würde das Überschreiten des Kippunktes dessen Absterben bedeuten. Wie schon in These 6 erwähnt, kann das den Übergang von einer Wald- zu einer Freifläche bedeuten. Die Konsequenzen daraus können aus der Waldzustandserhebung nicht abgeleitet werden. Das Vorgehen bei der Aufnahme beschreibt jedoch ganz gut die Entwicklung nach der Störung: der betroffene Plot ruht solange, bis sich eine Verjüngung eingefunden hat (oder gepflanzt wurde), sobald die Fläche wieder als bewaldet gelten kann, wird der Plot wieder aufgenommen. In der Regel ist eine solche Störung also reversibel. Es gibt jedoch auch Regionen, in denen sich der Wald allmählich auflöst und eine natürliche Wiederbewaldung durch verschiedene, oft anthropogen verursachte Umstände nicht möglich ist. Solche Umstände sind im Hessischen Ried bekannt, wo zu dem dort herrschenden, relativ warmen und trockenem Klima der Umstand des abgesenkten Grundwassers hinzukommt (vgl. HÜLSMANN, 2013; AHNER & SCHMIDT, 2011; FIEBIGER ET AL., 2009). Hier ist oft eine sehr starke Vergrasung und Verbuschung zu beobachten, die die Wiederbewaldung sehr erschwert.

9. Waldwirtschaft auf ökologischer Grundlage kann die Anpassungsfähigkeit der Wälder gegenüber Klimaänderungen in Grenzen stabilisieren.

Waldbewirtschaftung auf ökologischer Grundlage wird in Hessen seit Jahrzehnten betrieben. Die Grundlage bildet die Hessische Waldbaufibel (LANDESBETRIEB HESSENFORST, 2016). Es gilt, die Balance zu finden zwischen der Deckung des gesellschaftlichen Bedarfes an Holz und ökologischen Leitlinien. Zusätzlich muss berücksichtigt werden, dass im Wirtschaftswald mit seinen für Menschenalter langsamen Zyklen die waldbaulichen Strategien vergangener Zeiten vielerorts noch sehr deutlich sichtbar sind. Diese forsthistorischen Strukturen werden allmählich umgeformt, um das übergeordnete Ziel geschlossener Wälder nicht zu gefährden und andererseits weiterhin sinnvoll zu wirtschaften. Der Waldumbau geschieht langsam, aber er ist zu sehen in Baumartenzahlen und Altersstrukturen, steigenden Totholzanteilen und der Abkehr von der Reinkultur (Kapitel 3.1).

Erklärtes Ziel des Waldumbaus ist die Erhöhung der Artenzahl und die Abkehr von gleichaltrigen Beständen. Damit können Risiken gestreut werden, denn unterschiedliche Baumarten und auch Altersklassen bedeuten eine unterschiedliche Anfälligkeit gegenüber Stressoren. Dadurch kann im Fall einer Störung auch bei Ausfall einzelner Baumarten die Waldstruktur erhalten bleiben.

10. Der Zuwachs bei Buche wird durch eine starke Mast beschränkt. Der Zuwachs von in starken Mastjahren wenig wachsenden Buchen liegt auch in Nicht-mastjahren unter dem von Buchen mit hohem Mastindex.

Bei Buche als schwerfruchtige Baumart mit unregelmäßiger Fruktifikation verringert sich im Jahr einer mittleren bis starken Mast der Durchmesserzuwachs. Der Wachstumseinbruch ist signifikant. Buchen mit hohem Mastindex, also häufiger und starker Fruktifikation, haben im Mittel einen höheren Zuwachs als Buchen, die geringer fruktifizieren (Kapitel 3.6).

5 Handlungsempfehlungen

Aus dem WZE-Datensatz auf waldbaulich sinnvolle Maßnahmen zur Stabilisierung von Beständen zu schließen, wäre ein zu hoher Anspruch an den Datensatz. Es müssten Informationen zu allen durchgeführten Maßnahmen vorliegen, um eine Reaktion der Bäume beurteilen zu können, und es müssten Parallelversuche an ähnlichen Beständen ohne Eingriffe als Vergleich vorhanden sein. All dies ist nicht gegeben und kann auch nicht der Anspruch der Waldzustandserhebung sein.

Die Ergebnisse haben veranschaulicht, dass es Baumarten wie die Fichte gibt, die durch die vergangenen sehr trockenen Jahre schwere Vitalitätseinbußen haben. Andererseits gibt es viele Bestände mit unterschiedlichen Baumarten, die nach dem extrem trockenen Jahr 2018 keine sehr starken Schäden zeigen.

Die Buche als die hessische Baumart zeigte über den WZE-Zeitraum eine gute Vitalität, bekam allerdings nach den letzten sehr trockenen Jahren Probleme. Auch Eiche und Kiefer als relativ trockenresistente Baumarten verzeichnen eine erhöhte Mortalität. Eine wichtige Erkenntnis ist, dass das häufige flächenhafte Absterben bisher nur bei Fichte beobachtet wurde.

Aus waldbaulicher Sicht können nach SPELLMANN (2018) aktuell folgende Empfehlungen für die Bewirtschaftung hessischer Wälder gegeben werden

- keine Übernahme schon heute nicht standortgemäßer Naturverjüngung
- Überpflanzen künftig nicht standortgemäßer Fichten-Naturverjüngung mit Douglasie
- kein Anbau von Baumarten in ihrem standörtlich / klimatischen Grenzbereich
- Begründung von Mischbeständen

- Sicherung standortgerechter Nadelbaumanteile
- Ausnutzung größerer Störungslöcher
- Einbeziehung von Pionierbaumarten
- Integration von anbauwürdigen eingeführten Baumarten (Douglasie, Küstentanne, Japanlärche, Roteiche)

Waldbaulich kann auch etwas getan werden, um das Risiko und die Anfälligkeit von Beständen zu verringern. Hierzu zählt eine durchdachte und rechtzeitig durchgeführte Bestandespflege, die die Einzelbaumvitalität und damit auch die Bestandesstabilität erhöht:

- gestaffelte Durchforstungen zur Verkürzung der Produktions- und Gefährdungszeiträume
- ggf. Niederdurchforstungen bei nicht standortgemäßer Fichte zur Senkung der Wasserkonkurrenz
- Erhalt bzw. Förderung von Mischbaumarten
- Verbesserung der Bestandesstrukturen

Die Empfehlung zur Baumartenmischung und Erhöhung der Baumartenzahl in den Beständen ist eine der häufigsten ausgesprochenen Empfehlungen an die forstliche Praxis. Der Effekt dabei liegt, wie zahlreiche Literaturstudien und eigene Untersuchungen zeigten (vgl. Kap. 4.2 und Abbildung 32), dabei weniger in der Reduktion der Anfälligkeit, sondern in erster Linie in der Aufteilung des Ausfallrisikos.

6 Fazit und Ausblick

Die Bearbeitung des Projektes zeigte sehr eindrücklich die Vielschichtigkeit des Themas „Bestandes- und Einzelbaumvitalität“ auf. Ein- oder zweidimensionale Betrachtungen eignen sich bestenfalls zur Symptombeschreibung. Dass der Baumvitalität, die über viele Jahre in Hessen eher als unkritisch galt, aktuell so viel Bedeutung zukommt, ist der Witterung der jüngst vergangenen Jahre zuzuschreiben. Dabei war lange klar, dass es in den nächsten Jahren irgendwann zu sichtbaren Auswirkungen des stattfindenden Klimawandels kommt, dass das so bald passiert, hat vielerorts überrascht.

Im Ausblick muss betont werden, dass erst die kommenden Jahre die interessantesten werden. Sicherlich gab es bereits unmittelbare Reaktionen vor allem bei den Fichten. Andere Baumarten wie Buche und Eiche reagieren deutlich langsamer, so dass es, auch wenn die kommenden Jahre aus wasserhaushaltlicher Sicht entspannter aussehen würden, noch zu weiteren Vitalitätsverschlechterungen kommen kann. So leitet sich als erster Ausblick die Auswertung der Jahre nach der besonderen Dürre ab 2018 ab.

Die vorgenommenen Auswertungen von Kronenverlichtung im Zusammenhang mit Stickstoff- und Schwefelvorräten im Boden haben bisher wenige Erkenntnisse gebracht. Bei der Bearbeitung wurde jedoch klar, dass dieser Aspekt ausgesprochen vielschichtig ist und eine noch differenziertere Betrachtung lohnt, als im Projekt umsetzbar war. Sinnvoll wäre zusätzlich die Berücksichtigung von Depositionsdaten.

Weiterhin wurde klar, dass eine Vitalitätsbewertung ohne Kenntnis des Wachstums nur unvollständig sein kann. Ausnahme bildet der Zeitpunkt des Absterbens, wenn mit Sicherheit kein Wachstum mehr stattfindet. Dies und die Auswertung der Jahre nach 2018 ist Thema eines Folgeprojektes, das, finanziert vom Hess. Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, seit 2020 an der NW-FVA bearbeitet wird.

7 Abkürzungen und Definitionen

BHD	Brusthöhendurchmesser
BZE	Bodenzustandserhebung: dient als Teil des forstlichen Umweltmonitorings in Deutschland der regelmäßigen Erfassung des Bodenzustandes
HE	Hessen
KV	Kronenverlichtung
KWB	Klimatische Wasserbilanz
n	Anzahl, Stichprobenumfang
NBV	Nadel-Blattverlust
nFK	nutzbare Feldkapazität: Wassermenge (in mm), die pflanzenverfügbar ist und gegen die Schwerkraft im Boden gehalten werden kann
NI	Niedersachsen
NN	Normalnull. Bezug für die geografische Höhenangabe
SH	Schleswig-Holstein
ST	Sachsen-Anhalt
STWB	Standortwasserbilanz = $KWB_{veg.} + nFK$
WZE	Waldzustandserhebung: als Teil des Forstlichen Umweltmonitorings seit 1984 jährlich bundesweit durchgeführte, rasterbasierte Erhebung des Vitalitätszustandes des Waldes

Expositionen:

I	inhomogene Exposition
N	Nord
NO	Nordost
NW	Nordwest
O	Ost
S	Süd
SO	Südost
SW	Südwest
W	West

8 Literatur

- Ahner, J., Schmidt, Mat. (2011). Modellierung der Einzelbaummortalität im Hessischen Ried unter besonderer Berücksichtigung von Grundwasserveränderungen. Tagungsband der Jahrestagung der Sektion Ertragskunde im DVFFA vom 06.-08.06.2011 in Cottbus, Göttingen, 157-172
- Berki, I., Rasztoivits, E., Moricz, N., & Matyas, C. (2009). Determination of the drought tolerance limit of beech forests and forecasting their future distribution in Hungary. *Cereal Research Communications*, 37, 613-616.
- Bidló, A., Gulyás, K., Gálos, B., & Horváth, A. (2017, April). Observed response of vulnerable forest ecosystems to ongoing site condition changes. In EGU General Assembly Conference Abstracts (p. 5087).
- Bidló, A., Horváth, A., Gulyás, K., & Gálos, B. (2016, April). Ongoing change of site conditions important for sustainable forest management planning. In EGU General Assembly Conference Abstracts (pp. EPSC2016-14312)
- Böckmann, T., Hansen, J., Hauskeller-Bullerjahn, K., Jensen, T., Nagel, J., Nagel, R.-V., Overbeck, M., Pampe, A., Petereit-Bitter, A., Schmidt, Mat., Schröder, M., Schulz, C., Spellmann, H., Stüber, V., Suttmöller, J., Wollborn, P. (2019). Klimaangepasste Baumartenwahl in den Niedersächsischen Landesforsten. Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt; Niedersächsische Landesforsten (Hrsg.): Aus dem Walde - Schriftenreihe Waldentwicklung in Niedersachsen, Band 61, 170 S.
- Braun, S., Hopf, S. E., & de Witte, L. C. (2018). Wie geht es unserem Wald? 34 Jahre Walddauerbeobachtung. Schönenbuch: Institut für Angewandte Pflanzenbiologie.
- Czimer, K., & Gálos, B. (2016). A new decision support system to analyse the impacts of climate change on the Hungarian forestry and agricultural sectors. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 31(7), 664-673
- Cropper, J.P. (1979). Treering skeleton plotting by computer. *Tree-Ring Bulletin* 39: 47-59.
- Czúcz, B., Gálhidy, L., & Mátyás, C. (2011). Present and forecasted xeric climatic limits of beech and sessile oak distribution at low altitudes in Central Europe. *Annals of Forest Science*, 68(1), 99-108.
- Dammann, I., Paar, U. (2019). WZE-Ergebnisse für alle Baumarten. In: Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (Hrsg.), Waldzustandsbericht 2019 für Schleswig-Holstein, S. 8-15
- DWD (2021). Wetterlexikon: Sturm.
<https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?lv2=102248&lv3=102646>
(abgerufen am 16.02.2021)
- Eichhorn, J., Guericke, M., Eisenhauer, R. (Hrsg.) (2016). Waldbauliche Klimaanpassung im regionalen Fokus. Sind unsere Wälder fit für den Klimawandel? Klimawandel in Regionen zukunftsfähig gestalten (KLIMZUG), Band 10. Oekom Verlag München, 351 S.
- Eichhorn, J., Roskams, P., Ferretti, M., Mues, V., Szepsis, A., Durrant, D. (2010). Manual on methods and for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests. UNECE ICP Forests Programme Coordinating Centre, Hamburg.
- Eichhorn, J., Dammann, I., Schönfelder, E., Albrecht, M., Beck, W., Paar, U. (2008). Untersuchungen zur Trockenheitstoleranz der Buche am Beispiel des witterungsextremen Jahres 2003. In: Ergebnisse angewandter Forschung zur Buche. Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (Hrsg.). 343 S. [PDF ca. 6 MB] (doi: 10.17875/gup2008-269). S. 109-134

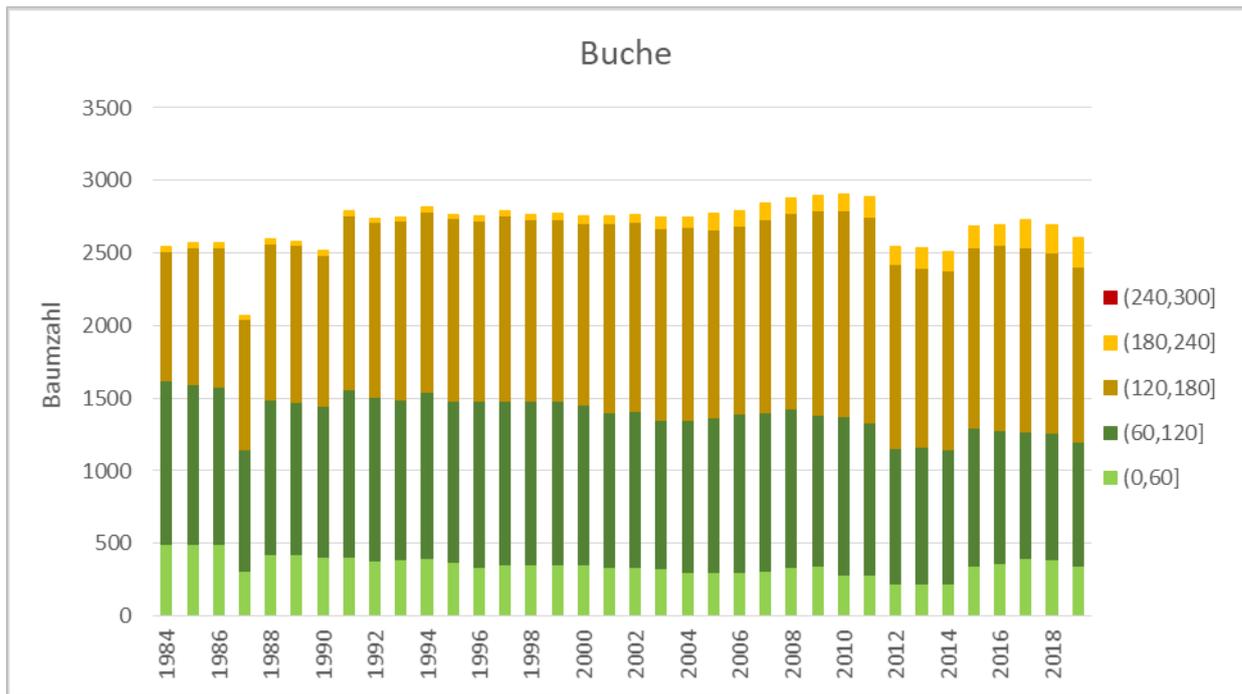
- Eickenscheidt, N., Augustin, N. H., Wellbrock, N. (2019). Spatio-temporal modelling of forest monitoring data: Modelling German tree defoliation data collected between 1989 and 2015 for trend estimation and survey grid examination using GAMMs. In: *iForest* 12, S. 338–348. DOI: 10.3832/ifor2932-012.
- Ellenberg, H., Leuschner, C. (2010). Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen: in ökologischer, dynamischer und historischer Sicht (Vol. 8104). Utb.
- Engelhard, T. (2020). Untersuchungen zum Ausfall von Probestämmen in der Waldzustandserhebung. Masterarbeit. Fakultät Forstwissenschaften und Waldökologie der Universität Göttingen. Unveröffentlicht
- Fahrmeir, L., Kneib, T., Lang, S. (2009). Regression: Modelle, Methoden und Anwendungen. Springer Verlag Berlin Heidelberg. ISBN 978-3-642-01836-7
- Fiebigler, C., Suttmöller, J., Meesenburg, H., Eichhorn, J. (2009). Auswirkungen von Klimaänderungen auf den Wasserhaushalt von Wäldern im Hessischen Ried. In: Böden - eine endliche Ressource, September 2009, Bonn, Online-Publikation der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft (<http://eprints.dbges.de/view/year/2009.html>)
- Führer, E., Horváth, L., Jagodics, A., Machon, A., & Szabados, I. (2011). Application of a new aridity index in Hungarian forestry practice. *Időjárás*, 115(3), 205-216
- Gauer, J. & Kroiher, F. (2012). Waldökologische Naturräume Deutschlands. Johann Heinrich von Thünen-Institut, Bundesforschungsinstitut für Ländliche Räume, Wald und Fischerei.
- Gehrig, M. (2004). Methoden zur Vitalitätsbeurteilung von Bäumen: vergleichende Untersuchungen mit visuellen, nadelanalytischen und bioelektrischen Verfahren. Diss. 2004
- Hauser, S. (2003). Dynamik hochaufgelöster radialer Schaftveränderungen und des Dickenwachstums bei Buchen (*Fagus sylvatica* L.) der Schwäbischen Alb unter dem Einfluss von Witterung und Bewirtschaftung. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Brsg., Dissertation. <https://www.freidok.uni-freiburg.de/fedora/objects/freidok:1121/datastreams/FILE1/content> (15.02.2021)
- Landesbetrieb HessenForst (2016). Hessische Waldbaufibel. Grundsätze und Leitlinien zur naturnahen Wirtschaftsweise im hessischen Staatswald. Kassel
- Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG), Fachzentrum Klimawandel und Anpassung (2018). Klimawandel in der Zukunft. Reihe: Klimawandel in Hessen. Wiesbaden. https://www.hlnug.de/fileadmin/dokumente/klima/Ausgabe_02Klimawandel-in-der-Zukunft_internet.pdf
- Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG), Fachzentrum Klimawandel und Anpassung (2017). Land- und Forstwirtschaft im Klimawandel. Reihe: Klimawandel in Hessen. Wiesbaden. https://www.hlnug.de/fileadmin/dokumente/klima/klimawandel_land-forstwirtschaft.pdf
- Honekamp, Chr. (2021). Untersuchungen zur Eichenvitalität, Standorteigenschaften und Eichenfraßgesellschaft in der Waldzustandserhebung. Masterarbeit an der Fakultät für Forstwissenschaften und Waldökologie der Georg-August-Universität Göttingen, unveröffentlicht
- Hülsmann, L., Evers, J., Eichhorn, J. (2013). Mistelbefall im Hessischen Ried - Kiefernsterben durch die Mistel? *AFZ/Der Wald*, 68. Jg., 6, 27-29

- Jackson, L. C., Kahana, R., Graham, T., Ringer, M. A., Woollings, T., Mecking, J. V., & Wood, R. A. (2015). Global and European climate impacts of a slowdown of the AMOC in a high resolution GCM. *Climate dynamics*, 45(11), 3299-3316.
- Klinck, U., Fröhlich, D., Meiwes, K. J., Beese, F. (2013). Entwicklung der Stoffein- und -austräge nach einem Fichten-Kleinkahlschlag. *Forstarchiv*, 84. Jg., 3, 93-101
- Klinck, U., Meesenburg, H., Scheler, B., Fleck, S., Wagner, M., Ahrends, B., Meiwes, K. J. (2011). Nährstoffbilanzen für Buchen-, Eichen-, Fichten- und Kiefernbestände bei verschiedenen Nutzungsintensitäten. Tagungsbeitrag zur Jahrestagung: Böden verstehen - Böden nutzen - Böden fit machen, 3. - 9. Sept. 2011, Berlin, Berichte der DBG
- Köhler, M., Meesenburg, H., Ahrends, B. (2015). Wie gut ist einfach? Evaluierung verschiedener Verfahren zur Regionalisierung täglicher Wetterdaten. Tag der Hydrologie 2015, Posterpräsentation
- König, N., Fortmann, H., Meesenburg, H., Schönfelder, E. (2017). Entwicklung der Bodenversauerung auf Intensiv-Monitoringflächen in Nordwestdeutschland. In: Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (Hrsg.), *Waldzustandsbericht 2017 für Hessen*, S. 31-34
- Kraft, G. (1884). *Beiträge zur Lehre von den Durchforstungen, Schlagstellungen und Lichtungshieben*. Hannover.
- Listing, M. (2011). Kurzfristige Durchmesserchwankungen bei Buche (*Fagus sylvatica* L.) und deren Beziehung zu Witterung und Bodenwasserhaushalt. Masterarbeit an der Fakultät für Forstwissenschaften und Waldökologie der Georg-August-Universität Göttingen
- Meiwes, K. J., Ahrends, B., Evers, J., Schmidt, Mar., Meesenburg, H. (2012). Stickstoffeinträge und ihre Wirkung in Waldökosystemen Nordwestdeutschlands - Auswirkungen auf Nitratausträge und Stickstoffzeigerwert nach Ellenberg. *KRdL-Schriftenreihe*, 45, 33-43
- Mellert, K.H. (2010). Zuviel des Guten? Über die Gefährdung der Waldböden durch Stickstoffeinträge. *Der kritische Agrarbericht 2010*. <https://www.kritischer-agrarbericht.de/fileadmin/Daten-KAB/KAB-2010/Mellert.pdf>
- Mellert, K. H., Ewald, J., Hornstein, D., Dorado-Liñán, I., Jantsch, M., Taeger, S., ... & Kölling, C. (2016). Climatic marginality: a new metric for the susceptibility of tree species to warming exemplified by *Fagus sylvatica* (L.) and Ellenberg's quotient. *European journal of forest research*, 135(1), 137-152.
- Merlin, M., Perot, T., Perret, S., Korboulewsky, N., Vallet, P. (2015). Effects of stand composition and tree size on resistance and resilience to drought in sessile oak and Scots pine. *Forest Ecology and Management*, Elsevier, 2015, 339, pp.22-33. <10.1016/j.foreco.2014.11.032>. <hal-01140201>
- Mitscherlich, G. (1975). *Wald, Wachstum und Umwelt: Boden, Luft und Produktion/mit Beitr. von Wolfgang Moll*. Sauerländer's Verlag.
- NW-FVA (2020). Arbeitsanweisung: Fraßbonitur und Erfolgskontrolle in Eichenbeständen. https://www.nw-fva.de/fileadmin/user_upload/Abteilung/Waldschutz/Arbeitsanweisungen/AAnw_Frassbonitur_Eiche.pdf
- NW-FVA (2019 a). Waldzustandsbericht 2019 Niedersachsen. https://www.nw-fva.de/fileadmin/user_upload/Sachgebiet/Waldzustand_Boden/WZE-Berichte/WZB2019_Niedersachsen_Internet.pdf

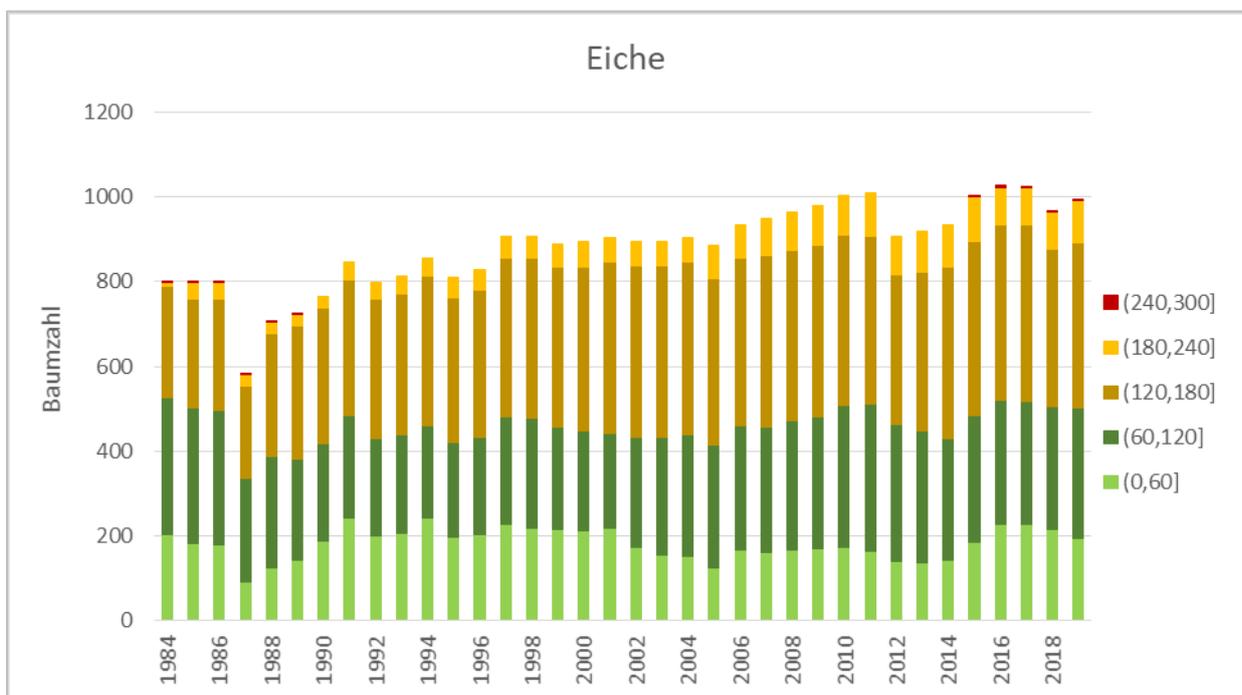
- NW-FVA (2019 b). Waldzustandsbericht 2019 Hessen. https://www.nw-fva.de/fileadmin/user_upload/Sachgebiet/Waldzustand_Boden/WZE-Berichte/WZB2019_Hessen_Internet.pdf
- NW-FVA (2019 c). Waldzustandsbericht 2019 Sachsen-Anhalt. https://www.nw-fva.de/fileadmin/user_upload/Sachgebiet/Waldzustand_Boden/WZE-Berichte/WZB2019_Sachsen-Anhalt_Internet.pdf
- NW-FVA (2019 d). Waldzustandsbericht 2019 Schleswig-Holstein. https://www.nw-fva.de/fileadmin/user_upload/Sachgebiet/Waldzustand_Boden/WZE-Berichte/WZB2019_SchleswigHolstein_Internet.pdf
- NW-FVA (2019 e). Waldschutzinfo Nr. 09 / 2019. Zunahme von Schäden an Laubbaumarten. https://www.nw-fva.de/fileadmin/user_upload/Abteilung/Waldschutz/Waldschutz-Infos_2019/Waldschutzinfo_09_2019_Schaeden_an_Laubbaumarten_September_2019.pdf
- NW-FVA (2015). PRAXIS-INFORMATION Nr. 1 —April 2015. Integrierte Bekämpfung rindenbrütender Borkenkäfer. https://www.nw-fva.de/fileadmin/user_upload/Abteilung/Waldschutz/Praxis-Informationen/NW-FVA_Waldschutz_Praxis-Information_Nr-01_2015.pdf
- NW-FVA (2013 a). Diplodia-Triebsterben der Kiefer. https://www.nw-fva.de/fileadmin/user_upload/Abteilung/Waldschutz/Schulungen/Diplodia_Triebsterben_2013.pdf
- NW-FVA (2013 b). Hallimasch. https://www.nw-fva.de/fileadmin/user_upload/Abteilung/Waldschutz/Schulungen/Hallimasch_2013.pdf
- NW-FVA (2013 c). Komplexe Buchenerkrankungen. https://www.nw-fva.de/fileadmin/user_upload/Abteilung/Waldschutz/Schulungen/Buchenkomplexerkrankungen_2013.pdf
- NW-FVA (2013 d). Waldschutzsituation Eiche 2012/13 in Niedersachsen. https://www.nw-fva.de/fileadmin/user_upload/Abteilung/Waldschutz/Schulungen/Waldschutzlage_Eiche_2013.pdf
- Paar, U., Evers, J., Dammann, I., König, N., Schulze, A., Schmidt, M., Schönfelder, E., Scheler, B., Ullrich, T., Eichhorn, J. (2016). Waldbodenzustandsbericht für Hessen. Beiträge aus der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt, Band 15. https://univerlag.uni-goettingen.de/bitstream/handle/3/isbn-978-3-86395-293-8/NWFVA15_waldboden_hessen.pdf?sequence=1&
- Rohde, M., Hurling, R., Langer, G., Bußkamp, J., Plašil, P. (2019). Insekten und Pilze. In: Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (Hrsg.), Waldzustandsbericht 2019 für Sachsen-Anhalt, S. 32-35
- Roloff, A. (2001). Baumkronen: Verständnis und praktische Bedeutung eines komplexen Naturphänomens. Stuttgart.
- Roloff, A. (2018). Vitalitätsbeurteilung von Bäumen. Aktueller Stand und Weiterentwicklung. 1. Auflage 2018. Braunschweig: Haymarket Media.
- RStudio Team (2019). RStudio: Integrated Development Environment for R. Version 1.2.5001. Boston, MA
- Scheler, B., Schönfelder, E., Sutmöller, J. (2014). Wasserqualität von Waldbächen hessischer Mittelgebirge. In: Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (Hrsg.), Waldzustandsbericht 2014 für Hessen, S. 32-35

- Scheler, B. (2017). Stoffeinträge. In: Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (Hrsg.), Waldzustandsbericht 2017 für Hessen S. 29-30
- Schmidt, L. N. (2020). Analyse von Waldtypen entlang eines Höhengradienten in Westrumänien bezüglich Holzvorrat, Biomasse, Kohlenstoffhaushalt und Baumartenverteilung (Bachelorarbeit, HAWK Hochschule für angewandte Wissenschaft und Kunst).
- Spellmann, H. (2018). Risikominimierung in Waldbeständen. Waldbau-Lehrgang 2018, Forstamt Beerfelden, 18. Oktober 2018. https://www.nw-fva.de/fileadmin/user_upload/Verwaltung/Veranstaltungen/2018/Risikobegrenzung_Fichte_Hessen_Spellmann_NW-FVA_2018_10_HE.pdf
- van der Linde, S., Suz, L. M., Orme, C. D. L., Cox, F., Andreae, H., Asi, E., ... & Bidartondo, M. I. (2018). Environment and host as large-scale controls of ectomycorrhizal fungi. *Nature*, 558(7709), 243-248.
- van der Maaten-Theunissen M, van der Maaten E, Bouriaud O (2015). "pointRes: An R package to analyze pointer years and components of resilience." *Dendrochronologia*, 35, pp. 34-38. doi: 10.1016/j.dendro.2015.05.006.
- Walentowski, H., Kölling, C., & Ewald, J. (2007). Die Waldkiefer - bereit für den Klimawandel? *LWF Wissen*, 57, 37-46.
- Wellbrock, N., Eickenscheidt, N., Hilbrig, L., Dühnelt, P.-E., Holzhausen, M., Bauer, A., Dammann, I., Strich, S., Engels, F., Wauer, A. (2018). Leitfaden und Dokumentation zur Waldzustandserhebung in Deutschland. Thünen-Institut. URL: <https://www.econstor.eu/handle/10419/173253>. (abgerufen am: 12.3.2019).
- Wellbrock, N., Aydin, C. T., Block, J., Bussian, B., Deckert, M., Diekmann, O., Evers, J., Fetzer, K. D., Gauer, J., Gehrmann, J., Kölling, C., König, N., Liesebach, M., Martin, J., Meiwes, K. J., Milvert, G., Raben, G., Riek, W., Schäffer, W., Schwerhoff, J., Ullrich, T., Utermann, J., Volz, H.-A., Weigel, A., Wolff, B. (2006). Bodenzustandserhebung im Wald (BZE II). Arbeitsanleitung für die Außenaufnahmen. BMELV, Berlin.
- Wohlgemuth, T., Kistler, M., Aymon, C., Hagedorn, F., Gessler, A., Gossner, M. M., ... & Rigling, A. (2020). Früher Laubfall der Buche während der Sommertrockenheit 2018: Resistenz oder Schwächesymptom?. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen*, 171(5), 257-269
- Wood, S. (2018). Mixed GAM Computation Vehicle with Automatic Smoothness Estimation (Package 'mgcv', Version 1.8-24). <https://cran.r-project.org/web/packages/mgcv/index.html>
- Wulf, R. (2020): Untersuchung der Resilienz von Rotbuche (*Fagus sylvatica* L.) und Stiel- (*Quercus petraea*) sowie Traubeneiche (*Quercus robur*) anhand der Kronenstruktur. Masterarbeit der Fakultät für Forstwissenschaften und Waldökologie der Georg-August-Universität Göttingen

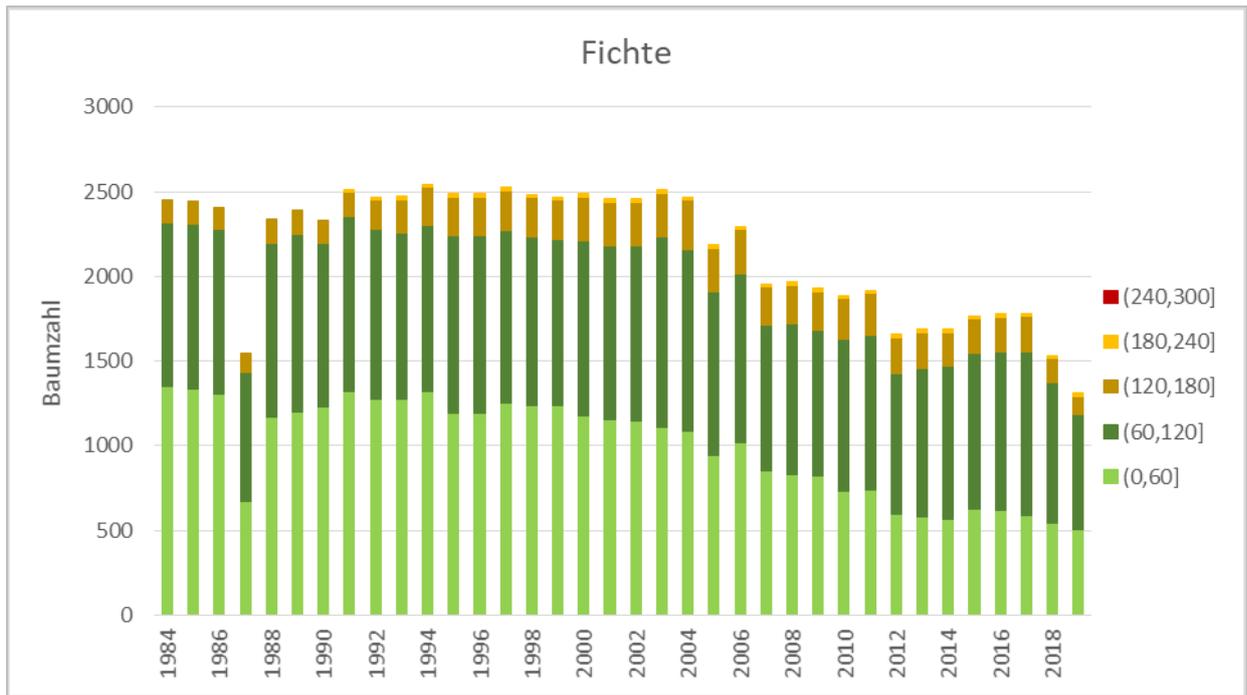
Anhang



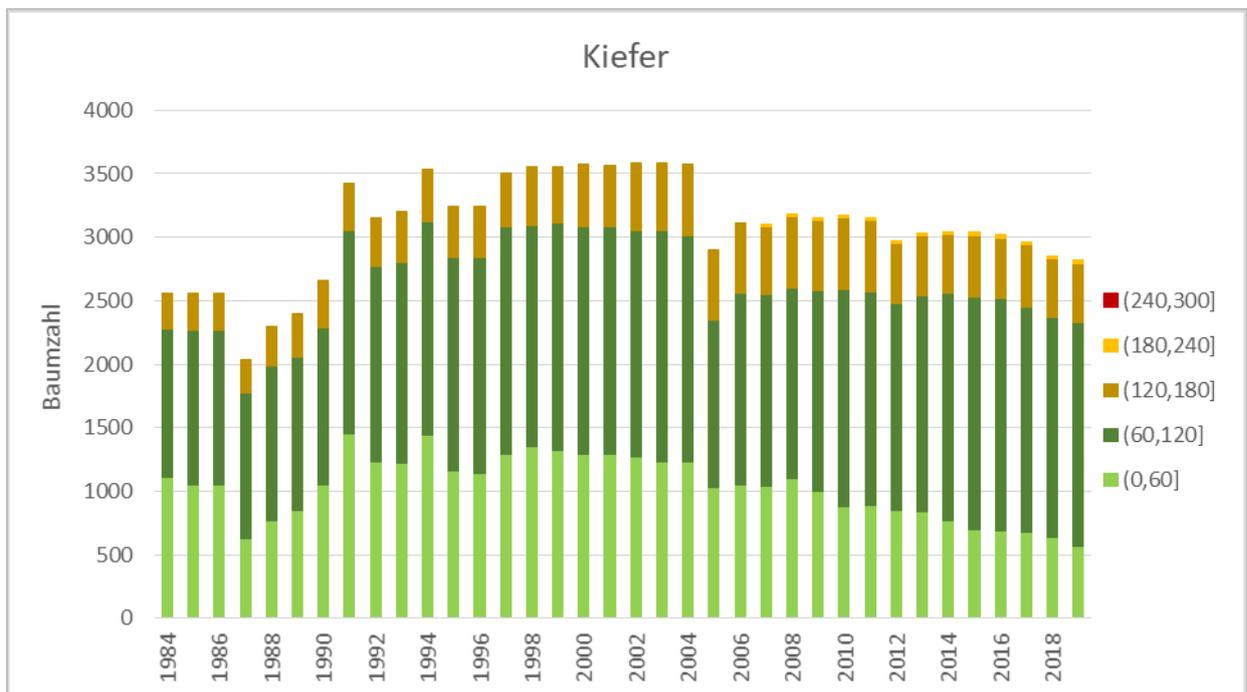
Anhang 1: Anzahl von Buchen nach Altersklassen (in Jahren)



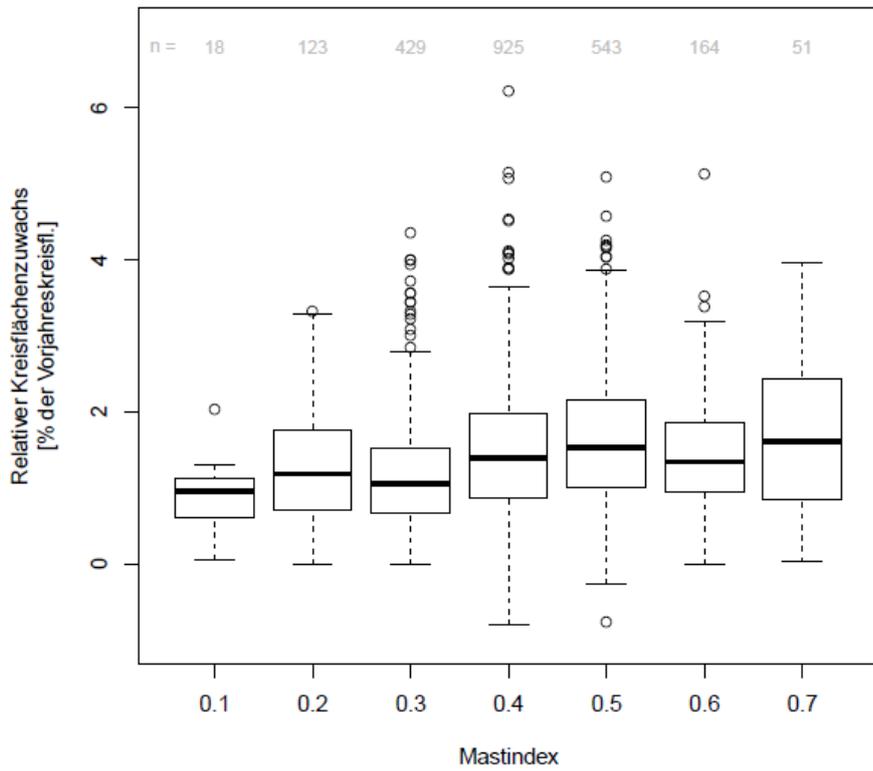
Anhang 2: Anzahl von Eichen nach Altersklassen (in Jahren)



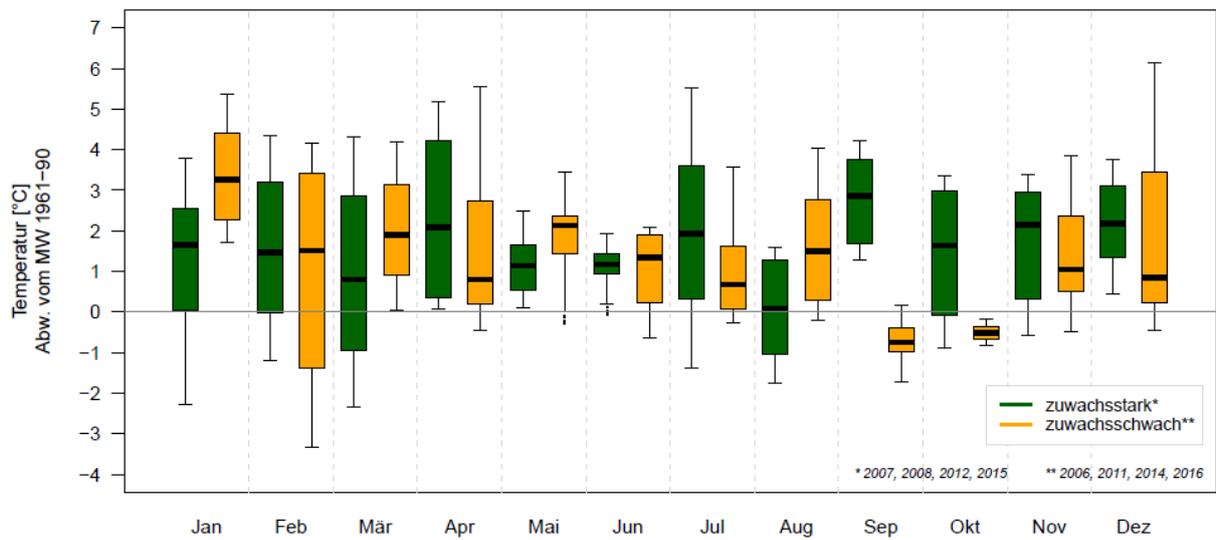
Anhang 3: Anzahl von Fichten nach Altersklassen (in Jahren)



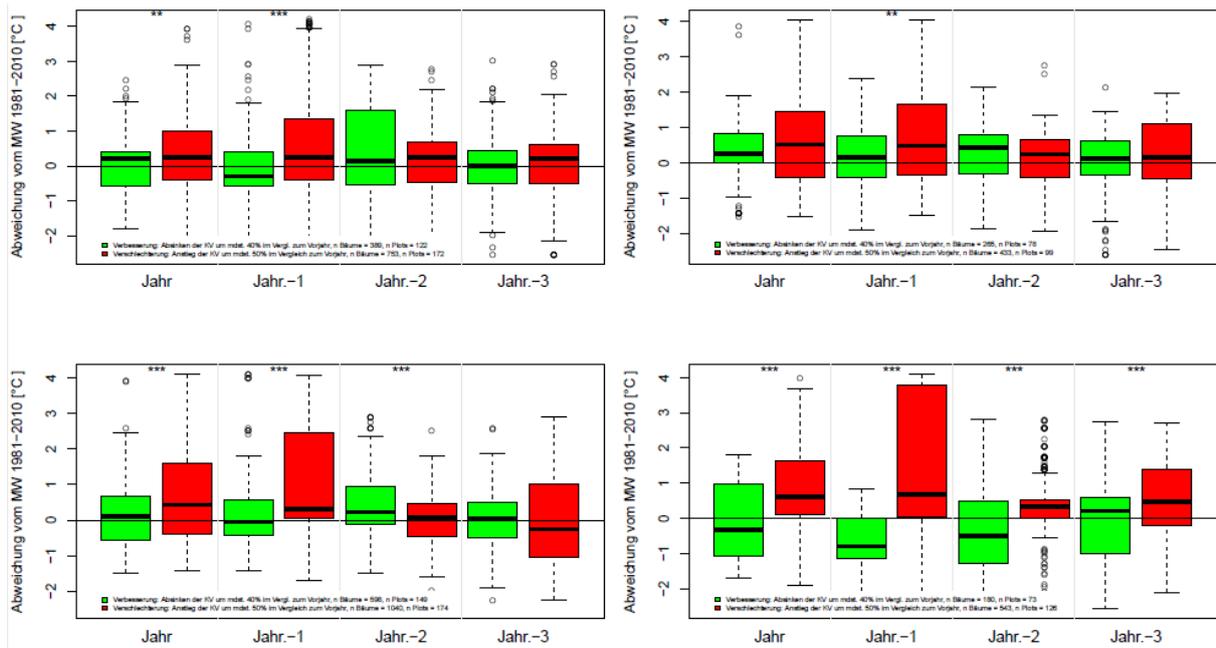
Anhang 4: Anzahl von Kiefern nach Altersklassen (in Jahren)



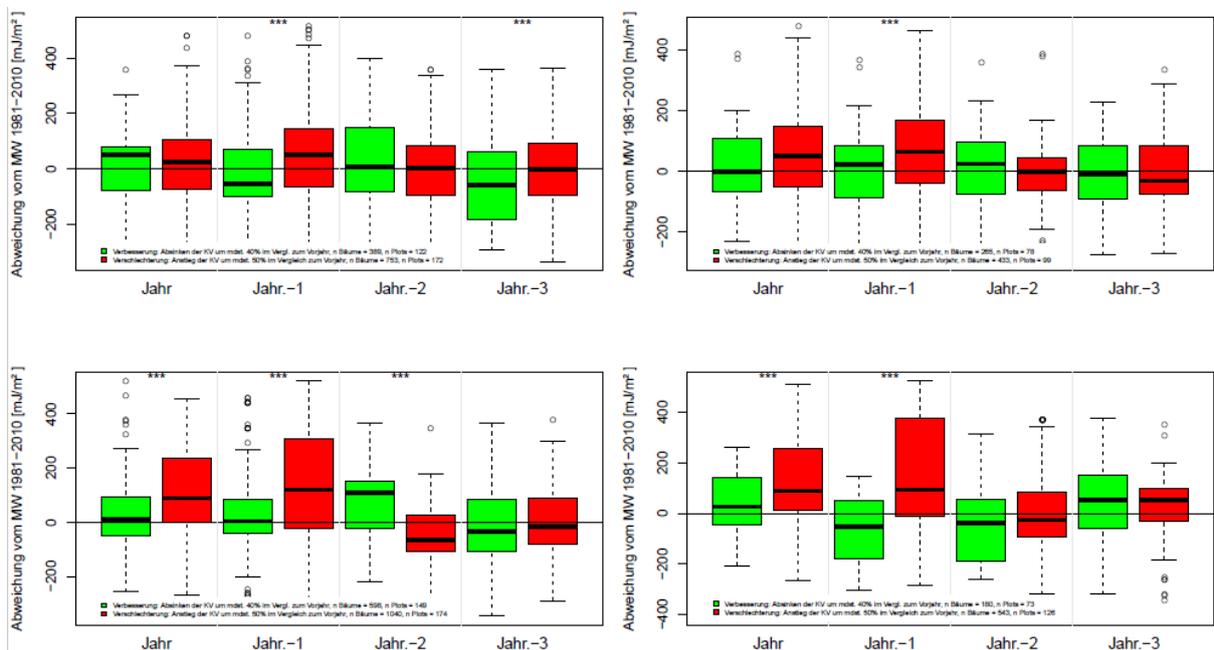
Anhang 5: Einfluss des zeitreihengemittelten Mastindex (Mastintensität) auf den Zuwachs bei 120-160jährigen Buchen in Hessen



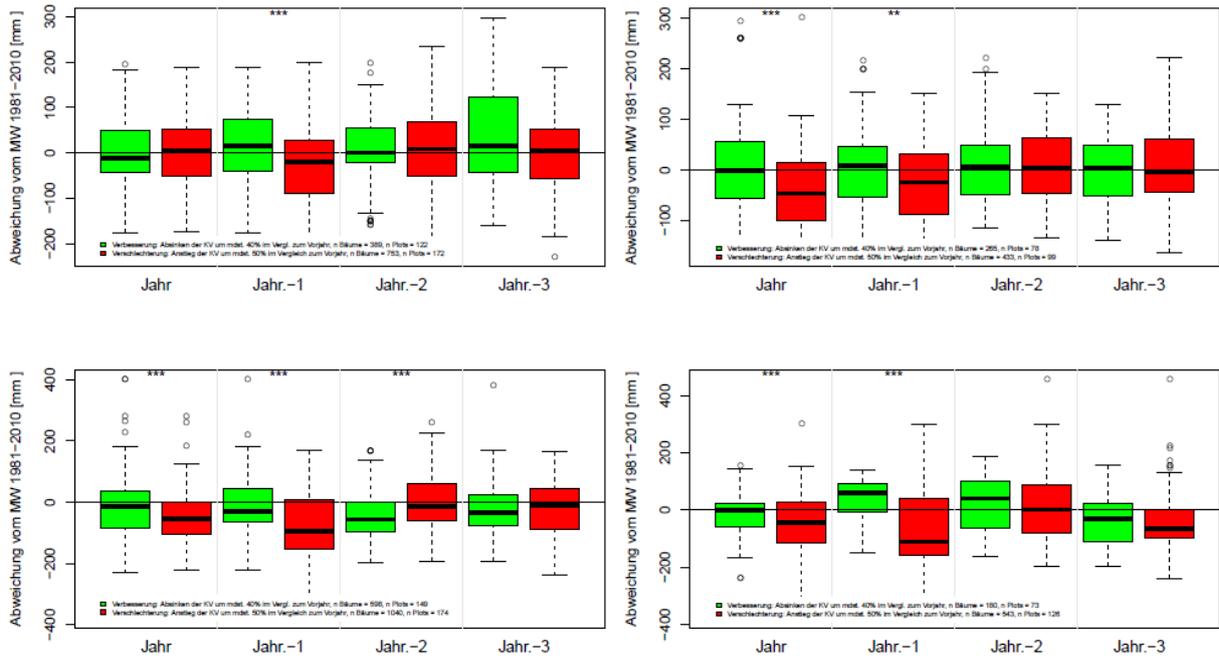
Anhang 6: Temperatur in zuwachsstarken und zuwachsschwachen Jahren bei Buche



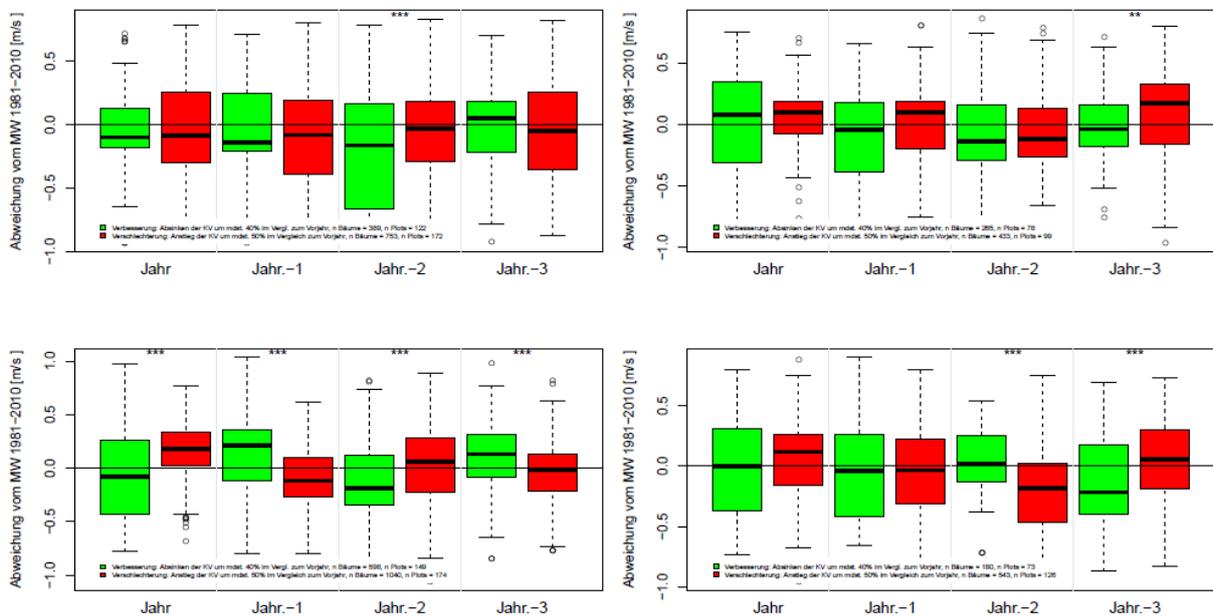
Anhang 7: Auswirkungen von Abweichungen der Tagesmaximumtemperaturen, über die Vegetationszeit gemittelt, im Vergleich zum 30-jährigen Mittel 1981-2010 auf die Kronenverlichtung von Kiefer (links oben), Eiche (rechts oben), Buche (links unten) und Fichte (rechts unten). Betrachtungszeiträume sind das Jahr der Aufnahme der Kronenverlichtung („Jahr“), das jeweilige Vorjahr (Jahr-1) bzw. 2 (Jahr-2) und 3 (Jahr-3) Jahre vor der Aufnahme. Grün: Kronenverlichtung wird geringer, rot: Kronenverlichtung erhöht sich



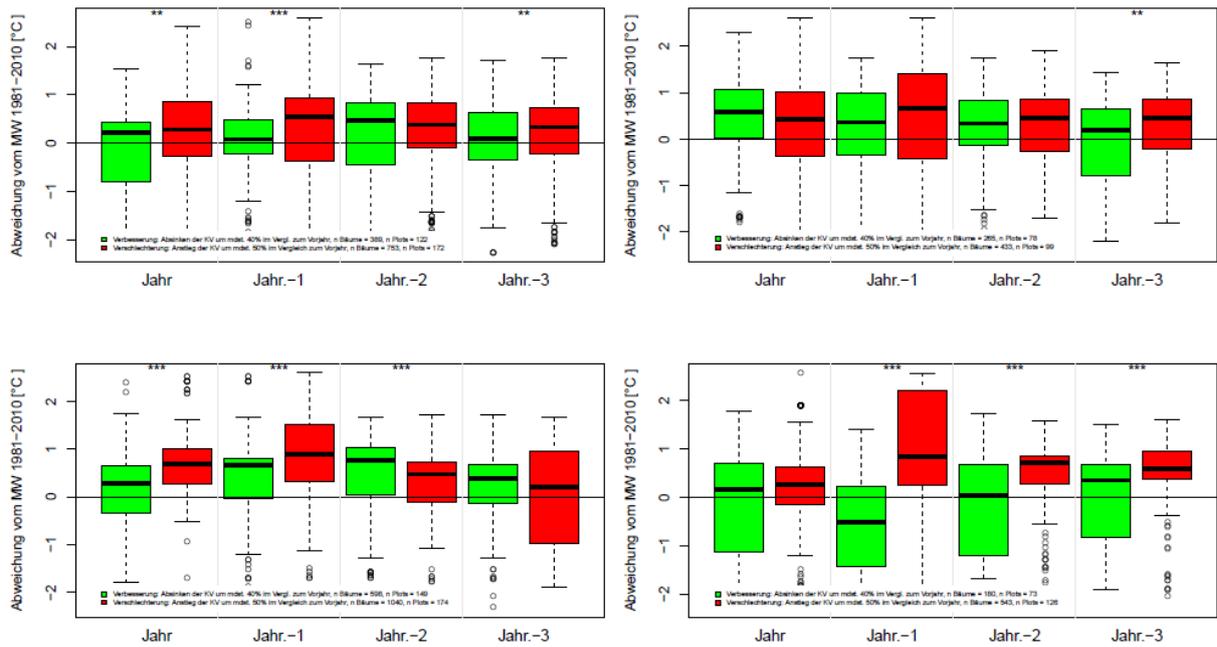
Anhang 8: Auswirkungen von Abweichungen der Globalstrahlung, über die Vegetationszeit summiert, im Vergleich zum 30-jährigen Mittel 1981-2010 auf die Kronenverlichtung von Kiefer (links oben), Eiche (rechts oben), Buche (links unten) und Fichte (rechts unten). Betrachtungszeiträume sind das Jahr der Aufnahme der Kronenverlichtung („Jahr“), das jeweilige Vorjahr (Jahr-1) bzw. 2 (Jahr-2) und 3 (Jahr-3) Jahre vor der Aufnahme. Grün: Kronenverlichtung wird geringer, rot: Kronenverlichtung erhöht sich



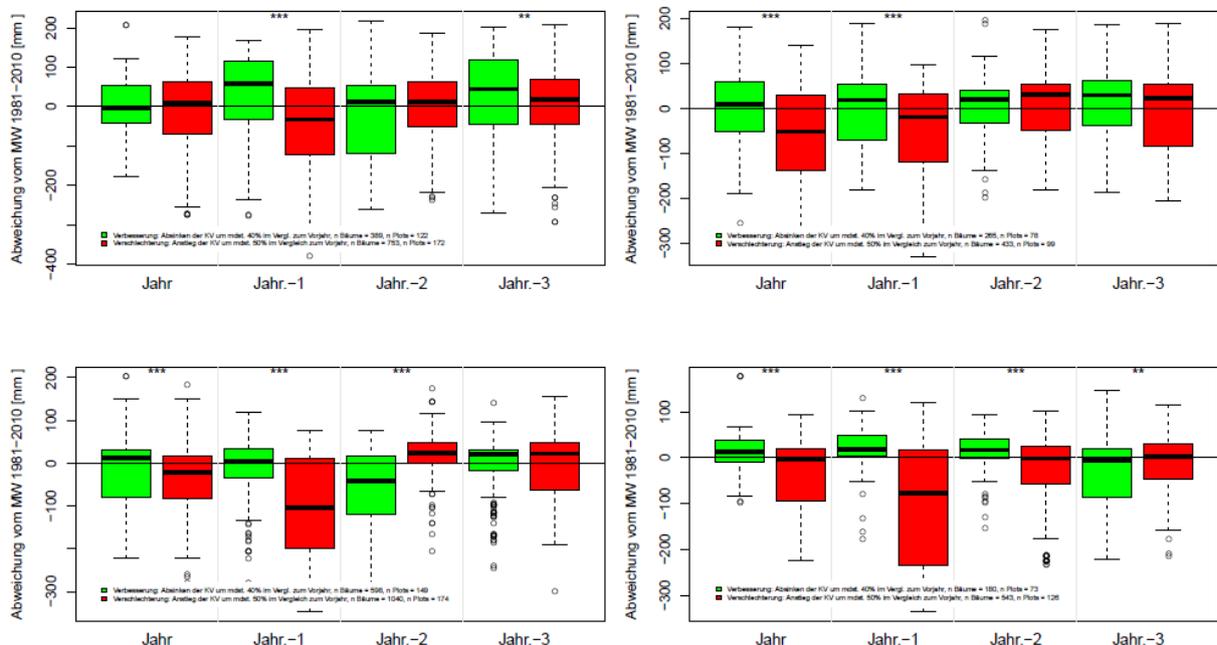
Anhang 9: Auswirkungen von Abweichungen der Niederschlagssumme für die Vegetationszeit im Vergleich zum 30-jährigen Mittel 1981-2010 auf die Kronenverlichtung von Kiefer (links oben), Eiche (rechts oben), Buche (links unten) und Fichte (rechts unten). Betrachtungszeiträume sind das Jahr der Aufnahme der Kronenverlichtung („Jahr“), das jeweilige Vorjahr (Jahr-1) bzw. 2 (Jahr-2) und 3 (Jahr-3) Jahre vor der Aufnahme. Grün: Kronenverlichtung wird geringer, rot: Kronenverlichtung erhöht sich



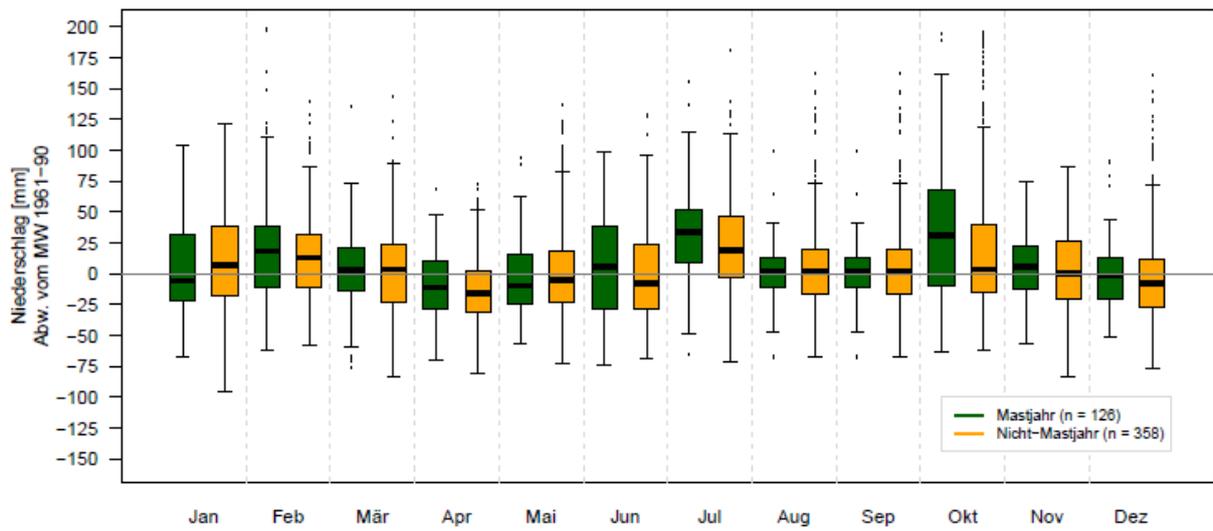
Anhang 10: Auswirkungen von Abweichungen der Tagesminimumtemperaturen, über die Nicht-Vegetationszeit gemittelt, im Vergleich zum 30-jährigen Mittel 1981-2010 auf die Kronenverlichtung von Kiefer (links oben), Eiche (rechts oben), Buche (links unten) und Fichte (rechts unten). Betrachtungszeiträume sind das Jahr der Aufnahme der Kronenverlichtung („Jahr“), das jeweilige Vorjahr (Jahr-1) bzw. 2 (Jahr-2) und 3 (Jahr-3) Jahre vor der Aufnahme. Grün: Kronenverlichtung wird geringer, rot: Kronenverlichtung erhöht sich



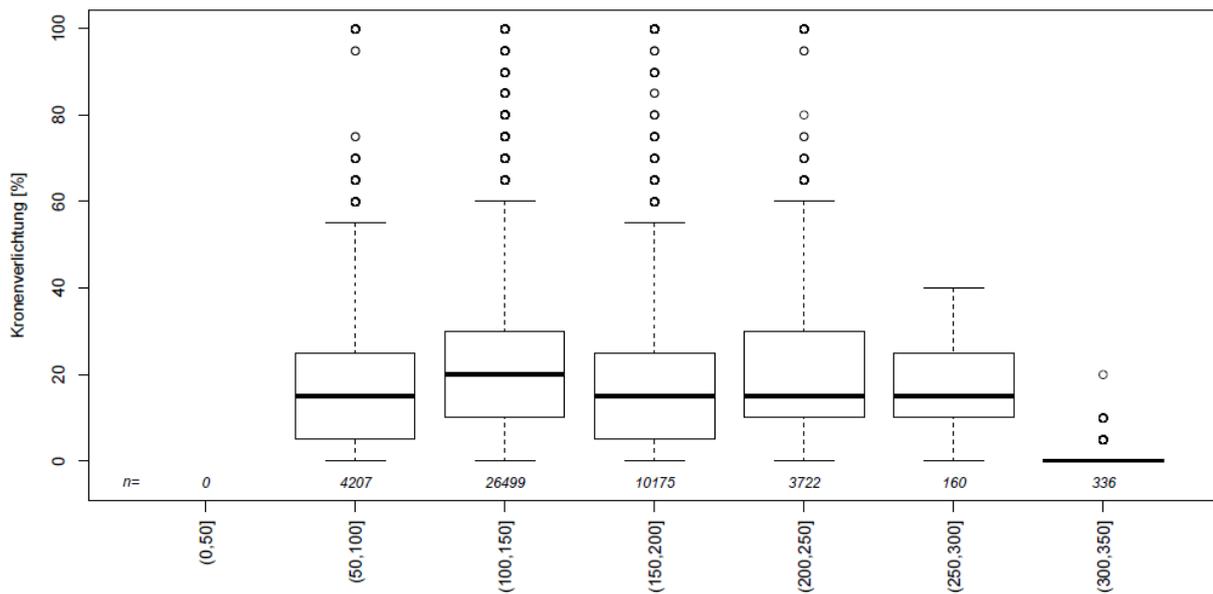
Anhang 11: Auswirkungen von Abweichungen der Tagesmaximumtemperaturen, über das Jahr gemittelt, im Vergleich zum 30-jährigen Mittel 1981-2010 auf die Kronenverlichtung von Kiefer (links oben), Eiche (rechts oben), Buche (links unten) und Fichte (rechts unten). Betrachtungszeiträume sind das Jahr der Aufnahme der Kronenverlichtung („Jahr“), das jeweilige Vorjahr (Jahr-1) bzw. 2 (Jahr-2) und 3 (Jahr-3) Jahre vor der Aufnahme. Grün: Kronenverlichtung wird geringer, rot: Kronenverlichtung erhöht sich



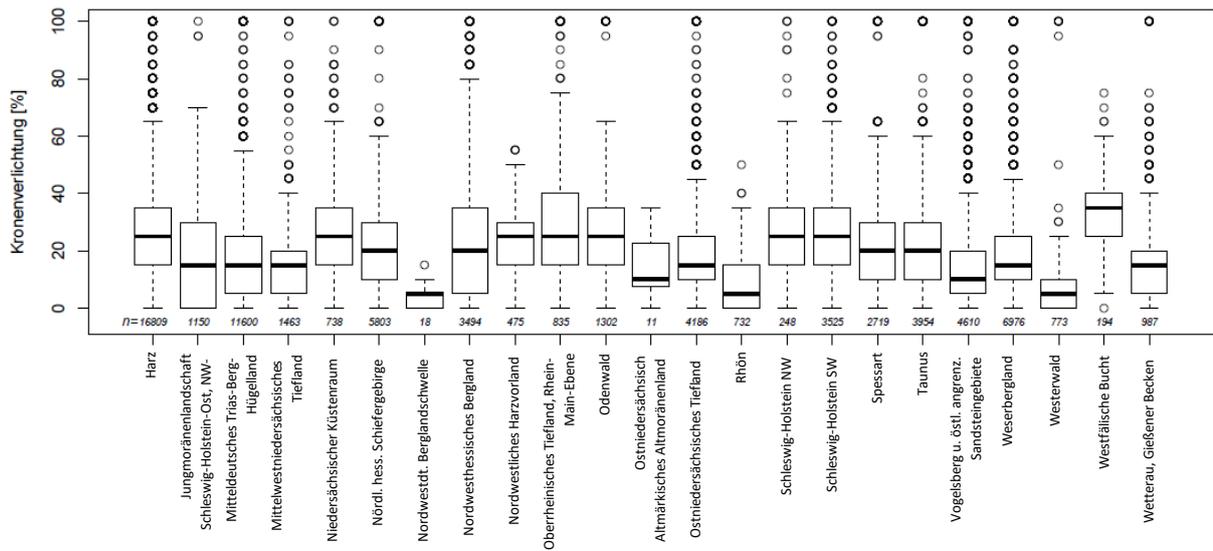
Anhang 12: Auswirkungen von Abweichungen des Minimums der über das Jahr kumulierten täglichen Klimatischen Wasserbilanz im Vergleich zum 30-jährigen Mittel 1981-2010 auf die Kronenverlichtung von Kiefer (links oben), Eiche (rechts oben), Buche (links unten) und Fichte (rechts unten). Betrachtungszeiträume sind das Jahr der Aufnahme der Kronenverlichtung („Jahr“), das jeweilige Vorjahr (Jahr-1) bzw. 2 (Jahr-2) und 3 (Jahr-3) Jahre vor der Aufnahme. Grün: Kronenverlichtung wird geringer, rot: Kronenverlichtung erhöht sich



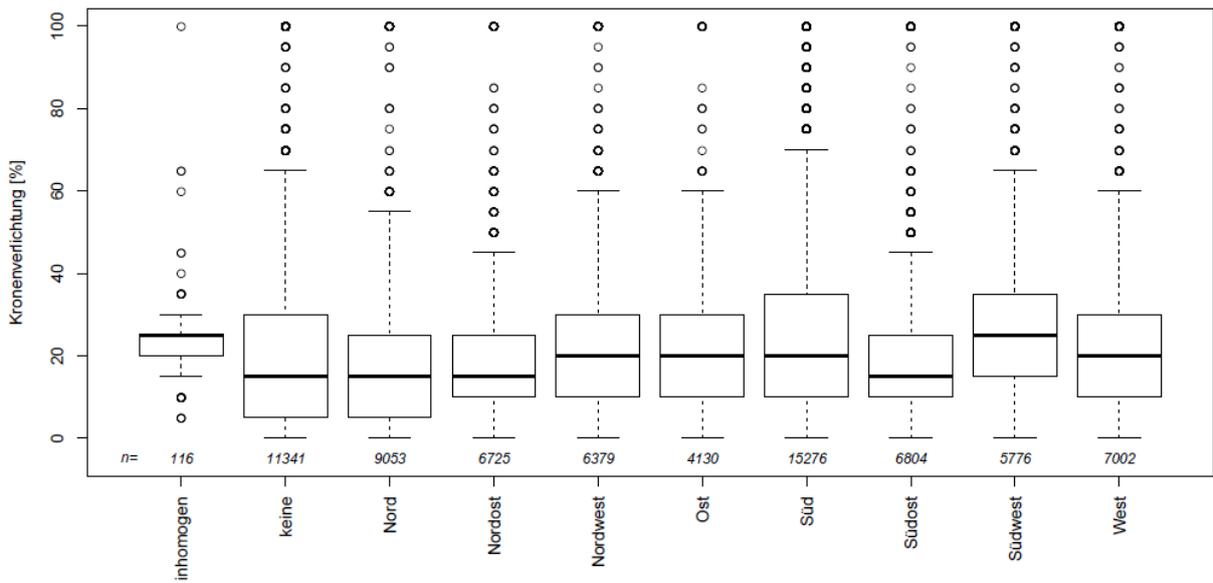
Anhang 13: Abweichung der Monatssummen des Niederschlages 2 Jahre vor einer starken Mast (mdst. 2/3 der Bäume eines Plots fruktifizieren mittel bis stark) bzw. einer Nicht-Mast (90% der Bäume eines Plots fruktifizieren nicht) vom langjährigen Mittel 1961-1990 auf BZE-Buchenflächen in Hessen, Niedersachsen, Sachsen-Anhalt und Schleswig-Holstein



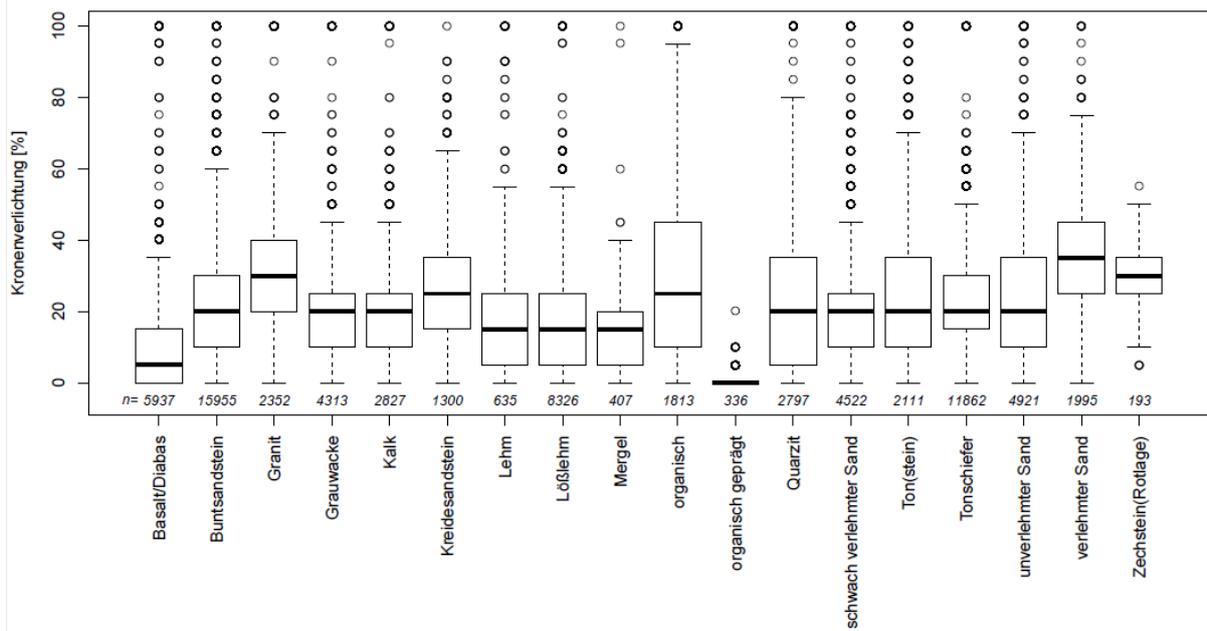
Anhang 14: Kronenverlichtung bei Fichte in Abhängigkeit von der nutzbaren Feldkapazität (nFK)



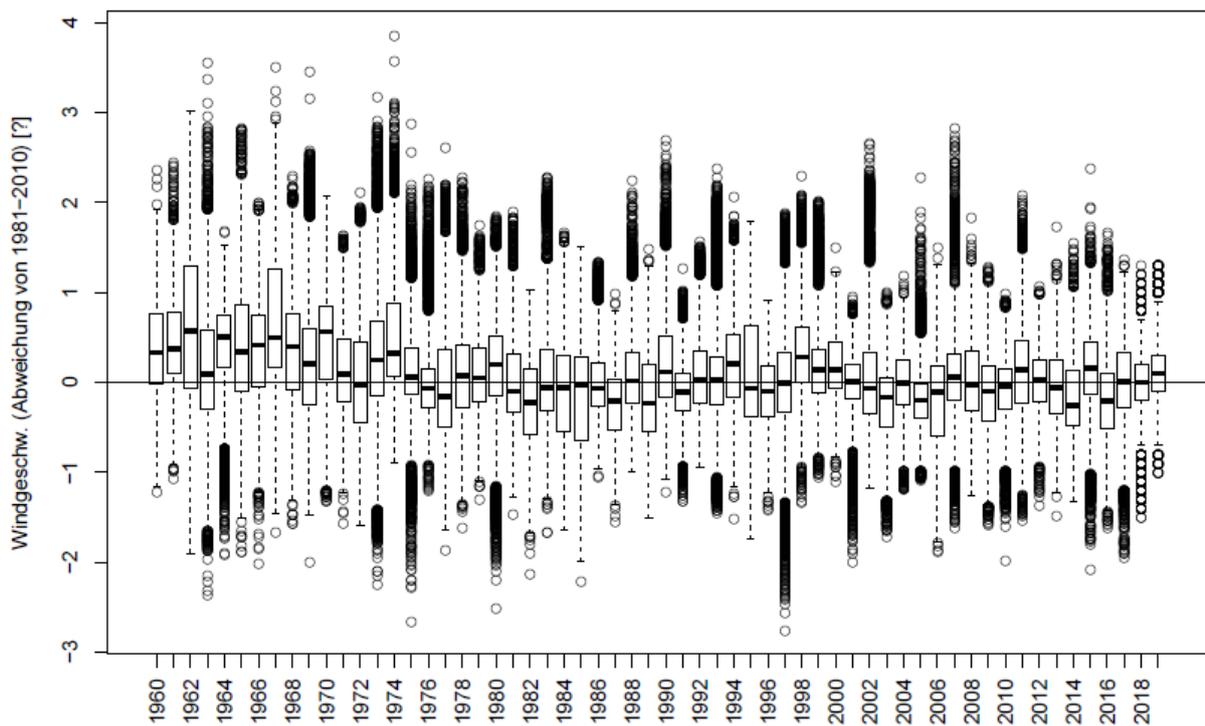
Anhang 15: Kronenverlichtung bei Fichte in Abhängigkeit vom Wuchsgebiet



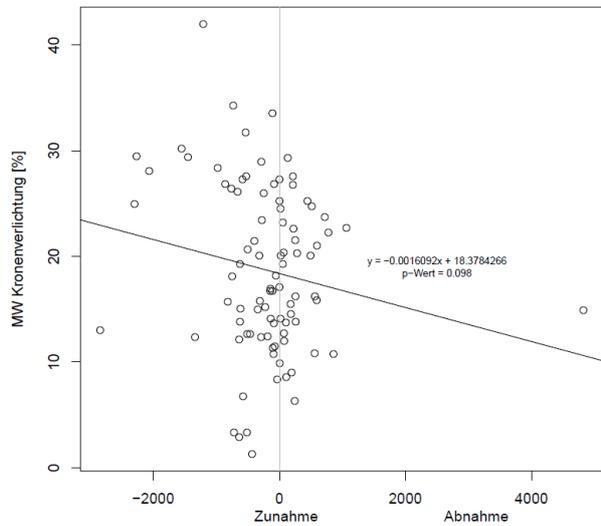
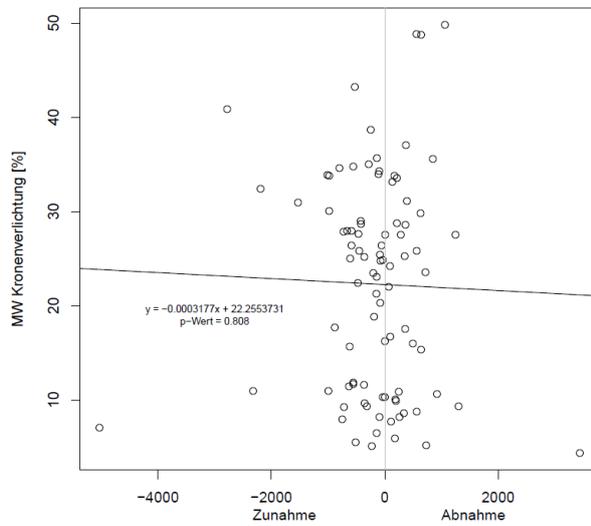
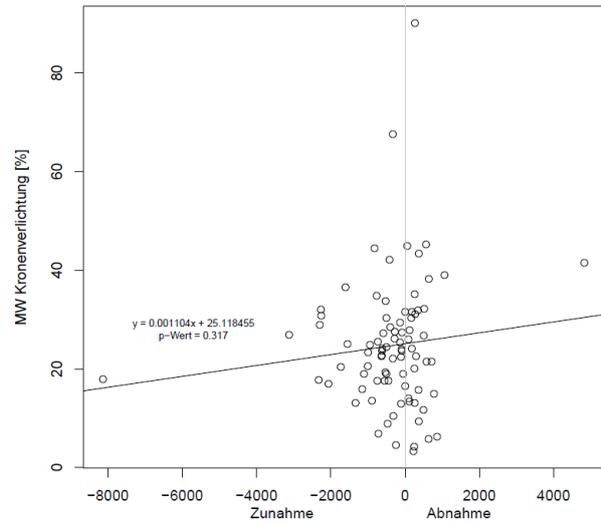
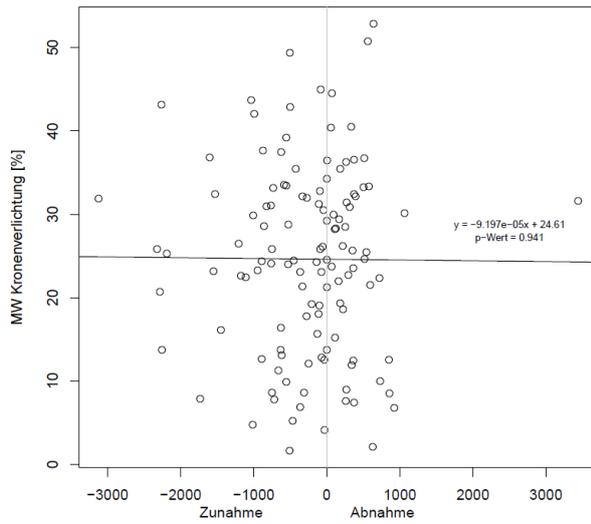
Anhang 16: Kronenverlichtung bei Fichte in Abhängigkeit von der Exposition



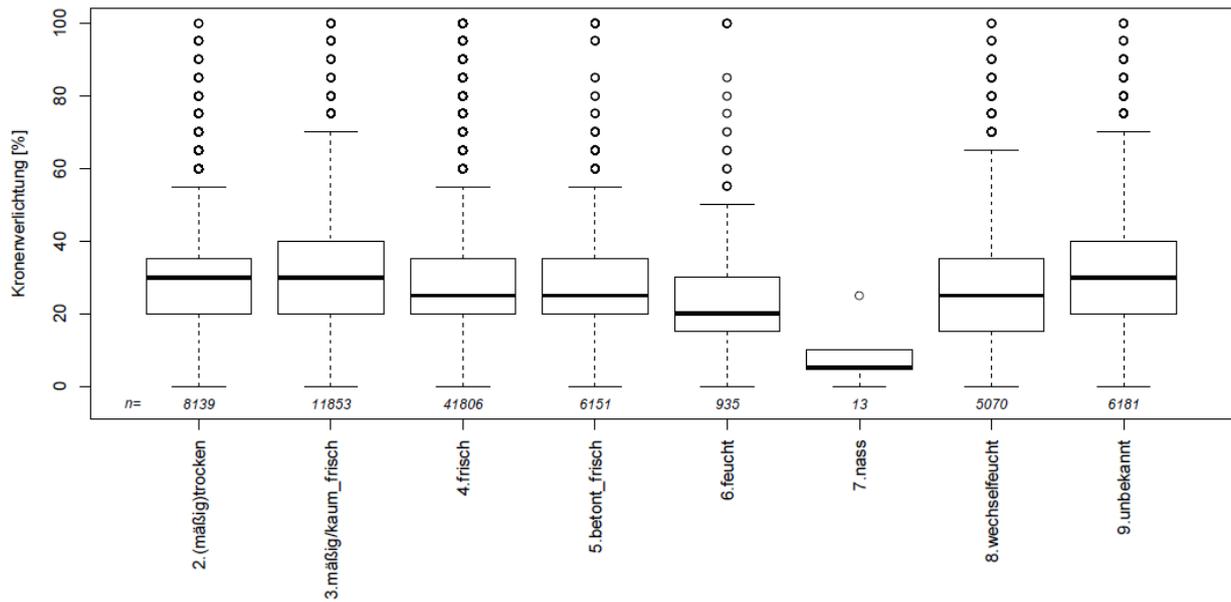
Anhang 17: Kronenverlichtung bei Fichte in Abhängigkeit von der Substratgruppe



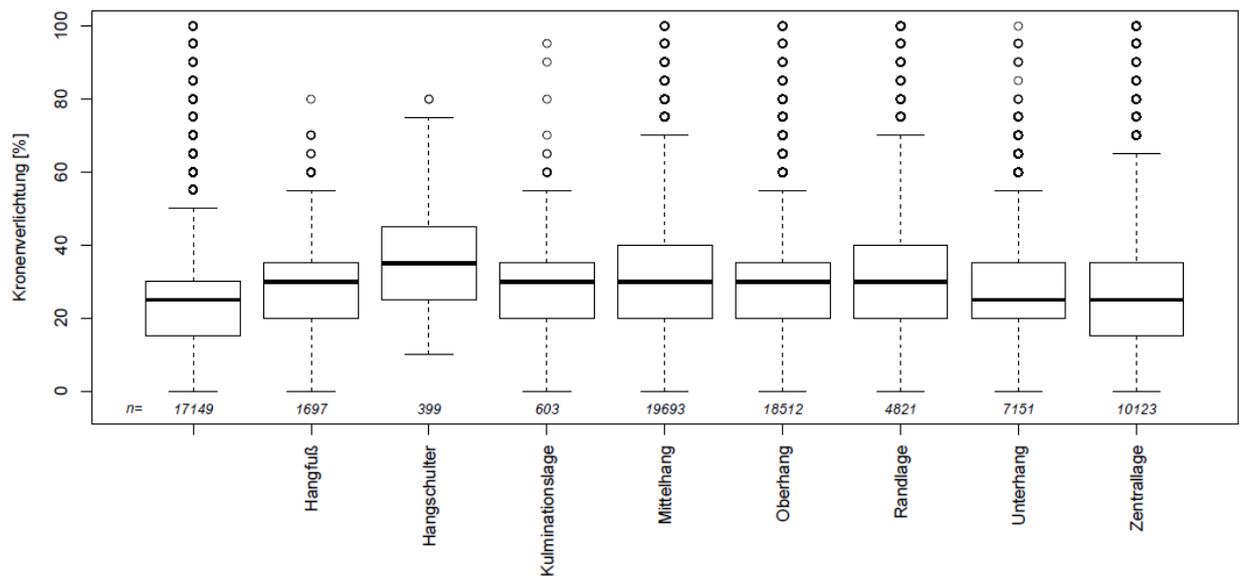
Anhang 18: Abweichung der mittleren Tageswindgeschwindigkeit 1960 bis 2019 vom langjährigen Mittel 2081 – 2010 in Hessen, Niedersachsen, Sachsen-Anhalt und Schleswig-Holstein



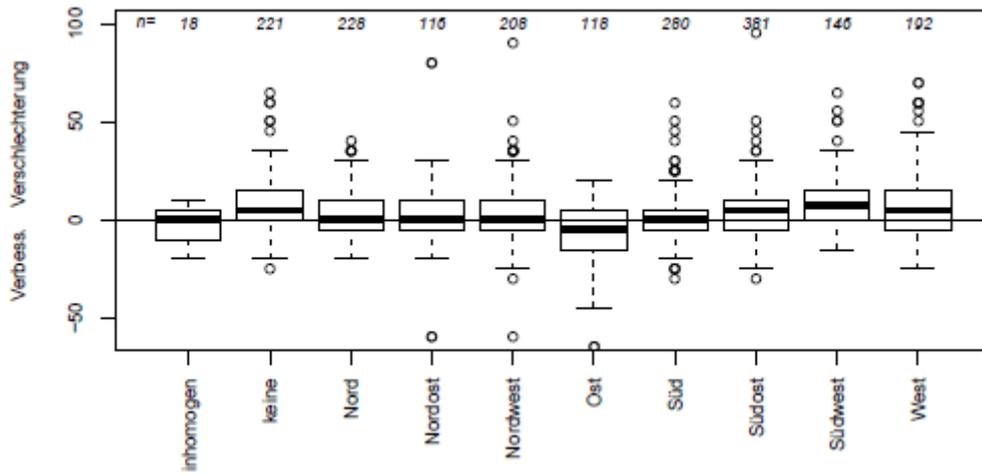
Anhang 19: Zusammenhang zwischen mittlerer Kronenverlichtung und der Veränderung des Stickstoffvorrates im Boden zwischen BZE I und BZE II für Plots mit Buche (oben links), Eiche (oben rechts), Fichte (unten links) und Kiefer (unten rechts).



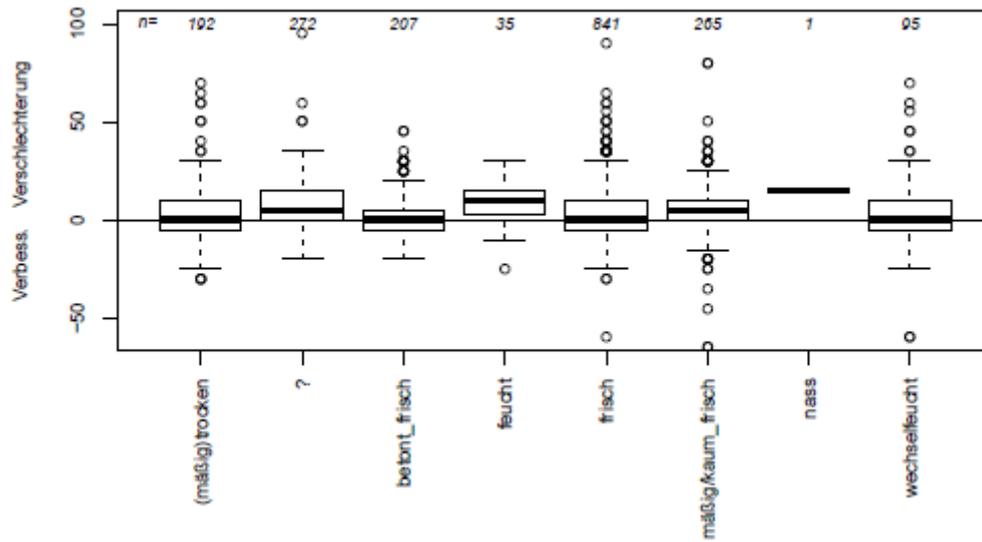
Anhang 20: Kronenverlichtung bei Buche (ü. 60 J.) nach Wasserhaushaltstufe



Anhang 21: Kronenverlichtung bei Buche (ü. 60 J.) nach Relieflage



Anhang 22: Veränderung der Kronenverlichtung von Buchen 2019 im Vergleich zum Vorjahr mit Bezug auf die Exposition des Standorts



Anhang 23: : Veränderung der Kronenverlichtung von Buchen 2019 im Vergleich zum Vorjahr mit Bezug auf die Wasserhaushaltsstufe des Standorts