



LAND
BRANDENBURG

Ministerium für Landwirtschaft,
Umwelt und Klimaschutz

Forstwirtschaft



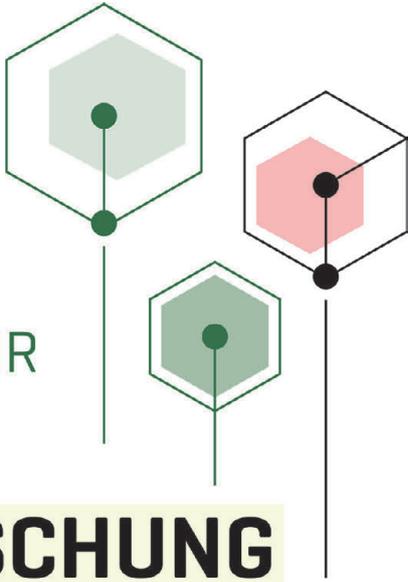
Eberswalder Forstliche Schriftenreihe Band 71

Zustand und Entwicklung der Rot-Buche in den Wäldern Brandenburgs unter den Bedingungen des Klimawandels

Eberswalder Forstliche Schriftenreihe Band 71

Zustand und Entwicklung der Rot-Buche in den Wäldern Brandenburgs unter den Bedingungen des Klimawandels





WALDWISSEN WIR

150 JAHRE

WALDFORSCHUNG

IN BRANDENBURG

Impressum:

- Herausgeber: Ministerium für Landwirtschaft,
Umwelt und Klimaschutz des Landes Brandenburg
Landesbetrieb Forst Brandenburg
- Redaktion: Landeskompetenzzentrum Forst Eberswalde
Prof. Dr. habil. Ralf Kätzel
- Gesamtherstellung: Brandenburgische Universitätsdruckerei und Verlagsgesellschaft Potsdam mbH
Karl-Liebnecht-Straße 24/25
14476 Potsdam (OT Golm)
1. Auflage: 1.000 Exemplare, gedruckt auf PEFC-Papier.
- Titelfotos: Frank Becker (Umschlag), Dr. Jan Engel (S. 8)
- Fotos im Text: Von den Autoren der Beiträge, wenn nicht anders vermerkt.



Eberswalde, Dezember 2021

Diese Druckschrift wird im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit des Ministeriums für Landwirtschaft, Umwelt und Klimaschutz (MLUK) des Landes Brandenburg kostenlos abgegeben und ist nicht zum Verkauf bestimmt. Sie darf weder von Parteien noch von Wahlwerbern während des Wahlkampfes zum Zwecke der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für Landtags-, Bundestags- und Kommunalwahlen. Missbräuchlich sind insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen, an Informationsständen von Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken oder Aufkleben parteipolitischer Informationen und Werbemittel. Untersagt ist gleichfalls die Weitergabe an Dritte zum Zwecke der Wahlwerbung. Unabhängig davon, wann, auf welchem Weg und in welcher Anzahl diese Schrift dem Empfänger zugegangen ist, darf sie auch ohne zeitlichen Bezug zu einer Wahl nicht in einer Weise verwendet werden, die als Parteinahme der Landesregierung Brandenburgs zugunsten einzelner Gruppen verstanden werden könnte.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	
<i>Axel Vogel, Minister für Landwirtschaft, Umwelt und Klimaschutz des Landes Brandenburg</i>	5
Zur nacheiszeitlichen Einwanderungsgeschichte der Buchenwälder im nordostdeutschen Tiefland – eine Einführung	
<i>Ulf Pommer, Dr. Olaf Ruffer</i>	9
Der Vitalitätszustand der Rot-Buche in Brandenburg	
<i>Aline Wenning, Dr. Rainer Hentschel</i>	14
Pilzliche und pilzähnliche Organismen an Rot-Buche (<i>Fagus sylvatica</i> L.)	
<i>Aline Wenning, Christine Dahms</i>	25
Gefährdung der Rot-Buche (<i>Fagus sylvatica</i> L.) durch Tiere und abiotische Einflüsse	
<i>Dr. Kati Hielscher</i>	35
Wuchsreaktionen der Rot-Buche auf die Witterung: ausgewählte Ergebnisse von Jahrringanalysen in Nordostdeutschland	
<i>Prof. Dr. habil. Jens Schröder, Prof. Dr. Marieke van der Maaten-Theunissen, Dr. Ernst van der Maaten, Dr. Eric Andreas Thurm</i>	46
Biochemische Blattinhaltsstoffe als Stressindikatoren bei Rot-Buchen	
<i>Prof. Dr. habil. Ralf Kätzel, Dr. Sonja Löffler</i>	56
Zur physiologischen Differenzierung der Rot-Buche am Beispiel einer Fläche des „Internationalen Herkunftsversuches“ 1996/98 im Fläming	
<i>Prof. Dr. habil. Ralf Kätzel, Dr. Mirko Liesebach, Frank Becker, Dr. Sonja Löffler</i>	68
Der genetische Fußabdruck der Verjüngungsphase – Einblicke in die Geschichte zweier alter Buchenbestände in Brandenburg	
<i>Dr. Pascal Eusemann, Prof. Dr. habil. Ralf Kätzel, Frank Becker, Dr. Heike Liesebach</i>	86
Natürliche Regeneration von Buchenwäldern in der Buchenmischwald-Klimaregion Brandenburgs - am Beispiel des Melzower Buchennaturwalds	
<i>Dr. Olaf Ruffer</i>	94
Prognose zur Entwicklung der Rot-Buche unter veränderten Wasserhaushaltsbedingungen	
<i>Prof. Dr. Winfried Riek, Dr. Alexander Russ, Dr. Daniel Ziche, Dr. Rainer Hentschel, Andrea Brini</i>	104
Zur Zukunft der Rot-Buche im Brandenburger Wald – ein Zwischenfazit	
<i>Prof. Dr. habil. Jens Schröder, Prof. Dr. habil. Ralf Kätzel</i>	129
Bisher erschienene Bände der Eberswalder Forstlichen Schriftenreihe	131

Vorwort

Liebe Leserinnen und Leser,

die Buche ist der Baum des Jahres 2022. Als zweithäufigste Laubbaumart in Brandenburg hat die Rot-Buche (*Fagus sylvatica* L.) ihren Verbreitungsschwerpunkt in unseren nördlichen Landesteilen. Im Zuge des Umbaus der nadelholzdominierten Wälder in laubholzreiche Mischbestände wird auch der Buchenanteil weiter erhöht.



Einerseits wird die Buche vor allem wegen ihrer hohen Anpassungsfähigkeit und Konkurrenzstärke geschätzt. Andererseits erreicht die Buche in Brandenburg in verschiedenen Waldgesellschaften bereits den Grenzbereich ihrer Wasserversorgung. Mit zunehmender Trockenheit ist ein Rückgang buchendominierter Waldgesellschaften bis zum Ende dieses Jahrhunderts zu erwarten. Die extremen und aufeinander folgenden Trockenphasen, insbesondere der letzten Jahre, haben einige lokale Buchenvorkommen bereits erheblich geschwächt. In Kombination mit weiteren Stressfaktoren nimmt deren Vitalität und damit Überlebensfähigkeit ab.

Lange Trockenphasen in Brandenburg 2018 und 2019 haben die Buchen geschädigt und sie anfälliger für Schadorganismen gemacht. Auch wenn 2021 die Zustandsbewertung in der Kategorie deutliche Schäden von 62 Prozent auf 40 Prozent gesunken ist, ist die Situation weiterhin angespannt. Denn der Anteil der Buchen ohne Schäden ist nach dem aktuellen Waldzustandsbericht des Landes mit rund 7 Prozent sehr gering.

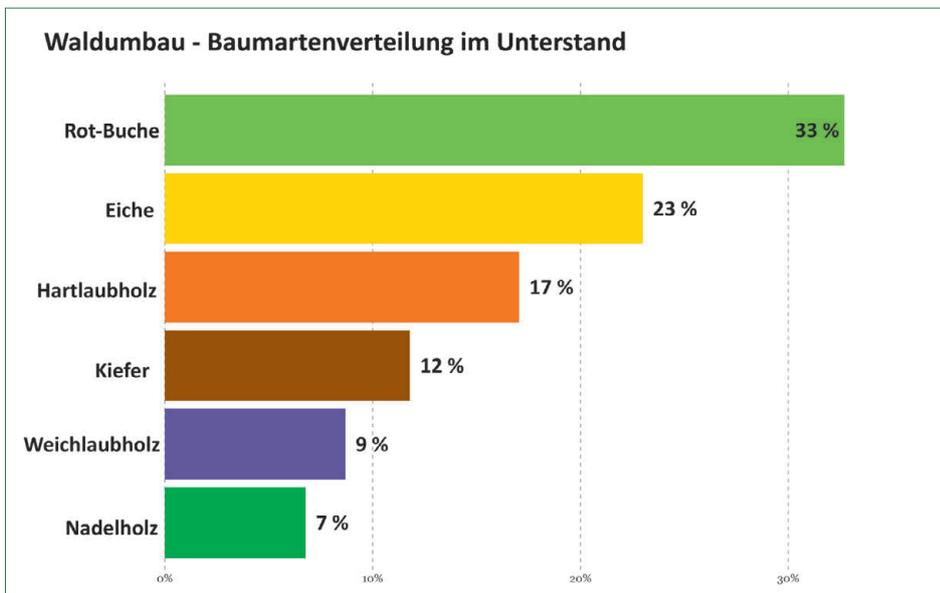
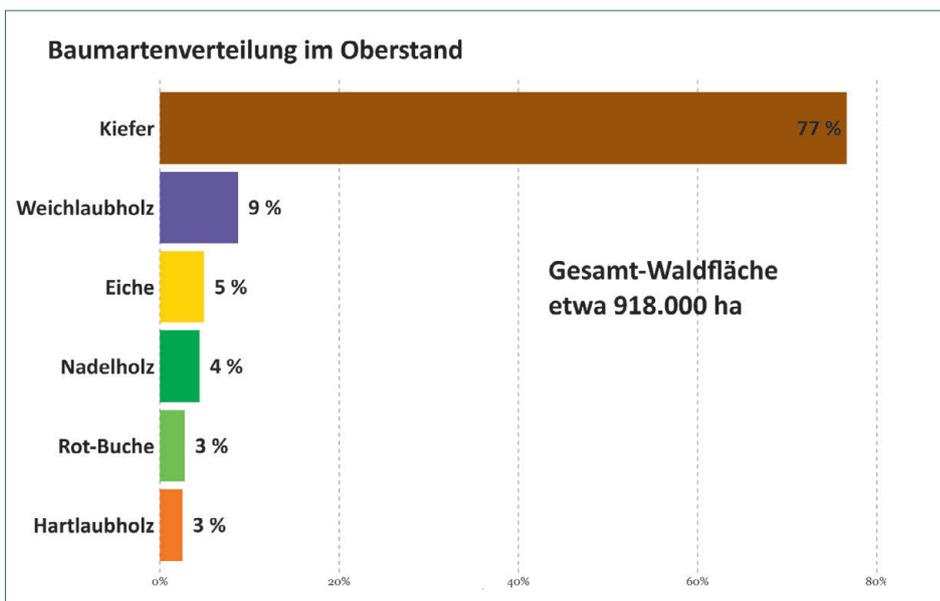
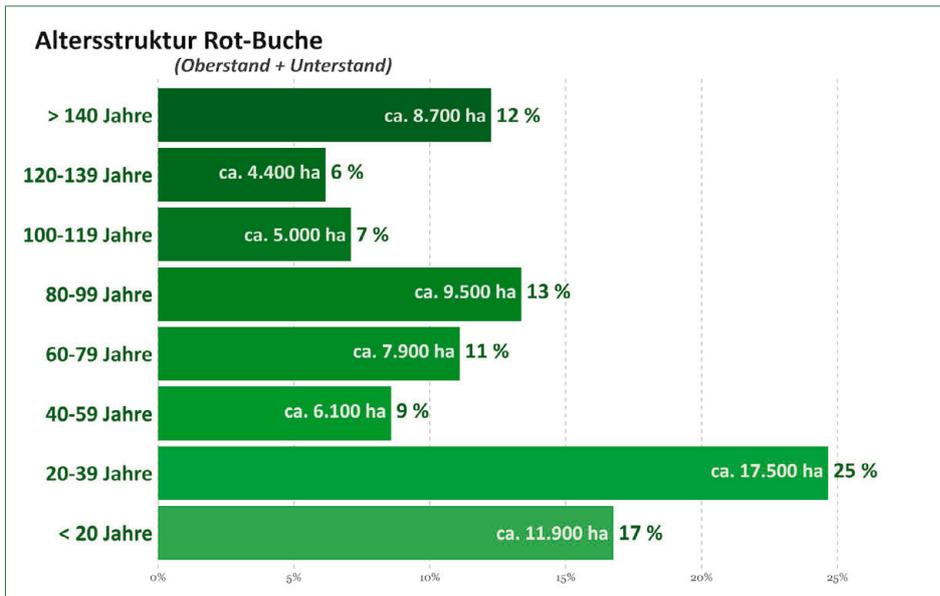
Das rasche Absterben noch bis vor kurzem als vital eingeschätzter Buchen infolge der trockenen Sommer der vergangenen Jahre ist alarmierend. Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler des Landeskompetenzzentrums Forst verschiedener Fachdisziplinen haben den Vitalitätsverlust und die Grenzen des Anpassungsvermögens dieser Baumart untersucht. Sie erstellen Prognosen zur künftigen Verbreitung der Buche mit Blick auf die für Brandenburg zu erwartenden Klimaszenarien.

Mit der vorliegenden Schrift werden in zehn Kapiteln der aktuelle Forschungsstand und die Ergebnisse von Einzelstudien dokumentiert. Die Lektüre soll das Wissen um eine allseits geschätzte, für artenreiche Waldgesellschaften wichtige und auch forstwirtschaftlich interessante Baumart erweitern.

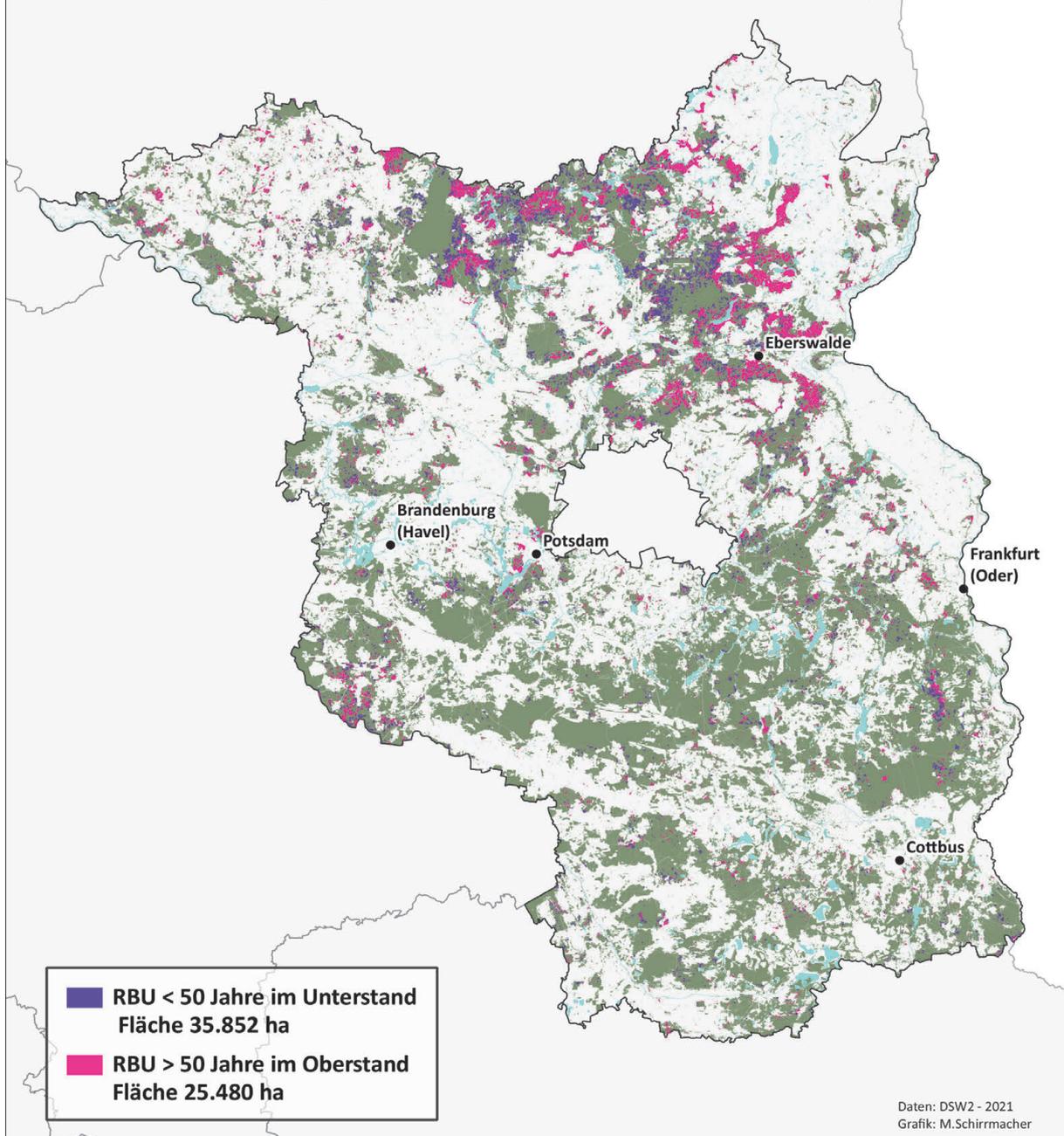
Gerade am Beispiel der Rot-Buche zeigt sich, wie notwendig es ist, sich mit den Stressfaktoren, denen unsere Wälder ausgesetzt sind, auseinanderzusetzen und im Bündnis mit den Erkenntnissen der Forstpraxis gegenzusteuern.

So steht die Rot-Buche exemplarisch für die Verwundbarkeit unserer Wälder infolge der Klimakrise.

Axel Vogel
Minister für Landwirtschaft, Umwelt
und Klimaschutz des Landes Brandenburg



Flächenverteilung der Rot-Buche in Brandenburg





Zur nacheiszeitlichen Einwanderungsgeschichte der Buchenwälder im nordostdeutschen Tiefland – eine Einführung

Ulf Pommer und Olaf Ruffer

Erdgeschichtlicher Ausgangspunkt für das Gesamtverständnis der Besiedelungsgeschichte der Rot-Buche im Nordostdeutschen Tiefland ist, wie auch bei anderen Arten des heutigen potenziell natürlichen Waldbildes Mitteleuropas, das Tertiär, vor ca. 64 Mio. Jahren (Abschnitt der Erdneuzeit). Aufgrund von fossilen Pflanzenresten, die in Tertiärablagerungen beispielsweise des Lausitzer Braunkohlereviere (NOWEL ET AL., 1995) gefunden wurden, ist bekannt, dass im Alttertiär noch viele tropische und subtropische Pflanzen, wie z. B. Palmen und Feigen der verschiedensten Gattungen vorkamen. Die Vegetation hatte damals ein ähnliches Aussehen wie die heutigen Berg-Regenwälder des tropischen Südostasiens. Das Tertiär ist durch fortschreitende Abkühlung gekennzeichnet, so dass in seiner zweiten Hälfte (Miozän, vor ca. 25 Millionen Jahren) die sehr wärmebedürftigen Pflanzenarten ausstarben und mehr und mehr Laubhölzer der gemäßigten Breiten die Vorherrschaft übernahmen.

Die Vegetation des Pliozäns, d. h. des letzten Zeitabschnitts des Tertiärs (vor ca. 13 Millionen Jahren) vor dem Pleistozän, war bestimmt durch einen sommergrünen Laubwald in dem verschiedenen Arten u. a. der Gattung Eiche (*Quercus*), Ahorn (*Acer*) sowie Nadelbaumarten vorkamen. Die Vegetationsausstattung war ähnlich wie in der Gegenwart, nur weitaus artenreicher. Arten der Gattungen Götterbaum (*Ginkgo*), Sumpfpypresse (*Taxodium*), Mammutbaum (*Sequoia*), Hemlocktanne (*Tsuga*), Magnolie (*Magnolia*), Tulpenbaum (*Liriodendron*), Amberbaum (*Liquidambar*), Hickory (*Carya*), Zelkove (*Zelkova*), Douglasie (*Pseudotsuga*) u. a., wie sie gegenwärtig noch in anderen Teilen der Holarktis, wie z. B. im atlantischen Nordamerika, in Ostasien und im zentralmexikanischen Hochland anzutreffen sind, waren neben den heute in Mitteleuropa vorkommenden Arten verbreitet (KLINK, 1998).

Das gravierendste erdgeschichtliche Ereignis der Erdneuzeit war für die Vegetation Mitteleuropas das quartäre Eiszeitalter, das vor etwa 2 Millionen Jahren begann. Die verhältnismäßig einheitliche tertiäre Flora der nördlichen Halbkugel wurde durch das kaltzeitliche Klima und die nach Süden vorrückenden Eismassen in südlichere Breiten abgedrängt. In Europa stellten dabei die von West nach Ost und somit quer zu dem Wanderweg der Baumarten verlaufenden Hochgebir-

ge für die Ausweichbewegung der Arten in den Kaltzeiten als auch in ihren Rückbesiedelungsbewegungen in den nachfolgenden Zwischenwarmzeiten und dem bis heute andauernden Holozän ein fast unüberwindbares Hindernis dar. Viele Baumarten starben aus bzw. haben bis heute ihre ursprünglichen Verbreitungsgebiete (noch) nicht wieder besiedelt.

Das heutige Brandenburg erlebte drei große Vergletscherungszyklen, die Elster-, Saale- und Weichselkaltzeit, die jeweils zwischen 100.000 und 200.000 Jahren andauerten und zwischen denen zwei Warmzeiten (Holstein und Eem) von jeweils ca. 15.000 Jahren Zeitdauer lagen. Nach dem Rückgang des Inlandeseises der letzten Eiszeit und der nachfolgend einsetzenden langsamen Erwärmung erfolgte die Wiederbesiedlung aus den Refugialgebieten des Mittelmeerraumes. Nach FIRBAS (1952) besiedelten zuerst die Kiefern und Birken das Nordostdeutsche Tiefland, beginnend vor etwa 12.000 Jahren. Relativ spät erreichten die ersten Eichen gemeinsam mit den Linden und Ulmen in der frühen Wärmezeit (Eichenmischwald-Kiefern-Hasselzeit) vor ca. 9.000–7.000 Jahren das Gebiet des heutigen Brandenburgs. Ihre maximale Verbreitung erreichte die Eiche in der mittleren Wärmezeit (Eichenmischwaldzeit), vor etwa 7.500 bis 4.500 Jahren. Begünstigend hierfür wirkte die Erwärmung des Klimas. So bestanden in der zweiten Hälfte der Eichenmischwaldzeit die Wälder überwiegend aus Eichen. Nur zerstreut traten Ulme und Linde auf. In diese Zeit fällt auch die Rückkehr von Esche, Berg- und Spitz-Ahorn sowie des Wildobstes (BERTSCH, 1953). Parallel hierzu ging der Kiefernanteil stark zurück. Erst in der späten Wärmezeit vor 4.500 bis 2.500 Jahren wurde das Nordostdeutsche Tiefland zunehmend mit Rot-Buche (sowie mit Tanne und Eibe) besiedelt (Eichenmischwald-Buchenzeit). Den Raum um Eberswalde/Chorin erreichte die Buche vor etwa 5.000 Jahren (HESMER, 1933).

Die allmähliche Abkühlung und Zunahme der Feuchtigkeit, die vor ca. 1600 Jahren begann, bewirkte einen bedeutenden Wandel im Vegetationsbild der spät- und nacheiszeitlichen Waldentwicklung. (MÜLLER 1969). Im Norden und Westen des Nordostdeutschen Tieflandes breitete sich die Rot-Buche als Waldbildner in ehemals von den Eichen beherrschten Wäldern aus, während

Tab. 1: Pollenmittelwerte aus märkischen Kiefern-, Buchen- und Eichengebieten südlich des Pommerschen Stadiums der Weichselvereisung (HESMER, 1933; zit. aus FIRBAS, 1952) (Pollenanzahl/je Probe)

Periode	Geologie (Vegetation)	Birke	Kiefer	Hasel	Eiche	Ulme	Linde	Erle	Buche	Tanne	Hainbuche	Proben
Mittlere Wärmezeit (Eichenmischwaldzeit)	Sander (7 Kieferngebiete)	9,9	64,2	12,5	6,0	1,7	1,8	17,1	0,3	0,01	0,01	79
	Endmoräne (2 Buchengebiete)	19,5	51,1	15,8	12,0	1,3	1,5	13,9	0,4	-	-	10
		12,3	45,0	33,2	10,6	4,6	9,6	16,6	0,6	0,1	0,2	8
	Grundmoräne Schweres Geschiebe sandüberlagerte Moräne (2 Eichengebiete)	13,3	27,0	8,7	38,3	0,3	-	17,0	1,7	-	1,7	3
8,5		64,2	7,2	9,3	2,7	0,8	12,5	0,5	0,2	-	6	
Ältere Nach-Wärmezeit (Buchenzeit)	Sander (7 Kieferngebiete)	11,2	64,2	1,9	5,4	0,2	0,1	14,5	2,1	0,12	1,7	62
	Endmoräne (2 Buchengebiete)	12,9	41,0	0,8	9,1	0,9	-	5,7	28,5	-	1,0	8
		16,0	30,1	1,3	6,0	0,4	0,5	10,1	34,8	0,1	1,8	
	Grundmoräne Schweres Geschiebe sandüberlagerte Moräne (2 Eichengebiete)	16,8	45,0	1,3	24,0	0,3	-	9,2	2,7	-	1,8	6
		14,7	49,6	1,7	12,0	0,3	-	19,7	1,7	-	2,8	3

Für das Ende des 18. Jahrhunderts stellt PFEIL den Waldflächenanteil in der Mark Brandenburg wie folgt dar:

Tab. 2: Waldflächenanteil der Mark Brandenburg im Jahre 1780 (PFEIL, 1839)

Waldvegetationseinheit	Anteil an der Gesamtwaldfläche
Buchenwälder	4 %
Buchen,-Eichen,-Kiefern-mischwälder	7 %
Eichenwälder und Eichenforsten	15 %
Kiefernwälder und Kiefernforsten	58 %
Erlen- und Birkenwälder	16 %

von Mecklenburg über Nord- nach Mittelbrandenburg sich Rot-Buche (*Fagus sylvatica*) und Hainbuche (*Carpinus betulus*) zusammen bestandesbildend etablierten.

Die höchsten Pollenwerte erreichte die Rot-Buche mit über 30 % damals in den nördlichen höher aufragenden jungpleistozänen Endmoränen, so dass hier auf absolute Vorherrschaft dieser Baumart geschlossen werden kann (SCAMONI 1950).

Neben diesen Wäldern mit vorherrschender Buche formierte sich ein breiter, nach Süden hin sich ausdehnender Buchenmischwald-Gürtel mit Rot-Buche und Hainbuche, ergänzt durch Eiche und Linde, so dass LANGE (1971, 1976), MÜLLER (1965, 1969, 1971) und KLOSS (1980) und in jüngerer Zeit durch mehrere Arbeiten von SCHOKNECHT ergänzt, für diese Gebiete vor 1.500 bis 800 Jahren übereinstimmend eine Buchen-Hainbuchen-Zeit auswiesen. Dieser ehemalige

als Buchenmischwald formierte Waldzustand im Übergangsbereich des Buchenwaldes zu den buchenwaldfreien Gebietsteilen im Süden des Gebietes findet heute seine Entsprechung in aufgefundenen und daraus abgeleiteten ähnlichen natürlichen Vegetationsformen. Beispielhafte Vorkommen dieser Mischwälder, als wichtige Lernmenge für die Waldbewirtschaftung, sind heute beispielsweise in den Gebieten Fauler Ort, Redernswalde, Bugsinseekette vorzufinden. Diese Buchenmischwaldregion stellt potenziell die baumartenreichste Waldregion in Brandenburg dar. Im südlichen Teil des Nordostdeutschen Tieflandes können sich nur noch auf Geländeerhebungen über 130m NHN Buchenwälder auf grundwasserfreien Standorten etablieren, die dann als Trittsteine zu den Buchenwäldern des Berg- und Hügellandes angesehen werden können.

Darüber hinaus lässt sich im Nordostdeutschen Tiefland eine Süd-Nord-Klimadifferenzierung der Buchen-

waldvorkommen innerhalb des Gebietes erkennen und in folgende waldgeografische Regionen unterteilen:

- Hügelland-Buchenwaldregion der Dübener Heide, des Fläming und der Lausitz
- Eichen-Hainbuchen-Winterlinden-Buchenwaldregion des klimatischen Übergangsbereiches (Buchenmischwälder)
- Südbaltische Buchenwaldregion (Buchenwälder)
- Extrazonale Kleinareale des nordbaltischen Buchenwaldes (Nordbuchenwälder)

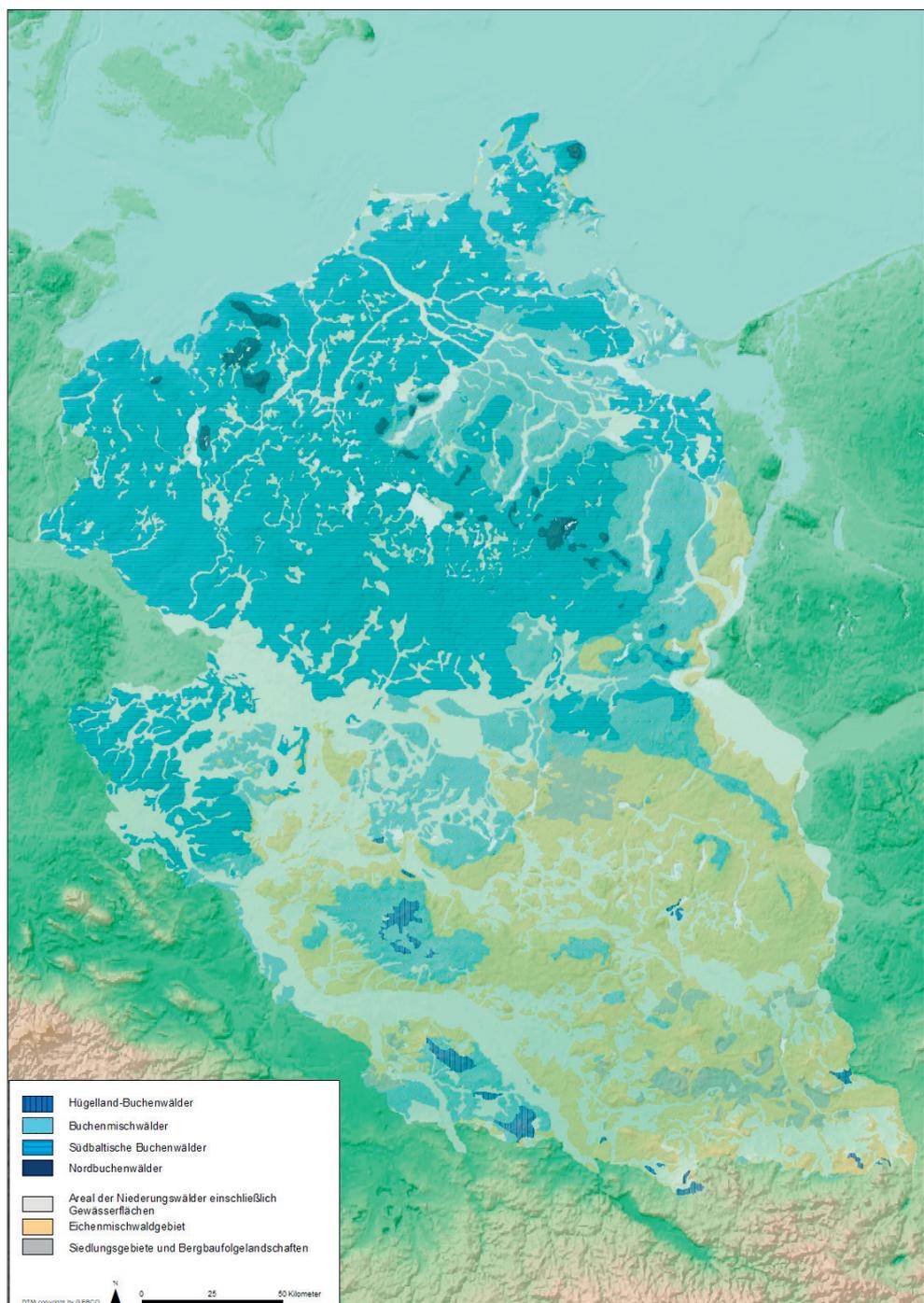
Die Darstellung der Buchenwälder folgt im weiteren der üblichen Dreigliederung der Buchenwälder nach

dem Basengehalt ihrer Standorte in

- Buchenwälder sandiger basenarmer Standorte
- Buchenwälder lehmiger basenkräftiger Standorte
- Buchenwälder basen- und karbonatkalkreicher Standorte

Vegetationskundliche Merkmale untergliedern diese Gruppen zunächst nach der oben ausgeführten waldgeografischen Differenzierung und dann nach der speziellen Vegetationswirksamkeit des Standortes (nach Standortgruppen der forstlichen Standortserkundung (KOPP & SCHWANECKE 1994).

Abb. 1: Karte der potenziell natürlichen Verbreitung der Buchenwälder im Nordostdeutschen Tiefland



Eichen-Hainbuchen-Winterlinden-Buchenmischwälder

Baumarten des östlichen Eichenmischwaldes und des nordwestlichen Buchenwaldes bilden im Übergang vom subozeanischen zum subkontinentalen Klimacharakter mit mittleren Jahresniederschlägen von 540–580 mm einen gürtelartig ausgebildeten, wirklichen Buchenmischwald.

Diese Wälder vermitteln zu den Mischwäldern der hochkollinen Höhenstufe des Hügel- und Berglandes. Im Unterschied zum natürlichen Buchenwaldgebiet tragen in dieser Übergangszone die bodenärmsten Standorte keinen buchenreichen Mischwald mehr, sie werden von Natur aus bereits von buchenhaltigen Eichen- bzw. Kiefernwäldern eingenommen.

In der Höhengliederung liegen die potentiellen Standorte der Eichen-Hainbuchen-Buchen-Mischwälder zwischen den höher gelegenen Buchenwäldern und den tiefer gelegenen Eichen-Mischwäldern. Dieser Höhenbereich beginnt im Nordwesten Brandenburgs unterhalb 60 m Seehöhe, im Nordosten unterhalb 80 m über NHN. Im westlichen Mittelbrandenburg sowie im Südberliner und Potsdamer Raum liegen die Vorkommen unterhalb von 80 bzw. 120 m über NHN, im Fläming und weiter südlich bilden die Höhenlinien von 110 m Seehöhe im Westen und 160 m Seehöhe im Osten die obere Begrenzung. Dieser landesweite Normaltrend in der Höhenverteilung wird lokal durch Geländeform und Geländeexposition modifiziert.

Charakteristisch in der Vegetationszusammensetzung der Krautschicht dieser Waldgesellschaftsgruppe ist im Unterschied zu den Buchenwäldern das Zurücktreten oder Fehlen einiger Luft- und Bodenfeuchte orientierter Arten sowie die stärkere Beteiligung licht- und wärmebedürftiger Pflanzen, unter ihnen vor allem Gräser wie Hainrispengras (*Poa nemoralis*), Rotes Straußgras (*Agrostis capillaris*), Reitgräser (*Calamagrostis arundinacea*, *C. epigejos*).



Abb. 2: Goldnessel-Hainbuchen-Winterlinden-Buchenwald im NSG Fauler Ort (Nordbrandenburg)

Die Abgrenzung zu den Eichen-Mischwäldern ergibt sich in positiver Hinsicht durch die noch ansehnliche natürliche Beteiligung der Buche (*Fagus sylvatica*) am Bestandaufbau. Die Oberhöhen der Hauptbaumarten sind innerhalb der Buchenmischwaldregion nahezu ausgeglichen.

Buchenwälder der Hügelland- und Südbaltischen Buchenwaldregion

Im nördlichen Brandenburg erreicht die südbaltische Buchenwaldregion ihre südliche Grenze. Die Buchenwaldvorkommen im Hohen Fläming bilden ebenso wie einige kleinere Vorkommen des Buchenwaldes an lokalklimatisch luft- und grundfeuchten, gewässernahen Stellen Mittelbrandenburgs Trittsteine zu den natürlichen Buchenwaldgebieten des Berg- und Hügellandes in Sachsen und Sachsen-Anhalt, die Brandenburg jedoch in geschlossener Form noch nicht erreichen.

In der Artenzusammensetzung und Wuchsleistung der Baumarten vermitteln sie zu den Wäldern der submontanen Höhenstufe des Hügel- und Berglandes. Im groben Anhalt lässt sich feststellen, dass die klimatischen Voraussetzungen für die Ausbildung von grundwasserfernen Buchenwäldern in Brandenburg an mittlere Jahresniederschläge von über 580 mm gebunden sind, die eine gewisse relative Luftfeuchte und einen mehr ausgeglichenen Verlauf der Lufttemperaturen im Jahresverlauf garantieren. In Nordwestbrandenburg beginnen Buchenwaldvorkommen über einem Höhenniveau von 60 m NHN, in Nordostbrandenburg über einem von 80 m über NHN. Im südlicher gelegenen Hohen Fläming kommen Buchenwälder erst über 130 m Seehöhe vor. Das zeigt, dass der Süd - Nordgradient in der Höhenverbreitung des mitteleuropäischen Buchenwaldes in Brandenburg deutlich festzustellen ist. Lässt das Klima die Ausbildung des Buchenwaldes einmal zu, so duldet die Rotbuche in der Waldentwicklung und im natürlichen Waldaufbau auf Grund ihrer Konkurrenzkraft durch Beschattung und Höhenwachstum nur selten langfristig andere Baumarten neben sich in



Abb. 3: Perlgras-Buchenwald im NSG Arnimswalde (Nordbrandenburg)

der Baumschicht und besiedelt dabei nahezu die gesamte ökologische Breite der terrestrischen Standorte von nährstoffreich bis nährstoffarm sowie von feucht bis mäßig trocken.

Extrazonale Nordbaltische Buchenwälder (Nordbuchenwälder)

In Nordbrandenburg können die Nordbuchenwälder inselartig an lokalklimatisch kühl-feuchteren Stellen zur Ausbildung kommen. Das ist vor allem im Gebiet der Endmoränenzüge mit Erhebungen über 100 m Seehöhe sowie an Nordhanglagen bzw. luftkühlen Kerbtälern gegeben. Nordbuchenwälder vermitteln in ihrer Artenzusammensetzung und Wuchsleistung der Baumarten zu den Wäldern der montanen Höhenstufe des Hügel- und Berglandes. In der Vegetationszusammensetzung der Krautschicht treten Arten wie Waldschwingel (*Festuca altissima*), Zwiebelzahnwurz (*Cardamine bulbifera*), Europäischer Siebenstern (*Trifentalis europaea*) stärker in Erscheinung und können aspektbestimmend werden.



Abb. 4: Zwiebelzahnwurz-Bingelkraut-Buchenwald an einem Nordhang im NSG Fauler Ort (Nordbrandenburg)

Literatur:

BERTSCH, K. (1953): Geschichte des Deutschen Waldes. Vierte Auflage. Gustav Fischer Jena

BUNDESAMT FÜR NATURSCHUTZ (2010): Karte der Natürlichen Vegetation Deutschlands, M. 1 : 500 000, Legende. Bonn-Bad-Godesberg.

FIRBAS, F. (1949, 1952): Spät- und nacheiszeitliche Waldgeschichte von Mitteleuropa nördlich der Alpen. 1. Band: Allgemeine Waldgeschichte. 480 p., 2. Band: Waldgeschichte der einzelnen Landschaften. 256 p., Jena: Gustav-Fischer Verlag.

HESMER, H. (1933): Die natürliche Bestockung und die Waldentwicklung auf verschiedenartigen märkischen Standorten. Z. Forst. u. Jagdwes. 65, 505-561.

HOFMANN, G.; POMMER, U. (2013): Die Waldvegetation Nordostdeutschlands. Eberswalder Forstliche Schriftenreihe Bd. 54. Eberswalde/ Potsdam

KLINK, H.-J. (1998): Vegetationsgeographie. Das Geographische Seminar. Westermann Verlag Braunschweig, 3. Auflage

KLOSS, K. (1980): Pollenanalysen zur Vegetations-, Siedlungs- und Moorgeschichte am Südrand der mecklenburgisch-brandenburgischen Seenplatte (Kreis Gransee). Arch. Naturschutz u. Landschaftsforsch. 20, S. 203-212.

KOPP, D., SCHWANECKE, W. (1994): Standortlich-naturräumliche Grundlagen ökologiegerechter Forstwirtschaft, Berlin.

LANGE, E. (1971): Beitrag zur frühgeschichtlichen Vegetationsentwicklung im Flachland der DDR. Petermanns Geogr. Mitt. 115, 16-24.

LANGE, E. (1976): Zur Entwicklung der natürlichen und anthropogenen Vegetation in frühgeschichtlicher Zeit, Teil 1 u. 2. Feddes Repert. 87, 5-30, 367-442.

MÜLLER, H.-M. (1965): Übersicht über die spätglaziale Vegetationsentwicklung im küstenfernen ostdeutschen Diluvialgebiet, Naturwiss. 52, 16/17.

MÜLLER, H.-M. (1969): Die spätpleistozäne und holozäne Vegetationsentwicklung im östlichen Tieflandbereich der DDR zwischen nördlichem und südlichem Landrücken. Wiss. Abhandl. d. Geograph. Gesell. d. DDR 10, 155-165.

MÜLLER, H.-M. (1971): Untersuchungen zur holozänen Vegetationsentwicklung südlich von Berlin. Petermanns Geographische Mitteilungen, 115. Jg., H. 1, 37-45.

NOWEL, W.; BÖNISCH, R.; SCHNEIDER, W.; SCHULZE, H. (1995): Geologie des Lausitzer Braunkohlereviere. LAUBAG, LMBV, 2. Auflage

PFEIL, W. L. (1839): Die Forstgeschichte Preußens bis zum Jahre 1806. Leipzig.

SCAMONI, A. (1950): Natürliche Waldgesellschaft – Forstgesellschaft. Forstwirt. Holzwirt. 4, 17/18.

SCAMONI, A. (1950): Waldkundliche Untersuchungen auf grundwassernahen Talsanden. 156 Seiten, Berlin.

SCHOKNECHT, TH. (1993): Pollendiagramm Großes Postluch bei Spechthausen, in: SCHLAAK, N.: Studie zur Landschaftsgenese im Raum Nordbarnim und Eberswalder Urstomtal, Berliner Geographische Arbeiten Nr. 76, 143 S., Fachbereich Geographie der Humboldt Universität Berlin.

Der Vitalitätszustand der Rot-Buche in Brandenburg

Aline Wenning und Rainer Hentschel

Einleitung

Der Vitalitätszustand der Rot-Buche (*Fagus sylvatica* L.) hat sich in Folge der Sommertrockenheit der vergangenen Jahre drastisch verschlechtert (SCHULDT ET AL., 2020). Im Ergebnis der Waldzustandserhebung 2020 zeigten nur noch 11 % der Buchen in Deutschland keine Kronenverlichtung (BMEL, 2021). In Verbindung mit der Buchen-Vitalitätsschwäche (BRESSEM, 2008) kam es außerdem zu massiven Absterbeerscheinungen von Altbuchen (LANGER ET AL., 2020).

Die Zukunft der Buche muss einmal mehr im Lichte ihrer Trockenheitstoleranz und einer möglichen Verschiebung ihrer Verbreitungsareale diskutiert werden (vgl. AMMER ET AL., 2005; BOLTE, 2016; GESSLER ET AL., 2007; LEUSCHNER, 2020; RENNENBERG ET AL., 2004). Am LFE laufen entsprechende Arbeiten zur Anbaueignung der Buche in Brandenburg (s. Kapitel RIEK ET AL.) und der Anpassung neuer Waldentwicklungstypen (GRÜLL ET AL., 2020).

Im Jahr 2019 verzeichnete die Waldzustandserhebung einen drastischen Vitalitätseinbruch der Buche in Brandenburg (MLUK, 2020a) und auf einer Fläche von 1.253 ha wurden Absterbeerscheinungen gemeldet (MLUK, 2020b). Im darauffolgenden Jahr erhöhte sich die Fläche mit gemeldeten Absterbeerscheinungen der Buche auf 2.223 ha. Die Dunkelziffer dürfte jedoch weitaus höher sein, berücksichtigt man das vielerorts sichtbare Absterben der Oberkrone von Altbuchen. Unklar ist bisher, welche Ausmaße die Absterbeerscheinungen in den kommenden Jahren einnehmen werden und bis zu welchem Grad der Schädigung sich die Buchen wieder erholen können. Massive Kronenschäden, z.B. starke Kronenbrüche in Verbindung mit Pilzbefall, werden nur schwer zu überwinden sein. Entscheidend wird die Frage sein, wie groß die Löcher im Kronendach sein werden, die die absterbenden Bäume hinterlassen (nicht nur die Buche ist betroffen) und ob sich ein betroffener Bestand auflöst oder in einer neuen, struktureicheren Form überlebt.

Der Schadverlauf der Buche in Brandenburg (MÖLLER ET AL., 2020) deckt sich mit den Beobachtungen anderer Bundesländer und dem Krankheitsverlauf der Buchen-Vitalitätsschwäche (LANGER, 2019). Im Jahr 2019 wurde der frühzeitige Abwurf von noch z.T. grünem Laub beobachtet. Außerdem zeigten sich typische Trockenstresssymptome wie „Kleinblättrigkeit“, „Schiffchenbildung“ und „Krallenbildung“. Auch in

Brandenburg wurden bei betroffenen Buchen die mit der Buchen-Vitalitätsschwäche assoziierten Folgeschäden von Pilzen und rindenbrütenden Käfern durch den Waldschutz nachgewiesen (s. Kapitel WENNING & DAHMS und HIELSCHER). Im späteren Verlauf zeigten viele Buchen Zopfrocknis und ein Absterben ganzer Kronenpartien.

Neben der Einschätzung der Vitalitätsverluste der Buche in Brandenburg im Zuge der Waldzustandserhebung wird in dieser Untersuchung der Prozess des Absterbens von Buchen am Beispiel stark geschädigter Buchenbestände im Revier Breitefenn untersucht. Hierbei wurde geprüft, ob der Schadverlauf vorhersagbar ist und auch im unbelaubten Zustand eine Negativ-Auswahl geschädigter Buchen getroffen werden kann. Außerdem wurde die zu erwartende Mortalität in einem solch schwer geschädigten Bestand abgeschätzt.

Ergebnisse der Waldzustandserhebung zur Buche

Im Jahr 2020 erreichte die mittlere Kronenverlichtung der Buche im bundesweiten 16-x-16-km-Netz der Waldzustandserhebung (WZE) einen bisherigen Höchststand von 31,3 % (BMEL, 2021). In den meisten Bundesländern zeigten weit über 40 % der untersuchten Buchen eine deutliche Kronenverlichtung (Blattverlust > 25 %). Die schlechtesten Ergebnisse ergaben sich hierbei in Baden-Württemberg und Thüringen mit jeweils 68 %. In Brandenburg wurde im Jahr 2019 das bisher schlechteste Ergebnis mit einem Anteil deutlicher Schäden von 62 % erreicht (MLUK, 2020a).

Die seit Beginn der WZE im Jahr 1984 beobachtete Verschlechterung des Kronenzustandes der Buche (Abb. 10 in BMEL, 2021) wird zum eine durch die steigende Frequenz und Intensität von Mastjahren und zum andern durch das wiederholte Auftreten von Trockenheit erklärt (vgl. WZE-Berichte der Bundesländer). Aufgrund des hohen Energie- und Stoffbedarfs zur Fruchtbildung werden während einer Mast häufig kleinere Blätter und deutlich weniger Seitenverzweigungen ausgebildet, was sich negativ auf den Belaubungszustand auswirkt. Das Auftreten von Mastjahren der Buchen wird neben einer erhöhten Stickstoffversorgung der Bäume (BRESSEM, 2008) auch durch die Klimaerwärmung beeinflusst (ASCOLI ET AL., 2017). Als direkte Reaktion auf eine Trockenheit kann es zur Vergilbung von Blättern, der sogenannten „Schiffchenbildung“ oder einem frühzeitigen Blattabwurf kommen. Hierdurch ist es den Bäumen möglich die Transpira-

tion bzw. den Wasserverbrauch zu Kosten einer geringeren Photosyntheseleistung aufgrund geringer Blattmasse zu reduzieren. Hier zeigt sich der generelle Kosten-Nutzen-Konflikt von Bäumen zwischen dem Schutz des wasserleitenden Xylemgewebes und der Aufrechterhaltung des Stoffwechsels (ADAMS ET AL., 2017; GESSLER ET AL., 2018; McDOWELL, 2011).

In seinem Review über die Trockenstressreaktionen der Rot-Buche stellt Prof. Dr. Christoph Leuschner (2020) die große Blattfläche und das Feinwurzelsystem als besonders empfindlich gegenüber anhaltender Trockenheit heraus. Das hydraulische System der Rot-Buche ist durch eine effektive Stomatakontrolle (LEMOINE ET AL., 2002) gut geschützt und ein Absterben aufgrund von Kavitationen bei Altbuchen ist eher selten. Auch kann das Absterben aufgrund von Trockenheit über Jahre verzögert auftreten und einem andauernden Wachstumsrückgang folgen. Für das Überdauern anhaltender Trockenheit ist sowohl der interne Wasserspeicher (KÖRNER, 2019) als auch die Remobilisierung von gespeichertem Kohlenstoff (CHUSTE ET AL., 2020) von großer Bedeutung.

Um die Auswirkungen der Trockenheit auf den Gesundheitszustand der Buche untersuchen zu können bildet die WZE eine wichtige Datengrundlage. Allerdings ist festzustellen, dass aufgrund des geringen Flächenanteils der Buche in Brandenburg von 2,8 % im Oberstand (LFB, 2020) auch der Anteil in der systematischen WZE-Stichprobe entsprechend gering ausfällt. Aus diesem Grund wurde das Stichprobennetz für die Buche im Jahr 2019 auf 8-x-8-km verdichtet. Im Jahr 2021 wurde die WZE in Brandenburg dann insgesamt auf das 8-x-8-km-Netz umgestellt. Um räumlich differenzierte Aussagen über den Kronenzustand

der Buche in Brandenburg machen zu können, müsste das WZE-Stichprobennetz der Buche jedoch noch weiter verdichtet werden.

Da das Hauptvorkommen der Buche in Nord-Brandenburg liegt kann die Entwicklung des Kronenzustandes am ehesten mit den WZE-Ergebnissen aus Mecklenburg-Vorpommern verglichen werden (LM, 2020). Hier zeigt sich, dass trotz schwankender Stichprobenanzahl und unterschiedlichen Aufnahmeteams eine vergleichbare Entwicklung des Vitalitätszustandes der Buche im Rahmen der WZE dokumentiert werden konnte. In beiden Ländern wurde in den Jahren 2012 bis 2018 ein sehr guter Kronenzustand der Buche beobachtet. Im Jahr 2019 kam es dann zu einem drastischen Anstieg der mittleren Kronenverlichtung in Folge der Trockenheit 2018. Im Jahr 2019 kam es außerdem zu einer starken Fruchtbildung der Buchen in beiden Ländern was den extremen Anstieg des Blattverlustes mitbeeinflusste (vgl. LM, 2020). Diese verzögerte Trockenstressreaktion der Buche in Verbindung mit einer erhöhten Fruchtbildung konnte auf Bundesebene bereits in Folge des Trockenjahres 2003 beobachtet werden (SEIDLING, 2007). Im Jahr 2020 kam es zu keiner nennenswerten Fruktifikation und der mittlere Blattverlust der Buche sank auf 26 % in Brandenburg bzw. 23 % in Mecklenburg-Vorpommern. Im Jahr 2021 stieg die mittlere Kronenverlichtung der Buche in Brandenburg erneut leicht an. Der Anteil an Buchen mit deutlichen Schäden (Schadstufe 2-4) blieb jedoch mit 40 % mit den Ergebnissen des Vorjahres vergleichbar.

Aufgrund der anhaltenden Trockenheit von 2018 bis 2020 hat die Buche einen Teil der sonst großen Blattfläche verloren und es ist unklar, welche Auswirkungen sich für die Feinwurzelverteilung ergeben haben

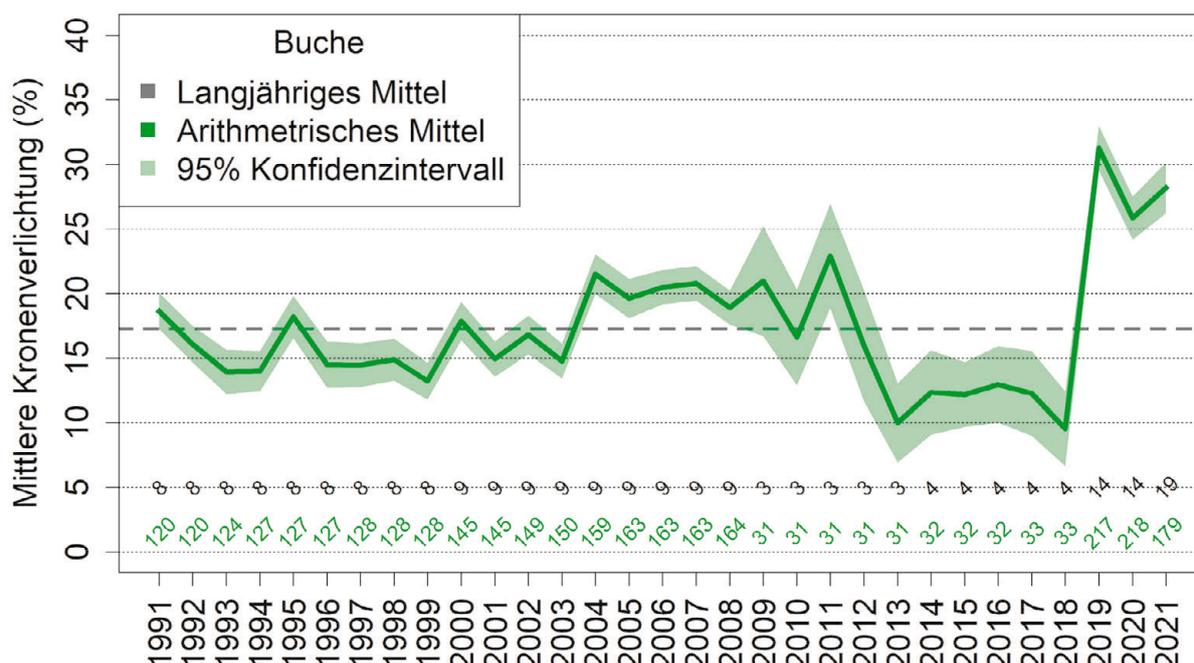


Abbildung 1: Mittlere Kronenverlichtung aller im Rahmen der WZE beurteilte Buchen in Brandenburg von 1991 bis 2020. Im unteren Teil sind die Anzahl der Probebäume (grün) und die Anzahl der Probeflächen mit Buche (schwarz) angegeben. Aufgrund der Netzumstellung in 2009 und der Netzverdichtung in 2019 kam es zu größeren Sprüngen im Stichprobenumfang.

(vgl. LEUSCHNER, 2020). Die nun kleineren Kronen bzw. Blattflächen verdunsten weniger Wasser, spenden aber auch weniger Schatten und schränken die Photosynthese ein. In Hinblick auf die Ausnutzung interner Baumspeicher und verzögerte Absterbeerscheinungen ist der Vitalitätszustand der Buche nach wie vor als kritisch anzusehen. Es bleibt abzuwarten, welche Individuen sich vollständig erholen können und welche Bestände sich aufgrund einer zu starken Schädigung über die nächsten Jahre auflösen werden. Die WZE bildet den generellen Trend des Gesundheitszustandes von Buchen dar, nicht aber die Schadentwicklung einzelner Bestände.

Absterbeerscheinung im Revier Breitefenn

Aufgrund der 2019 gemeldeten, massiven Schäden in Buchenbeständen im Revier Breitefenn der Landeswaldoberförsterei Chorin wurden drei Abteilungen eingehender untersucht (Abbildung 2). Zum einen sollte der Schadverlauf dokumentiert und mögliche Ursachen untersucht werden, zum anderen sollte geprüft werden inwieweit das Absterben von Altbuchen vorhergesagt bzw. anhand des äußeren Erscheinungsbildes eingeschätzt werden kann. Hierzu wurden insgesamt 90 Buchen in den Jahren 2020 und 2021 wiederholt begutachtet, Schäden dokumentiert und der Vitalitätszustand anhand von Feinreisigverteilung (Winteransprache), Austriebprozent (Frühjahrsansprache) und Kronenverlichtung (Sommeransprache) beurteilt.

Das Untersuchungsgebiet liegt in der Klimastufe *m* (mäßig trocken) im Großklimabereich des Nordostdeutschen Tieflandes. Der Bodentyp ist als Bänder sand-Braunerde (SoS) kartiert. Der Standort wird als grundwasserfern, nährstoffkräftig und mäßig frisch (*K2*) beschrieben. Wie im ganzen Land kam es in den Jahren 2018 bis 2020 zu hohen Wasserdefiziten, während es im Jahr 2021 zu ausgiebigen Niederschlägen kam.

Die untersuchten Teilflächen sind mit der Hauptbaumart Rot-Buche und der Nebenbaumart Trauben-Eiche bestockt. Im Unterstand ist eine flächige Buchen-Naturverjüngung vorhanden. Der Bestockungsgrad des Oberbestandes wird im DSW^2 mit 0,48, 0,70 und 1,05 angegeben. Das Alter der Buchen im Oberstand variiert zwischen 150 und 162 Jahren und einem Mitteldurchmesser von 52 bis 71 cm.

Für eine visuelle Einschätzung der Vitalität wurde sich an der Kronenansprache der WZE orientiert und ein entsprechender Boniturbereich der Krone ausgewählt (WELLBROCK ET AL., 2020). Anders als bei der Kronenansprache im Sommer, die aufgrund von durchgeführten Schulungen und der Verfügbarkeit von Vergleichsbildern (MEINING ET AL., 2007) als standardisiertes Aufnahmeverfahren anzusehen ist, erfolgt die Einschätzung des Feinreisigverlustes (Winteransprache) und des Austriebsverlustes (Sommeransprache) als gutachterliches Aufnahmeverfahren. Hierbei wurde anhand der

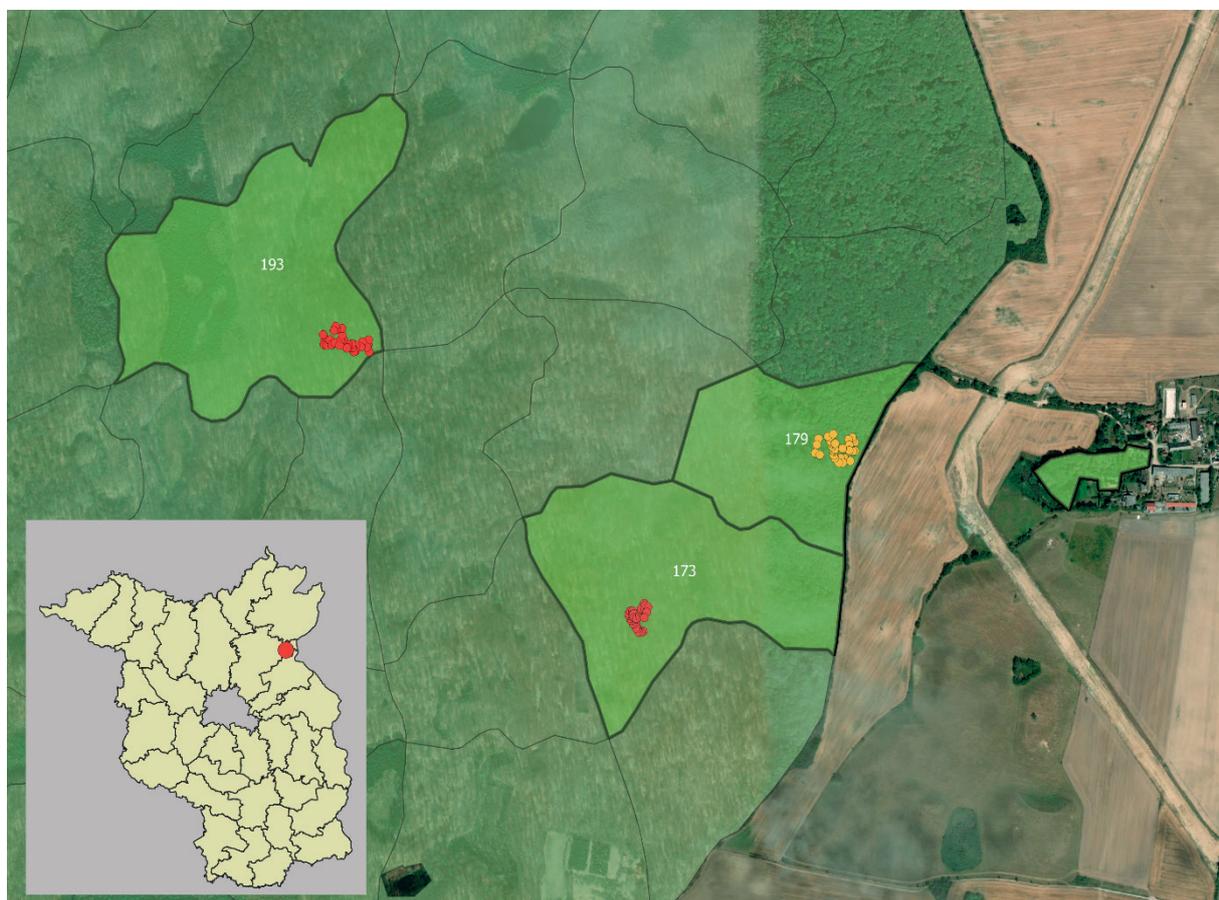


Abbildung 2: Untersuchungsgebiet im Revier Breitefenn

Kronenstruktur eine optimale Feinreisigverteilung und ein vollständiger Austrieb der Knospen unterstellt und die prozentuale Abweichung hierzu eingeschätzt.

Anders als bei der WZE wurden auch Bäume der Kraft'schen Klasse 4 in der Kronenansprache mitberücksichtigt. Diese werden im Rahmen der WZE aufgrund von Konkurrenz- und Beschattungseffekten nicht berücksichtigt. In dieser Untersuchung sollte jedoch geprüft werden, inwieweit insbesondere Altbuchen von einem starken Schadverlauf betroffen sind und unterständige Buchen potentiell geringere Vitalitätseinbußen aufweisen.

Neben der Schadansprache anhand von Feinreisig-, Austriebs- und Blattverlust (im Weiteren auch Winter-, Frühjahrs- und Sommeransprache genannt) wurden außerdem im Winter Schadklassen der Bäume eingeschätzt. Hierbei wurde ausgehend von möglichen Schäden der Kronenstruktur und anderen Schadmerkmalen (z.B. Schleimfluss) eine gutachterliche Einschätzung des Vitalitätszustandes der Buchen vorgenommen (im Weiteren Gesamtansprache genannt). Konnten keine oder nur wenigen Schadmerkmale beobachtet werden, wurde die Schadklasse „ohne“ oder „leicht“ vergeben. Waren deutliche Strukturschäden der Krone und/oder stark ausgeprägte Schadmerkmale erkennbar, beispielsweise das Vorhandensein von starken Totästen (Durchmesser > 10 cm), wurde die Schadklasse „mittel“ vergeben. Beim Zusammentreffen mehrerer Schadmerkmale und dem Erkennen eines akuten Absterbeprozesses wurde die Schadklasse „stark“ vergeben.

Tabelle 2: Definition der Schadstufen von Winter-, Frühjahrs- und Sommeransprache

Schadstufe	Verlustprozente	Bezeichnung
0	0 – 10 %	ohne
1	11 – 25 %	leicht
2	26 – 60 %	mittel
3	61 – 99 %	stark
4	100 %	ganz

Um die Ergebnisse der Winter-, Frühjahrs- und Sommeransprache einordnen zu können wurden diese ebenfalls in Schadklassen übersetzt. Hierbei wurden die Klassengrenzen der WZE bzw. der Sommeransprache übernommen (Tabelle 2). Die Schadklasse „ganz“ umfasst stehend tote, aufgrund extremer Schädigung entnommene und aufgrund von Kronenbrüchen über 50 % nicht bonitierbare Bäume zusammen.

Unabhängig von der Schadklasse wurde für jeden Baum eine separate Schadansprache durchgeführt. Hierbei wurde insbesondere auf das Vorhandensein von Schadmerkmalen wie Blattvergilbung, Krallenbildung oder Schleimfluss geprüft. Ein weiteres Augenmerk galt dem Auftreten von Pilzen und hier insbesondere dem Münzenförmigen Rindenkugelpilz (*Biscogniauxia nummularia*), dem Scharlachroten Pustelpilzchen (*Neonectria coccinea*), der Vierfrüchtigen Quaternaria (*Eutypella quaternata*) und dem Gemeinen Spaltblättling (*Schizophyllum commune*). Außerdem wurden die Buchen auf Anzeichen von

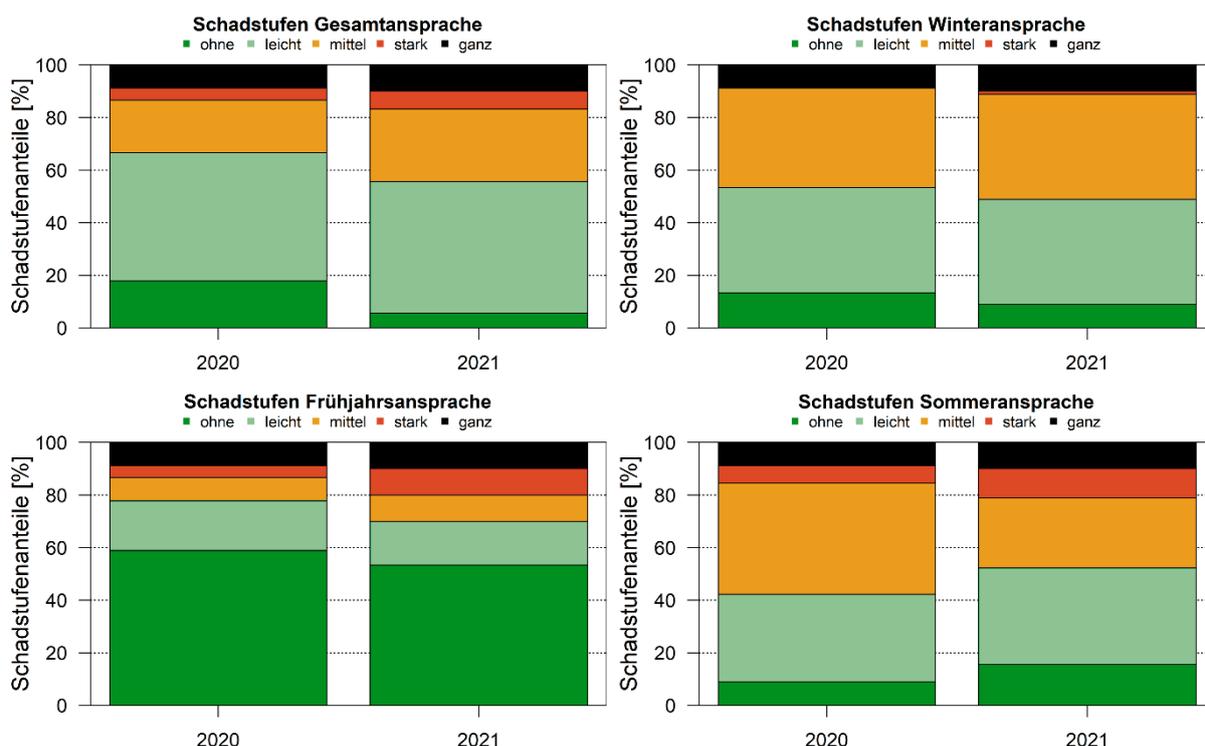


Abbildung 3: Schadstufenanteile der gutachterlichen Einschätzung im Winter (Gesamtansprache), nach Feinreisigverlust (Winteransprache), nach Austriebsverlust (Frühjahrsansprache) und nach Blattverlust (Sommeransprache).

Käferbefall geprüft, hier insbesondere von Buchenprachtkäfer (*Agrilus viridis* L.) und Kleiner Buchenborckenkäfer (*Taphrorychus bicolor*) (s. Kapitel WENNING & DAHMS).

In Anlehnung an die WZE geben die Schadstufenanteile innerhalb der Stichprobe Auskunft darüber, wieviel Prozent des Waldes geschädigt ist (Abbildung 3). Eine Schädigung liegt dann vor, wenn Verlustprozente von mehr als 25 % beobachtet oder ein mittlerer bis starker Schaden gutachterlich eingeschätzt wurde. Da sich die drei untersuchten Buchenbestände augenscheinlich nicht in Ihrem Schadverlauf unterschieden und sowohl in den Standortseigenschaften als auch den Bestandesstrukturen vergleichbar sind, wurden die Schadanteile insgesamt auf das Untersuchungsgebiet bezogen.

Im Zeitraum von 2019 bis 2021 waren 10 % der Buchen ausgefallen (Schadstufe „ganz“). Diese Bäume wurden aufgrund extremer Schäden entnommen oder waren aufgrund von Kronenbrüchen nicht länger bonitierbar. Tatsächlich abgestorben ist bisher kein Probestaum. Der Anteil an starken Schäden hat jedoch weiter zugenommen.

Die gutachterliche Einschätzung der Gesamtansprache im Winter zeigt eine Zunahme geschädigter Buchen vom 33 % auf 44 %. Der Anteil an Bäumen ohne Schäden ist auf 6 % zurückgegangen. In der Sommeransprache zeigt sich ein gegenläufiges Bild, hier ist der Anteil geschädigter Buchen von 58 % auf 48 % zurückgegangen. Hierbei hat sowohl der Anteil starker Schäden als auch der Anteil ohne Schäden im Jahr 2021 zugenommen.

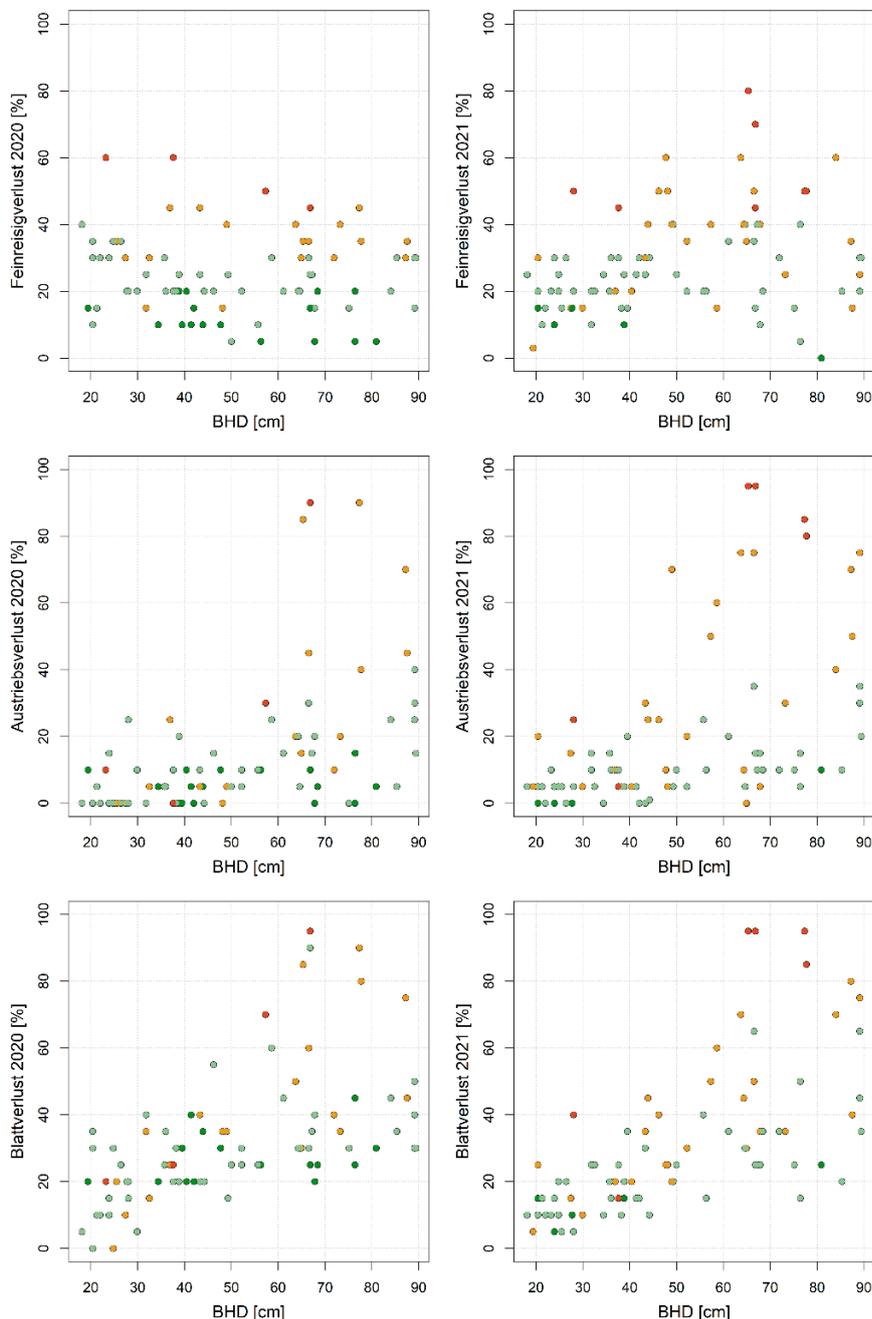


Abbildung 4: Ergebnisse der Winter- (oben), Frühjahrs- (Mitte) und Sommeransprache (unten) über dem Brusthöhen-durchmesser der Probebäume (BHD). Farblich dargestellt sind die Schadstufen der gutachterlichen Einschätzung im unbeblauten Zustand (0 = hellgrün; 1 = grün; 2 = orange; 3 = rot).

Die Winteransprache folgt im Trend der Gesamtansprache, allerdings wurden starke Schäden (Feinreisigverlust über 60 %) nur bei zwei Bäumen im Jahr 2021 beobachtet. Bezogen auf den Feinreisigverlust werden ca. 50 % der beobachteten Buchen als geschädigt beurteilt. Ein gegenläufiges Bild zeigt sich bei der Frühjahrsansprache und bezogen auf den Austriebsverlust sind über 50 % der Bäume ohne Schäden. Im Jahr 2021 zeigten 10 % der Bäume mittlere Schäden, 10 % der Bäume zeigten starke Schäden und 10 % der Bäume waren ausgefallen.

In Abbildung 4 wurden die Ergebnisse der Winter-, Frühjahrs- und Sommeransprache über den Brusthöhendurchmesser der Probestämme aufgetragen und farblich entsprechend der Gesamtansprache dargestellt. Die Ergebnisse der Winteransprache zeigen, dass die gutachterliche Einschätzung des Vitalitätszustandes im Winter durch die Einschätzung der Feinreisigverluste geprägt ist. Stark geschädigte Bäume wiesen hier einen Feinreisigverlust von über 40 % auf. Mittlere Schäden wurden in 2020 zumeist ab einem Feinreisigverlust ab 30 % angenommen, wobei die Zuordnung im Jahr 2021 weniger eindeutig war. Ein Zusammenhang zwischen der Schadansprache im Winter und dem BHD der Probestämme ist nicht zu erkennen.

Bei den Ergebnissen der Frühjahrsansprache zeigt sich, dass höhere Austriebsverluste (> 40 %) überwiegend bei Bäumen mit einem BHD über 50 cm beobachtet wurden. Eine Zuordnung der gutachterlichen Schadstufeneinordnungen ist nicht ohne weiteres möglich, da auch Probestämme mit vollem Blattaustrieb im Winter als mittel oder stark geschädigt eingeschätzt wurden. Allerdings zeigt sich, dass Probestämme mit Austriebsverlusten über 40 % auch im Winter als mittel oder stark geschädigt angesprochen wurden.

In der Sommeransprache zeigt sich ein ähnliches Bild und eine Zuordnung der gutachterlichen Schadstufeneinordnungen ist nicht ohne weiteres möglich. Allerdings wurden auch hier die Probestämme mit hohen Blattverlusten bereits im Winter überwiegend als mittel oder stark geschädigt angesprochen. Außerdem zeigt sich eine klare Abhängigkeit von BHD und Blattverlust und eine Kronenverlichtung von über 40 % wurde vorwiegend bei Bäumen mit einem BHD über 50 cm beobachtet.

Um die Beziehung zwischen der durchgeführten Winter-, Frühjahrs- und Sommeransprache darzustellen wurden der Feinreisigverlust und der Austriebsverlust der Jahre 2020 und 2021 dem Blattverlust gegenübergestellt (Abbildung 5). Hierbei zeigt sich ein relativ schwacher Zusammenhang des winterlichen Feinreisigverlustes und dem sommerlichen Blattverlust ($R^2 = 0,19$). Der Zusammenhang zwischen Blattaustrieb und Kronenverlichtung war deutlich stärker ($R^2 = 0,68$). Nur wenn im Frühjahr Austriebsverluste von über 20 % beobachtet wurden, wurden im Sommer auch starke Schäden (Blattverlust > 60 %) beobachtet.

In der Schadansprache (Abbildung 6) zeigte sich, dass die Vergilbung der Krone im Jahr 2020 stärker ausgeprägt war als im Jahr 2021. Bei der Krallenbildung der Terminaltriebe zeigte sich ein gegenteiliger Trend und im Jahr 2021 zeigten über 40 % der Probestämme diese Triebanomalie. Andere Schadmerkmale zeigten sich vor allem im Jahr 2021. Hier wurden bei knapp 20 % der Probestämme Anzeichen von Pilzen festgestellt. Die Anzeichen von Insekten und Schleimfluss waren nur in geringem Maße festzustellen.

Um die Absterbeerscheinungen besser charakterisieren zu können wurden Kronenschäden im Jahr 2021

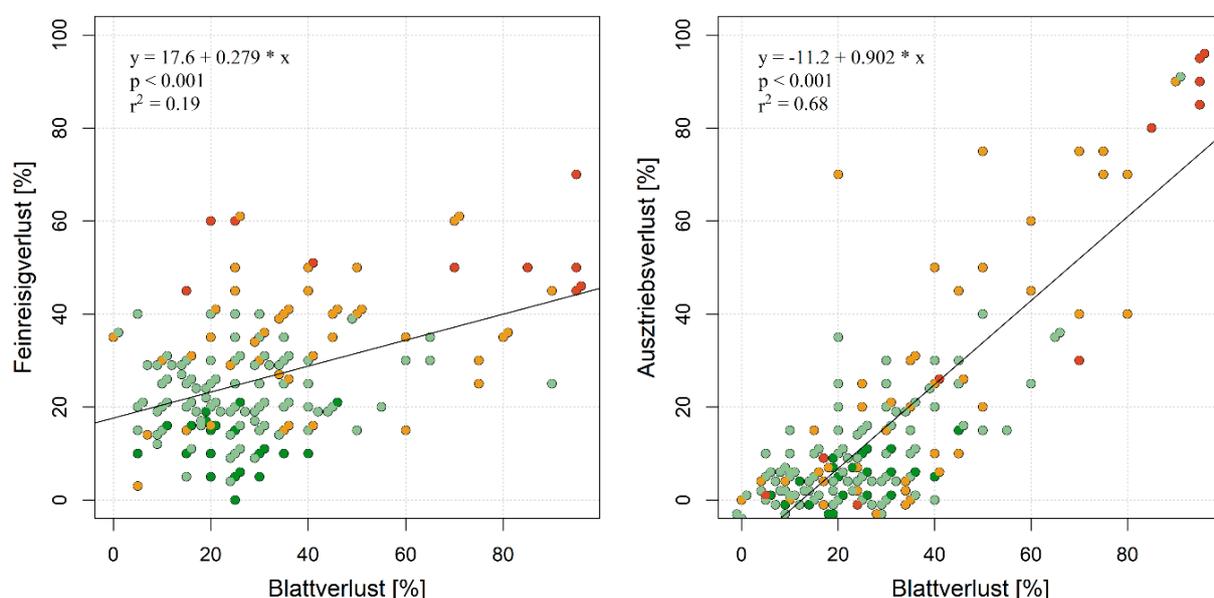


Abbildung 5: Streudiagramm und Ausgleichsgerade von Feinreisigverlust (links) und Austriebsverlust (rechts) über Blattverlust der Jahre 2020 und 2021. Für die grafische Darstellung wurden bei Überlappung die diskreten Wertepaare um +/- 1 %-Punkt in x/y-Richtung versetzt, weshalb negative Austriebsverluste dargestellt sein können. Farblich kodiert sind die Schadstufen der gutachterlichen Einschätzung im unbelaubten Zustand (0 = hellgrün; 1 = grün; 2 = orange; 3 = rot).

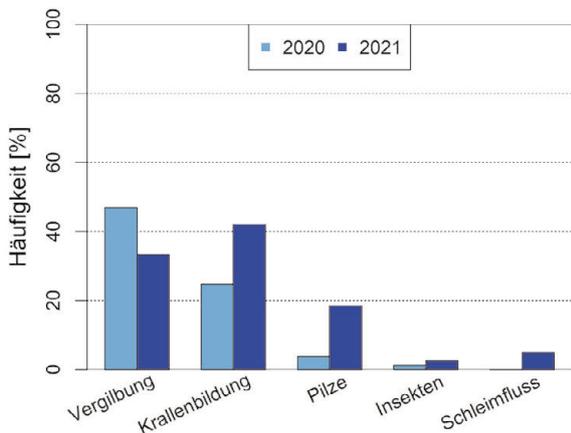


Abbildung 6: Schadansprache in den Jahren 2020 und 2021.

insgesamt und anteilig für deutlich geschädigte Bäume (Blattverlust > 25 %) und stark geschädigte Bäume (Blattverlust > 60 %) dargestellt. Insgesamt wiesen ca. 40 % der untersuchten Buchen Trockenäste auf. Bei den deutlich geschädigten Buchen waren es fast 80 % und alle stark geschädigten Buchen trugen Totäste. Bei ca. 12 % der Probestämme wurden Rindenablösungen in der Krone beobachtet und ca. bei 14 % der Probestämme war eine Zopftrocknis bzw. ein Absterben der Oberkrone zu beobachten. Bezogen auf die deutlich geschädigten Buchen waren es 24 % bzw. 32 %, bezogen auf die stark geschädigten Buchen sogar 40 % bzw. 60 %.

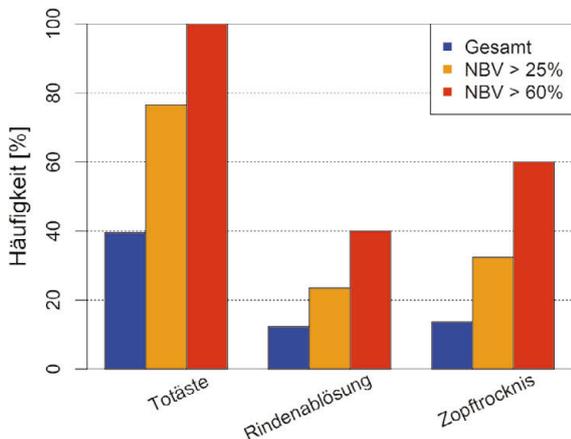


Abbildung 7: Anteile mit Schäden der Kronenstruktur im Jahr 2021 der gesamten Stichprobe (n = 81) und von Buchen mit Blattverlust > 25 % und > 60 %.

Diskussion

Spätestens seit dem Jahrhundertsommer 2003 ist klar, dass auch die Buche trotz ihrer weiten Standortsamplitude und hohen Konkurrenzkraft gegenüber anderen Baumarten von den Auswirkungen des Klimawandels gefährdet ist (GESSLER ET AL., 2007). Das extreme Trockenjahr 2018 hat dieses mehr als deutlich gemacht, wobei nicht nur die Buche sondern auch andere Baumarten von Absterbeerscheinungen betroffen waren (SCHULDT ET AL., 2020).

Typisch für die Buche ist eine verzögerte Trockenstressreaktion, da kürzere Dürreperioden durch interne Wasserreserven kompensiert werden können (BETSCH ET AL., 2011). Hierdurch ist auch der drastische Anstieg der Kronenverlichtung im Jahr 2019 zu erklären (Abbildung 1), da die internen Wasserreserven mutmaßlich aufgebraucht waren, als eine erneute Trockenheit folgte. Dieser Umstand wiederholte sich im Jahr 2020 und führte zu Absterbeerscheinungen von Buchen auf einer Fläche von mindestens 2.223 ha in Brandenburg (Meldungen im Waldschutzmeldewesen des LFB).

Bisher konnte keine abschließende Untersuchung darüber durchgeführt werden, welche prädisponierenden Standortbedingungen, Bestandesstrukturen und Baumigenschaften den Vitalitätsverlust der Buche in Brandenburg prägen. Hinlänglich bekannt und naheliegend ist jedoch, dass flachgründige Böden die Auswirkungen von Niederschlagsdefiziten verstärken (LEUSCHNER, 2020). Tatsächlich sind etwa zwei Drittel der Feinwurzelbiomasse von Buchen in den oberen 30 cm des Mineralbodens anzufinden und einer Anpassung des Wurzelsystems der Buche an trockenere Standortbedingungen wird eine eher geringe Bedeutung beigemessen (MEIER ET AL., 2018). Außerdem sind südexponierte Hanglagen, gut drainierende Böden und plötzliche Freistellung im Zuge von starken Durchforstungen oder Windwürfen als prädisponierende Faktoren für in jüngster Vergangenheit beobachtete Absterbeerscheinungen der Buche anzusehen (LANGER ET AL., 2020). Insbesondere Altbuchen sind von der Buchen-Vitalitätsschwäche betroffen, was sich mit den Beobachtungen im Revier Breitefenn deckt (Abbildung 4).

Die Buchen-Vitalitätsschwäche zeichnet sich durch eine schütterere Belaubung und Absterbeerscheinungen in der Oberkrone aus (LANGER, 2019). Während im Rahmen der WZE ein signifikanter Vitalitätsverlust anhand einer starken Kronenverlichtung nachgewiesen werden kann, lassen sich Absterbeerscheinungen nur relativ schlecht dokumentieren. Auf Bundesebene wurde zwar bereits in den Jahren 2019 und 2020 ein Anstieg der jährlichen Absterberate registriert (BMEL, 2021), in Brandenburg sind jedoch noch keine Buchen aus dem Stichprobenkollektiv der WZE abgestorben. Letzteres steht im Widerspruch zu den massiven Absterbeerscheinungen die von verschiedenen Forstrevieren in Brandenburg gemeldet (MLUK, 2020b) und vielerorts beobachtet wurden. Da sich das Absterben von Buchen mitunter über Jahrzehnte hinziehen kann (LEUSCHNER, 2020) ist die im Rahmen der WZE-Stichproben ermittelte jährliche Absterberate nur bedingt aussagekräftig. Hier sollte eher der Anteil an Buchen mit starken Schäden (Blattverlust > 60 %) betrachtet werden, um das Ausmaß der Absterbeerscheinungen zu erfassen. Nach 2018 zeigten 2-3 % der Buchen starke Schäden (MLUK, 2020a).

In den stark geschädigten Untersuchungsbeständen in Breitefenn sind bisher noch keine Buchen bzw. Probestämme abgestorben. Insgesamt wurden allerdings fünf absterbende Buchen (Zopftrocknis) entnommen und vier Buchen sind aufgrund eines Kronenbruchs von

über 50 % ausgefallen. Schließt man des Weiteren die 14 stehenden Buchen mit Zopftrocknis in die Abgänge mit ein, ergibt sich eine trockenheitsbedingten Ausfallrate von 25,5 % im Untersuchungsgebiet (Abbildung 2). Bezogen auf das etablierte Vitalitätsmaß der WZE-Kronenlichtung (Sommeransprache) sind neben den bereits ausgeschiedenen Bäumen etwa 11 % der Buchen stark geschädigt und weitere 27 % deutlich geschädigt. Hiervon tragen 100 % bzw. 77 % Totäste (Abbildung 7) was den Eindruck eines sich auflösenden Bestandes verstärkt (Abbildung 8).

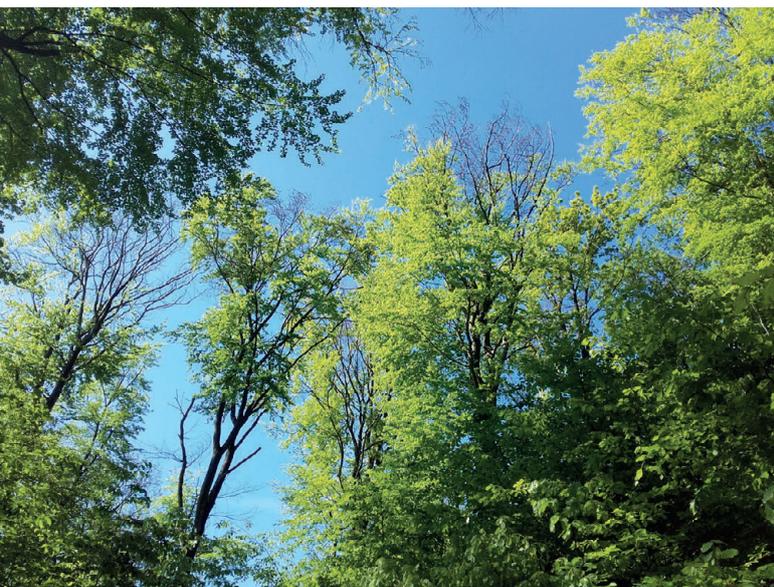


Abbildung 8: Buchen mit starker Kronenverlichtung und Zopftrocknis.

Unabhängig von forstlichen Eingriffen, Sanitärhieben und Maßnahmen zur Verkehrssicherheit kann in stark geschädigten Buchenbeständen eine sich selbst verstärkende Trockenstressprädisposition angenommen werden. Auch wenn je nach Standort und Waldzustand forstliche Eingriffe durchaus einen positiven Effekt auf die Trockenheitstoleranz von Buchen haben können (CHUSTE ET AL., 2020), ist die plötzliche Freistellung durch das Absterben der Oberkronen der Altbuchen für die Gefährdung des verbleibenden Bestandes kritisch zu sehen. Hier sind Folgeschäden wie beispielsweise der Befall vom Buchenprachtkäfer (BRÜCK-DYCKHOFF ET AL., 2019) oder dem kleinen Buchenborkenkäfer (LANGER, 2019) besonders bedenklich. Hinzu kommen die Nachweise verschiedener Pilze, die auch in Brandenburg im Zuge der Buchen-Vitalitätsschwächung ihren Wirt gefunden haben (MLUK, 2020b). Daher ist es von größter Bedeutung den Vitalitätszustand von Buchenbeständen korrekt einzuschätzen und die planmäßige Nutzung entsprechend anzupassen, wenn der Abgang weiterer Bestandesmitglieder aufgrund von Vorschädigungen zu erwarten ist.

Während der Blattverlust der Buchen ein Jahr nach der Trockenheit 2018 einen deutlichen Vitalitätsverlust am stehendem Baum anzeigte, waren Anzeichen von Pilzen erst drei Jahre später erkennbar und Anzeichen von Insekten wurden nur in Einzelfällen nachgewiesen (Abbildung 6). Es ist aber davon auszugehen, dass

die tatsächliche Infektionsrate wesentlich höher liegt und die terrestrische Schadansprache (mit Fernglas) unvollständig ist. Bisher treten die biotischen Schäden als Folgeschäden auf und leiten die Zersetzungsphase der geschädigten Buchen ein. Ob diese beiden Arten aufgrund der Vielzahl geschwächter Buchen und die dadurch guten Vermehrungsmöglichkeiten ausreichend hohe Populationsdichten aufbauen können, um auch primäre Schäden zu verursachen, bleibt abzuwarten. Sollte sich in Zukunft der Trend zu größerer Trockenheit und höheren Temperaturen fortsetzen, ist mit einer Ausweitung dieser Problematik zu rechnen.

Aufgrund der verzögerten Trockenstressreaktion der Buche ist es schwierig den Vitalitätszustand der Buchen korrekt einzuschätzen. Im Sommer kann die Kronenverlichtung als etabliertes Vitalitätsmaß der WZE genutzt werden, wobei hier nur die noch vorhandene Krone berücksichtigt wird und der aktuelle Gesundheitszustand eines Baumes widerspiegelt wird. Kronenschäden der Vergangenheit werden hier weitgehend ausgeblendet. Daher ist es auch nicht gelungen, anhand des Winterzustandes den Gesundheitszustand der Buchen im Sommer vorherzusagen. Einige Buchen die im unbelaubten Zustand als stark geschädigt eingeschätzt wurden, zeigten in der Sommeransprache einen nur geringen Blattverlust der verbleibenden Krone (Abbildung 4). Entsprechend ist das Bestimmtheitsmaß des Zusammenhanges von Feinreisigverlust im Winter als prägendes Erscheinungsbild und Blattverlust im Sommer als Ausdruck der Vitalitätsreduktion relativ gering (Abbildung 5; links). Anhand des Blattaustriebes hingegen können stark geschädigte Buchen recht gut identifiziert werden (Abbildung 5; rechts).

Die Frage wie stark ein Buchenbestand geschädigt ist, kann nur Vorort eingeschätzt werden. Unabhängig vom Erscheinungsbild im Winter sollte der Belaubungszustand und das Vorhandensein sichtbarer Schäden zur Einschätzung der Bestandesgesundheit genutzt werden. Die WZE kann dazu beitragen, die Regenerationsrate deutlich und stark geschädigter Buchen einzuschätzen und auf den Bestand zu übertragen. In der WZE Bund-Länder-Arbeitsgruppe wurde sich außerdem darauf verständigt die Schadansprache neben der Einschätzung der Kronenverlichtung verstärkt in die jährlich stattfindenden Schulungen aufzunehmen. Hierdurch können weitere Schadmerkmale, wie beispielsweise die Krallenbildung (Abbildung 6), mit den Absterbeerscheinungen in Beziehung gesetzt werden und zur Vorhersage des Schadverlaufes genutzt werden. Außerdem wird der Zeitpunkt der Erhebungen diskutiert, um Trockenstressreaktionen besser detektieren zu können (ROHNER ET AL., 2021).

Abgesehen von der WZE ist es sehr schwierig, die Vitalität der Buche flächenrepräsentativ einzuschätzen. Die Betrachtungsebene und Auswertungsmöglichkeit hängt hierbei jedoch stark vom Stichprobenumfang bzw. der Maschenweite des Stichprobennetzes ab. Neben bestehenden Ansätzen der räumlich-zeitlichen Modellierung der Kronenverlichtung (AUGUSTIN ET AL., 2009; EICKENSCHIEDT ET AL., 2019) bietet die Fernerkundung Ansätze das Schädgeschehen flächendeckend

abzubilden (MARUSIG ET AL., 2020; RAO ET AL., 2019). Hierbei ist allerdings zu berücksichtigen, dass sich diese Ansätze noch in der Entwicklung befinden und jeder Algorithmus nur so gut wie sein Trainingsdatensatz ist. Die WZE liefert hierfür die benötigten terrestrischen Erhebungen, um die Entwicklung flächenscharfer und baumartenspezifischer Schadensvorhersagen zu unterstützen. Hierbei ist es wichtig eine gesamtheitliche, länderübergreifende Datengrundlage zu schaffen und terrestrische Erhebungen, Meldungen von Waldbesitzern und Modellergebnisse zusammenzuführen.

Fazit

Die auf die Trockenheit der Jahre 2018 bis 2020 zurückzuführende Schädigung der Buche und die hiermit verbundenen Absterberscheinungen werden sich noch über mehrere Jahre hinziehen. Die Anzahl an Kronenbrüchen wird sich häufen, wobei stark geschädigte Buchen möglicherweise noch sehr lange überleben können. Ob stark geschädigte Buchen im Zuge von Sanitärarbeiten oder zur Holznutzung entnommen werden sollten, muss im Zuge der Vitalitätseinschätzung des verbleibenden Bestandes entschieden werden. Starke Eingriffe bzw. Auflichtungen sind unbedingt zu vermeiden.

Im unbelaubten Zustand ist es kaum möglich den Schadverlauf der Buchen-Vitalitätsschwäche einzuschätzen. Im Sommerzustand deutet eine volle Belaubung auf einen guten Vitalitätszustand hin, allerdings bleibt abzuwarten ob bei massiven Kronenschäden, und entsprechenden Eintrittspforten für Schadorganismen, eine vollständige Revitalisierung möglich ist. In einigen Gebieten werden sich Buchenbestände auflösen und mehr oder weniger große Löcher im Kronendach des verbleibenden Bestandes hinterlassen. Anhand der Mortalitätsraten wird sich zeigen wo die Buche eine Zukunft als Hauptbaumart hat und wo ihre dominierende Stellung im Klimawandel schwindet.

Literatur

- ADAMS, H.D., ZEPPEL, M.J.B., ANDEREGG, W.R.L., HARTMANN, H., LANDHÄUSSER, S.M., TISSUE, D.T., HUXMAN, T.E., HUDSON, P.J., FRANZ, T.E., ALLEN, C.D., ANDEREGG, L.D.L., BARRON-GAFFORD, G.A., BEERLING, D.J., BRESHEARS, D.D., BRODRIBB, T.J., BUGMANN, H., COBB, R.C., COLLINS, A.D., DICKMAN, L.T., DUAN, H., EWERS, B.E., GALIANO, L., GALVEZ, D.A., GARCIA-FORNER, N., GAYLORD, M.L., GERMINO, M.J., GESSLER, A., HACKE, U.G., HAKAMADA, R., HECTOR, A., JENKINS, M.W., KANE, J.M., KOLB, T.E., LAW, D.J., LEWIS, J.D., LIMOUSIN, J.M., LOVE, D.M., MACALADY, A.K., MARTÍNEZ-VILALTA, J., MENCUCCINI, M., MITCHELL, P.J., MUSS, J.D., O'BRIEN, M.J., O'GRADY, A.P., PANGLE, R.E., PINKARD, E.A., PIPER, F.I., PLAUT, J.A., POCKMAN, W.T., QUIRK, J., REINHARDT, K., RIPULLONE, F., RYAN, M.G., SALA, A., SEVANTO, S., SPERRY, J.S., VARGAS, R., VENNETIER, M., WAY, D.A., XU, C., YEPEZ, E.A., McDOWELL, N.G., 2017. A multi-species synthesis of physiological mechanisms in drought-induced tree mortality. *Nat. Ecol. Evol.* 1, 1285–1291. <https://doi.org/10.1038/s41559-017-0248-x>
- AMMER, C., ALBRECHT, L., BORCHERT, H., BROSINGER, F., DITTMAR, C., ELLING, W., EWALD, J., FELBERMEIER, B., VON GILSA, H., HUSS, J., KENK, G., KÖLLING, C., KOHNLE, U., MEYER, P., MOSANDL, R., MOSSAMAYER, H.-U., PALMER, S., REIF, A., REHFUESS, K.-E., STIMM, B., 2005. Zur Zukunft der Buche (*Fagus sylvatica* L.) in Mitteleuropa – kritische Anmerkungen zu einem Beitrag von RENNENBERG ET AL.(2004). *Allg. Forst- u. J.-Ztg* 176, 60–67.
- ASCOLI, D., VACCHIANO, G., TURCO, M., CONEDERA, M., DROBYSHEV, I., MARINGER, J., MOTTA, R., HACKET-PAIN, A., 2017. Inter-annual and decadal changes in teleconnections drive continental-scale synchronization of tree reproduction. *Nat. Commun.* 8, 1–9. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02348-9>
- AUGUSTIN, N.H., MUSIO, M., VON WILPERT, K., KUBLIN, E., WOOD, S.N., SCHUMACHER, M., 2009. Modeling spatiotemporal forest health monitoring data. *J. Am. Stat. Assoc.* 104, 899–911. <https://doi.org/10.1198/jasa.2009.ap07058>
- BETSCH, P., BONAL, D., BREDÁ, N., MONTPIED, P., PEIFFER, M., TUZET, A., GRANIER, A., 2011. Drought effects on water relations in beech: The contribution of exchangeable water reservoirs. *Agric. For. Meteorol.* 151, 531–543. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2010.12.008>
- BMEL, 2021. Ergebnisse der Waldzustandserhebung 2020. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) Referat 515 – Nachhaltige Waldbewirtschaftung, Bonn.
- BOLTE, A., 2016. Chancen und Risiko der Buche im Klimawandel. *AFZ - Der Wald* 12, 17–19.
- BRESSEM, U., 2008. Komplexe Erkrankungen an Buche., in: *Ergebnisse Angewandter Forschung Zur Buche*. Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt, Universitätsdrucke, Göttingen, pp. 101–121.
- BRÜCK-DYCKHOFF, C., PETERCORD, R., SCHOPF, R., 2019. Vitality loss of European beech (*Fagus sylvatica* L.) and infestation by the European beech splendour beetle (*Agilus viridis* L., Buprestidae, Coleoptera). *For. Ecol. Manage.* 432, 150–156. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.09.001>
- CHUSTE, P.A., MAILLARD, P., BRÉDA, N., LEVILLAIN, J., THIRION, E., WORTEMANN, R., MASSONNET, C., 2020. Sacrificing growth and maintaining a dynamic carbohydrate storage are key processes for promoting beech survival under prolonged drought conditions. *Trees - Struct. Funct.* 34, 381–394. <https://doi.org/10.1007/s00468-019-01923-5>
- EICKENSCHIEDT, 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. *IForest* 12, 338–348. <https://doi.org/10.3832/ifor2932-012>

- GESSLER, A., CAILLERET, M., JOSEPH, J., SCHÖNBECK, L., SCHAUB, M., LEHMANN, M., TREYDTE, K., RIGLING, A., TIMOFFEEVA, G., SAURER, M., 2018. Drought induced tree mortality - a tree-ring isotope based conceptual model to assess mechanisms and predispositions. *New Phytol.* <https://doi.org/10.1111/nph.15154>
- GESSLER, A., KEITEL, C., KREUZWIESER, J., MATYSSEK, R., SEILER, W., RENNENBERG, H., 2007. Potential risks for European beech (*Fagus sylvatica* L.) in changing climate. *Trees* 21, 1–11. <https://doi.org/10.1007/s00468-006-0107-x>
- GRÜLL, M., DEGENHARDT, A., KEIL, D., KINDERMANN, T., MEISSNER, R., 2020. WUP: Zahlen und Karten zum Waldumbaupotenzial, in: LFE (Ed.), *Wald Im Wandel – Risiken Und Lösungsansätze - Eberswalder Forstliche Schriftenreihe Band 69*. Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Klimaschutz des Landes Brandenburg/Landesbetrieb Forst Brandenburg (MLUK), pp. 39–48.
- KÖRNER, C., 2019. No need for pipes when the well is dry—a comment on hydraulic failure in trees. *Tree Physiol.* 39, 695–700. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpz030>
- LANGER, G.J., 2019. Komplexe Erkrankungen bei älteren Rotbuchen. *AFZ - Der Wald* 24, 30–33.
- LANGER, G.J., BUSSKAMP, J., LANGER, E.J., 2020. Absterbeerscheinungen bei Rotbuche durch Trockenheit und Wärme. *AFZ Der Wald* 75, 24–27.
- LEMOINE, D., COCHARD, H., GRANIER, A., 2002. Within crown variation in hydraulic architecture in beech (*Fagus sylvatica* L.): evidence for a stomatal control of xylem embolism. *Ann. For. Sci.* 59, 19–27. <https://doi.org/10.1051/forest>
- LEUSCHNER, C., 2020. Drought response of European beech (*Fagus sylvatica* L.)—A review. *Perspect. Plant Ecol. Evol. Syst.* 47, 125576. <https://doi.org/10.1016/j.ppees.2020.125576>
- LFB, 2020. Geschäftsbericht 2019 Landesbetrieb Forst Brandenburg - Auszug der vielfältigen Arbeit des Landesbetriebes Forst Brandenburg. Landesbetrieb Forst Brandenburg (LFB), Potsdam.
- LM, 2020. Waldzustandsbericht 2020 - Ergebnisse der Waldzustandserhebung, Ministerium für Landwirtschaft und Umwelt Mecklenburg-Vorpommern. Ministerium für Landwirtschaft und Umwelt Mecklenburg-Vorpommern (LM), Referat 240 (Waldbau), Schwerin.
- MARUSIG, D., PETRUZZELLIS, F., TOMASELLA, M., NAPOLITANO, R., ALTABELLI, A., NARDINI, A., 2020. Correlation of field-measured and remotely sensed plant water status as a tool to monitor the risk of drought-induced forest decline. *Forests* 11. <https://doi.org/10.3390/f11010077>
- MCDOWELL, N.G., 2011. Mechanisms linking drought, hydraulics, carbon metabolism, and vegetation mortality. *Plant Physiol.* 155, 1051–1059. <https://doi.org/10.1104/pp.110.170704>
- MEIER, I.C., KNUTZEN, F., EDER, L.M., MÜLLER-HAUBOLD, H., GOEBEL, M.O., BACHMANN, J., HERTEL, D., LEUSCHNER, C., 2018. The Deep Root System of *Fagus sylvatica* on Sandy Soil: Structure and Variation Across a Precipitation Gradient. *Ecosystems* 21, 280–296. <https://doi.org/10.1007/s10021-017-0148-6>
- MEINING, S., BAUER, A., DAMMANN, I., GAWEHN, P., SCHRÖCK, H., WENDLAND, J., 2007. *Waldbäume - Bilderserien zur Einschätzung von Kronenverlichtungen bei Waldbäumen*. Verlag M FASTE, Kassel.
- MLUK, 2020a. Waldzustandsbericht 2020 des Landes Brandenburg. Ministerium für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Klimaschutz des Landes Brandenburg (MLUK), Landeskompetenzzentrum Forst Eberswalde (LFE), Eberswalde.
- MLUK, 2020b. Waldschutzbericht 2019 - Landeskompetenzzentrum Forst Eberswalde, Fachbereich Waldschutz und Wildökologie. Ministerium für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Klimaschutz des Landes Brandenburg (MLUK).
- MÖLLER, K., HIELSCHER, K., WENNING, A., DAHMS, C., 2020. Waldschutzsituation 2019 in Brandenburg und Berlin. *AFZ-Der Wald* 11, 48–52.
- RAO, K., ANDEREGG, W.R.L., SALA, A., MARTÍNEZ-VILALTA, J., KONINGS, A.G., 2019. Satellite-based vegetation optical depth as an indicator of drought-driven tree mortality. *Remote Sens. Environ.* 227, 125–136. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.03.026>
- RENNENBERG, H., SEILER, W., MATYSSEK, R., GESSLER, A., KREUZWIESER, J., 2004. Die Buche (*Fagus sylvatica* L.) – ein Waldbaum ohne Zukunft im südlichen Mitteleuropa? *Allg. Forst und Jagdzeitung* 175, 210–224.
- ROHNER, B., KUMAR, S., LIECHTI, K., GESSLER, A., FERRETTI, M., 2021. Tree vitality indicators revealed a rapid response of beech forests to the 2018 drought. *Ecol. Indic.* 120, 106903. <https://doi.org/10.1016/j.ecoind.2020.106903>
- SCHULDt, B., BURAS, A., AREND, M., VITASSE, Y., BEIERKUHNEIN, C., DAMM, A., GHARUN, M., GRAMS, T.E.E., HAUCK, M., HAJEK, P., HARTMANN, H., HILTBUNNER, E., HOCH, G., HOLLOWAY-PHILLIPS, M., KÖRNER, C., LARYSCH, E., LÜBBE, T., NELSON, D.B., RAMMIG, A., RIGLING, A., ROSE, L., RUEHR, N.K., SCHUMANN, K., WEISER, F., WERNER, C., WOHLGEMUTH, T., ZANG, C.S., KAHMEN, A., 2020. A first assessment of the impact of the extreme 2018 summer drought on Central European forests. *Basic Appl. Ecol.* 45, 86–103. <https://doi.org/10.1016/j.baae.2020.04.003>

SEIDLING, W., 2007. Signals of summer drought in crown condition data from the German Level I network. *Eur. J. For. Res.* 126, 529–544. <https://doi.org/10.1007/s10342-007-0174-6>

WELLBROCK, N., EICKENSCHIEDT, N., HILBRIG, L., DÜHNELT, P.-E., HOLZHAUSEN, M., BAUER, A., DAMMANN, I., STRICH, S., ENGELS, F., WAUER, A., 2020. Leitfaden und Dokumentation zur Waldzustandserhebung in Deutschland, 2nd ed. Braunschweig: Johann Heinrich vonThünen-Institut, 98 p., Thünen Working Paper 84.

Pilzliche und pilzähnliche Organismen an Rot-Buche (*Fagus sylvatica* L.)

Aline Wenning und Christine Dahms

1. Einleitung

Die Rot-Buche (*Fagus sylvatica*) gilt in Brandenburg neben der Eiche als eine der bedeutendsten Laubbaumarten für Waldökosysteme und Forstwirtschaft. Die mit dem Klimawandel zunehmende Häufigkeit extremer Wetterbedingungen, wie Sturmereignisse oder anhaltende Trockenheit, haben intensive negative Effekte auch auf die von Buchen geprägten Waldökosysteme. Sich stark verändernde Witterungsbedingungen beeinflussen u. a. symbiotische Mykorrhizapilze und pflanzenpathogene Pilze. Zu beobachten ist ebenfalls, dass sich eingeschleppte invasive Pilzarten (Neomyzeten) als forstpathogene Schadpilze weiter ausbreiten oder ihr Wirtsspektrum den neu erschlossenen Habitaten anpassen. Die meisten pilzlichen Pathogene werden stark von den Wechselbeziehungen zu ihrem Wirt beeinflusst. Der Klimawandel wirkt also sowohl auf den Wirt als auch auf den Pilz und damit auf deren Vitalität bzw. Pathogenität.

Im Vordergrund des aktuellen Schadgeschehens bei der Rot-Buche stehen einheimische Schwächeparasiten, die an gestressten und in der Vitalität herabgesetzten Bäumen zu starken Schäden bis hin zu deren Absterben führen können. Die außergewöhnlichen Witterungsverhältnisse der Jahre 2018 bis 2020, mit sehr hohen Temperaturen, Dürre und intensiver Sonneneinstrahlung haben die Anfälligkeit der Rot-Buchen gegenüber pilzlichen Infektionen erhöht. Schäden an der Rinde, z. B. durch „Sonnenbrand“, führten auch zur Aktivierung endophytischer Arten, die das komplexe Schadgeschehen vorantreiben. Ein Beispiel für diese Wechselbeziehung ist der Rot-Buchen-Rindenkugelpilz, *Bisogniauxia nummularia* (BULL.) KUNTZE, der als typischer Endophyt im Buchenökosystem vorkommt und eine wichtige Rolle bei der natürlichen Astreinigung, aber auch der Zersetzung von Totholz spielt. Im aktuellen Schadgeschehen führt die Art jedoch an geschwächten Rot-Buchen zu massiven Kronenschäden. Weitere Pilze wie der Spaltblättling, *Schizophyllum commune* FR., profitieren von erhöhten Temperaturen und können längere Trockenphasen gut überdauern. Auch diesem Pilz kommt im Zusammenhang mit den betreffenden Schäden eine besondere Bedeutung zu. Das aktuelle Schadgeschehen an der Rot-Buche widerspiegelt die große Komplexität der Einflussfaktoren, zu denen auch Insekten gehören. Das sind insbesondere Borken- und Prachtkäfer (siehe HIELSCHER in diesem Bd.)

Die im nachfolgenden Text beschriebenen Pilzarten wurden weder nach systematischen Gesichtspunkten noch nach ihrer aktuellen phytopathologischen Bedeutung geordnet. Im Zusammenhang mit den klimatischen Veränderungen ist nicht absehbar, welche Rolle die unterschiedlichen Spezies in Zukunft spielen werden.

2. Schaderreger an Samen und Blättern

Bucheckernfäule

Rhizoctonia solani J. G. KÜHN (1858)

Der Basidiomycet gilt als Erreger der sogenannten „Bucheckernfäule“. Die hervorgerufene Samenfäule tritt in endemischer Form hauptsächlich nach nasskalten Herbst- und Wintermonaten auf. Kommt es zu einem Befall, so wird auf den Bucheckern ein wollig weißes, locker anliegendes Myzel gebildet (Abb. 1). Im Inneren des Samens kommt es zu hellbraunen Verfärbungen und im Bereich der Keimblätter zur Ausbildung von Hyphen. Nach DELFS-SIEMER (zitiert bei BUTIN, 2011) ist es möglich, den Erreger im Samen durch eine Warmwasserbehandlung (1 Stunde bei genau 41 °C) abzutöten. Bereits infizierte Samen sollten aus dem Lager entfernt werden, um eine Ausbreitung des Befalls zu verhindern.



Abb. 1: Mit *Rhizoctonia solani* infizierte Bucheckern (Foto: C. Dahms)

Umfangreichere Samen- und Keimlingsverluste treten vor allem bei der Pflanzenaufzucht in z. B. Baumschulen auf. Als bodenbürtiger Krankheitserreger infiziert *R. solani* die Samen überwiegend vom Bodensubstrat aus. Es empfiehlt sich daher den Kontakt von Saatgut zur humushaltigen Schicht des Erdreichs zu vermeiden. Bei der Saatguternte sollte darauf geachtet werden, dass die Früchte auf Planen oder Netze fallen.

Erreger der Buchenblattbräune

Apiognomonina errabunda (ROBERGE ex DESM.) HÖHN. (1918)

A. errabunda lebt als symptomloser Endophyt im Blattgewebe und entwickelt erst durch die Stimulation gallbildender Insekten (Gallmücken oder Gallmilben) eine pathogene Lebensweise. Bei der auffälligen Blattkrankheit handelt es sich um die Hauptfruchtform des Erregers, dessen Fruchtkörper (Perithezien) sich im Frühjahr auf den abgefallenen, am Boden liegenden Blättern entwickeln. Während der parasitischen Phase entstehen im Bereich der Blattadern unregelmäßig geformte, dunkel umrandete Nekrosen (Abb. 2). Es können auch die Blattstiele infiziert werden. Dies führt



Abb. 2: Schadbild der Buchenblattbräune (Foto: C. Dahms)

dann zu mehr oder weniger umfangreichem Blattfall. Eine ernsthafte Gefährdung durch die Pilzinfektion als Einzelfaktor besteht jedoch in der Regel auch bei stärker befallenen Bäumen nicht. Die betroffenen Buchen treiben im nächsten Frühjahr wieder normal aus. Das Schadbild ist an beschatteten Blättern deutlich höher.

3. Beteiligung von pilzlichen Schaderregern, Schwächeparasiten und Saprobionten im aktuellen komplexen Schadgeschehen der Rot-Buche

Rot-Buchen-Rindenkugelpilz

Biscogniauxia nummularia (BULL.) KUNTZE (1891)

Der Pilz lebt endophytisch in Rotbuchen. Darüber hinaus tritt er als Schwächeparasit und Saprobiont auf der Rinde absterbender Stämme bzw. Äste auf. *B. nummularia* bildet auf geschwächten Rot-Buchen oft mehrere, streifenartige Fruktifikationsfelder. Diese rundlichen, schwarzen Stromata brechen aus der Rinde hervor und führen zu einer partiellen Holzerstörung (Abb. 3). Die Art steht in Verbindung mit Grünastabbrüchen bei erkrankten Buchen und ist daher gerade im Hinblick auf die Verkehrssicherheit kritisch zu betrachten. Heiße und trockene Sommer begünstigen das Auftreten dieses Pilzes und die damit einhergehende Schädigung. Dieser Pilz spielt eine wesentliche Rolle bei den aktuellen komplexen Schäden an Rot-Buche, die seit 2019 im Land Brandenburg immer deutlicher in Erscheinung treten.



Abb. 3: Stammabschnitt mit flachen, am Substrat krustenförmig aufliegenden Fruchtkörpern von *Biscogniauxia nummularia* (Foto: A. Wenning)

Spaltblättling***Schizophyllum commune* Fr. (1815)**

Der Gemeine Spaltblättling ist in Europa die einzige Art der Gattung der Spaltblättlinge (*Schizophyllum*). Die Fruchtkörper werden über das gesamte Jahr gebildet. Der Pilz lebt als Saprobiont und selten als Wundparasit an Stämmen und dicken Ästen der Rot-Buche. Deutlich seltener ist er an Nadelhölzern zu finden. Auf Grund seiner hohen Toleranz gegenüber Trockenheit ist der Pilz in der Lage auch andere Substrate zu besiedeln (z. B. Knochen oder Heuballen). Er gedeiht an sonnenexponierten, trockenen Standorten, z. B. auf Lichtungen und gilt als typischer Erstbesiedler an durch Sonnenbrand geschädigten Buchen. Im Holz verursacht der Gemeine Spaltblättling eine intensive Weißfäule und kann beträchtliche Schäden verursachen. Seine 2-5 cm großen Fruchtkörper (BUTIN, 2011) sind muschel- oder fächerförmig und sitzen dem Holz stiellos an. Die grobfilzige Oberfläche ist weißlich bis grau, der Rand meist unregelmäßig eingeschnitten bis gelappt (Abb. 4). Die Fruchtschicht (Hymenium) auf der Unterseite des Pilzes besteht aus längs gespaltenen rosa-fleischfarbenen Lamellen (GERHARDT, 2011),



Abb. 4: Fruchtkörper des Gemeinen Spaltblättlings (*Schizophyllum commune*) an einer durch Sonnenbrand geschädigten Rot-Buche (Foto: C. Dahms)

die sich bei Trockenheit längs einrollen, um die Sporen zu schützen.

***Neonectria coccinea* (PERS.) ROSSMAN & SAMUELS (1999) – Abgrenzung**

***Neonectria ditissima* (TUL. & C. TUL.) SAMUELS & ROSSMAN (2006)**

N. coccinea kommt auf der Rinde absterbender Stämme bzw. Äste vor und zählt zu den Mitverursachern der „Buchenrindennekrose“. Die Erkenntnisse der vergangenen Jahre, bezogen auf die Absterbeerscheinungen der Altbuchen, zeigen eine häufige Beteiligung dieses Pilzes an. Für das frühe Stadium der Buchenrindennekrose wurde der Pilz als einer der häufigsten und stärksten pathogenen Erstbesiedler beschrieben (NIESAR AT AL. 2007). Die Fruchtkörper sind nur 0,2-0,4 mm groß. Sie brechen als kugelige bis eiförmige, scharlachrote Perithezien aus der Oberfläche der Rinde hervor. Diese büschelig verwachsenen Einzelfruchtkörper können ganze Rindenbereiche überziehen (Abb. 5). Bei feuchter Witterung werden aus den Perithezien ganzjährig Ascosporen entlassen, die über Wassertröpfchen im Bestand verdriften. Die Infektion erfolgt über die Lentizellen der Rinde oder andere Eintrittspforten wie Mikrorisse. Dies führt in milden Wintern zu Mikronekrosen unter der Rinde. Im Verlauf der Krankheit können meterhohe Kambiumnekrosen entstehen. Gärungsprozesse führen häufig zu Saftaustritt an den Stämmen. Die Aktivität verschiedener Mikroorganismen lässt die Schleimflussflecken sichtbar werden.



Abb. 5: Perithezien von *Neonectria coccinea* an aufgeplatzter Rinde der Rot-Buche (Foto: A. Wenning)

Weitere *Neonectria*- Arten kommen an der Buche vor, gelten jedoch als weniger aggressiv. So ist *Neonectria ditissima* ein langsam wachsendes Pathogen an Bäumen. Nach der Infektion treten spindelförmige nekrotische Rindeneinsenkungen an Ästen und Stämmen in Erscheinung. An Ästen können diese Verdickungen und krebsartigen Wucherungen durch eingeschränkte Wasser- und Nährstoffversorgung zum Absterben der

Äste führen. Diese krebsartigen Wucherungen entstehen durch Überwallungsversuche des Baumes und erneute Infektionen über viele Vegetationsperioden hinweg. Befallen werden insbesondere Rot-Buchen, aber auch Birken.

Vierfrüchtige Quaternaria
***Eutypella quaternata* (PERS.) RAPPAZ (1987)**

Dieser zu den Ascomycota gehörende Kleinpilz ist als Folgeersetzer (Saprobiont) an Rot-Buche bekannt. Der Pilz tritt häufig an abgestorbener Rinde liegender Buchenstämme auf. Vermehrt ist ein Auftreten des Saprobionten und Schwächeparasiten aber auch an noch lebenden stehenden Rot-Buchen zu beobachten.

Die Fruchtkörper sind dichtstehend ins Rindenparenchym eingesenkt. Das sich unter der Rinde bildende Stroma ist anfangs durch winzige Wölbungen gekennzeichnet. Im Verlauf der Entwicklung bricht die Rinde auf, weshalb diese Art auch als „Rindenbrecher“ beschrieben ist. Typisch für *E. quaternata* sind die langen gewundenen, leuchtend honiggelben bis orangen Sporenranken (Abb. 6) der Nebenfruchtform auf der abgestorbenen Rinde.



Abb. 6: Orangefarbene Sporenranken von *Eutypella quaternata* an Rot-Buche (Foto: A. Wenning)

4. Sonstige Schwächeparasiten und Saprobionten an Rot-Buche

***Cryptosporiopsis* sp.**

Cryptosporiopsis spp. sind als Schwächeparasiten bekannt. So verursacht zum Beispiel *C. grisea* wirtschaftlich bedeutungsvolle Schäden an Rot-Eichen (*Pezicula*-Krebs) (HEYDECK, 2006). Es ist bekannt, dass die Anfälligkeit der Bäume im Zusammenhang mit Störungen im Wasserhaushalt nach Trockenperioden zunimmt. Durch physiologische Beeinträchtigungen (z. B. meteorogene Faktoren) erhöht sich die Prädisposition gegenüber pilzlichen Pathogenen und Schwächeparasiten.

Alborbis galericulata* (TUL. & C. TUL.) SENAN. & K. D. HYDE (2017), Synonym: *Fusicoccum galericulatum

Es handelt sich hier um einen potenziellen Krankheitserreger, der lebende Bäume aber nur besiedeln kann, wenn deren Vitalität bereits durch andere Einflüsse herabgesetzt worden ist. Häufig tritt er als Erstbesiedler absterbender Äste in Erscheinung.

***Fusicoccum macrosporum* SACC. & BRIARD (1886)**

Dieser Kleinpilz kommt als saprotropher Erstbesiedler von frisch abgestorbener Rinde vor, eventuell auch als Schwächeparasit. Typisch für den genannten Pilz sind, wie der Name schon sagt, seine außergewöhnlich großen Konidien (Sporen).

***Cytospora* sp.**

Cytospora-Arten sind Schwächeparasiten und Saprobionten. Nur an vorgeschädigten oder geschwächten Gehölzen verursachen sie Rindenkrankheiten und Zweigsterben. Häufig treten sie nach Witterungsextremen in Erscheinung (z. B. nach Niederschlagsmangel, Dürreperioden oder Frost).

***Asterosporium asterospermum* (PERS.) S. HUGHES (1958)**

Dieser Ascomycet ist ein häufiger Erstbesiedler der toten Rinde der Rot-Buche. Die im jungen Gewebe an Ästchen und Stämmen auftretenden Fruchtkörper entlassen bei feuchter Witterung ihre schwärzlichen Sporenmassen. Die Konidien sind vierarmig, mehrzellig und dunkelbraun.

Runzeliger Schichtpilz
***Stereum rugosum* PERS. (1794)**

Der Runzelige Schichtpilz, auch Rötender Runzel-Schichtpilz genannt, bildet eine am Substrat krustenförmig aufgewachsene Fruchtschicht. Dabei kann der weiße Rand leicht absteigen. *S. rugosum* wächst als Saprobiont oder Schwächeparasit an Laubholz, bevorzugt an Buche, Hasel oder Erle. Der Pilz besiedelt totes stehendes, aber auch liegendes Substrat (Stämme, Äste und Zweige) und dehnt sich dabei oft auf mehrere Meter Länge aus (MIGGEL, 2008). Die

Fruchtschicht ist weißlich bis ocker, bei Verletzungen rötend.

Rötliche Kohlenbeere

***Hypoxylon fragiforme* (PERS.) J. KICKX F. (1835)**

Der Pilz lebt als Saprobiont auf der Rinde von Rot-Buchen. Von den etwa zwölf *Hypoxylon*-Arten ist die Rötliche Kohlenbeere die am weitesten verbreitete. Diese kommt typischerweise auf der Rinde frisch gefällter Buchen zum Vorschein. Die kissenförmigen, anfangs rosafarbenen oder ziegelroten, später schwarzen, harten Fruchtkörper finden sich meist in Gruppen auf der Rinde des Holzes (Abb. 7).

Die Fruchtkörper (Perithezien) sind meist 0,4 bis 1 cm breit, selten können sie auch größer sein. Sie sitzen direkt der Außenrinde an, wodurch eine höckerige Struktur entsteht.



Abb. 7: Fruchtkörper der Rötlichen Kohlenbeere (Foto: A. Wenning)

Der Pilz verursacht eine Weißfäule und fällt im Holz durch schwarze Demarkationslinien auf. Die glatten, dunkelbraunen und fast undurchsichtigen Sporen messen 11 bis 15 × 5,5 bis 7,5 Mikrometer. Sie sind bohnenförmig und weisen einseitig eine Keimspalte in Längsrichtung auf. Ältere Fruchtkörper sind häufig auffällig, da sie die umgebene Rinde mit schwarzem Sporenpulver bedecken.

Flächiges Eckenscheibchen

***Diatrype stigma* (HOFFM.) FR. (1849)**

Das Flächige Eckenscheibchen (*Diatrype stigma*) findet man ganzjährig an Totholz-Ästen von Buche und anderen Laubbaumarten, z. B. Birke, Eiche und Ahorn (EWALD, 2006). Der Pilz lebt saprotroph. An geschädigten Buchen kann er auch schwach parasitisch in Erscheinung treten. Die Fruchtkörper sind undifferenzierte schwarze Beläge (Krusten), die zunächst unter der Rinde gebildet werden. Erst mit zunehmender

Entwicklung löst sich die Rinde vom Holz und die flächigen Stromata werden sichtbar. Die Oberfläche der Stromata ist mit feinen Öffnungen besetzt; diese dienen dem Sporenaustritt. Im jungen Zustand erscheint sie purpurbräunlich, später schwarz und trocknet auffällig rissig ein (Abb. 8).



Abb. 8: Schwarze, rissige Fruchtschicht von *Diatrype stigma* unter aufplatzender Buchenrinde (Foto: A. Wenning)

Buchenrindenschorf

***Ascodichaena rugosa* (BUTIN) 1977**

Ascodichaena rugosa ist ein parasitisch vorkommender Kleinpilz (Ascomycet), der nur von der oberen Rindenschicht des Baumes lebt. Die Schädigung des Wirtes bleibt also ohne größere Bedeutung. Gern ernähren sich Schnecken von den dunklen Belägen und



Abb. 9: *Ascodichaena rugosa* (Foto: C. Dahms)

Abb. 10: *Athelia epiphylla* (Foto: C. Dahms)

tragen damit zur Verbreitung der Konidien des Pilzes bei. *A. rugosa* ist häufig auf (glattrindigen) Laubbäumen wie z. B. Buchen, Eichen und Birken anzutreffen (Abb. 9). Voraussetzung für sein Wachstum sind feuchte Witterungsabschnitte. Dann findet man ihn über das ganze Jahr in Streifenform oder kreisrund auf der Rinde. Zur Abwehr schützt sich der Baum mit verstärktem Korkwachstum.

Weißer Rindenpilz *Athelia epiphylla* PERS. (1822)

Bei diesem Pilz handelt es sich in erster Linie um einen Algen-Parasiten. Eine Schadwirkung für den Baum besteht also nicht. *A. epiphylla* kann sich außerdem von Moosen oder saprotroph ernähren. Er ist häufig in stadtnahen Gebieten an Laubgehölzen (wie z. B. Buche, Hainbuche, Ahorn oder Linde) zu finden. Selten kommt er an Nadelgehölzen vor. Besonders gern wird die glattrindige Rot-Buche besiedelt. Hier zeigen sich auf der Rinde weißlich bis grau-braun verfärbte Flecken, die später ineinander fließen und umfangreichere Stammteile besiedeln können (Abb. 10). Optimale Bedingungen findet der genannte Pilz bei hoher Luftfeuchtigkeit.

5. Wurzel-, Stammholz- und Kambialschäden verursachende Pilze

Hallimasch *Armillaria mellea* s. l.

Armillaria-Arten gehören zu den bedeutendsten pilzlichen Krankheitserregern an Bäumen. Ihr Wirtsspektrum umfasst mehr als 600 Arten. Erhebliche Schäden entstehen vor allem an Nadelgehölzen (z. B. *Pinus* und *Picea* spp.) sowie an geschwächten Laubbäumen. Ein verstärktes Auftreten wurde z. B. nach Dürreperioden, Schädlingsbefall, Frosteinwirkung oder auf Standorten mit ungünstigem Wasserhaushalt beobachtet. *Armillaria*



Abb. 11: Fruchtkörper vom Hallimasch an einem Buchen-Stubben (Foto: C. Dahms)

laria spp. gehören zu den wurzelbürtigen Schaderregern. Sie infizieren anfangs das Wurzelsystem und steigen dann im Kambialbereich des Stammes auf. Kennzeichnend für den Hallimasch ist seine Fähigkeit, lebendes Kambium zu besiedeln und abzutöten („Kambiumkiller“). Hinzu kommt, dass sich Hallimasch-Arten mit Hilfe von Rhizomorphen im Boden zügig ausbreiten können und so eine Gefahr für die benachbarten Bäume darstellen. An totem Holz findet man unter der Rinde das fächerförmig wachsende, dicke weiße Pilzmyzel. Die in Büscheln vorkommenden Fruchtkörper zeigen sich meist ab September (Abb. 11). Besonders Laubholz- und Fichtenstöcke stellen relevante Infektionsquellen dar. Forstpathologisch von Bedeutung sind in erster Linie der Dunkle Hallimasch (*Armillaria ostoyae* [ROMAGNESI] HERINK) und der Honiggelbe Hallimasch (*Armillaria mellea* [VAHL: FR] KUMMER).

Echter Zunderschwamm *Fomes fomentarius* (L.) FR. (1849)

Eine der Hauptwirtsbaumarten des Zunderschwammes ist die Buche. Ferner kommt er auch an Erle, Ahorn und anderen Laubgehölzen vor. Im Holz ver-



Abb. 12: Fruchtkörper von *Fomes fomentarius* am stehenden Stamm einer Altbuche (Foto: A. Wenning)

ursacht er eine schnell voranschreitende Weißfäule (Zersetzung von Hemizellulose, Zellulose und Lignin). Die Fruchtkörper von *F. fomentarius* zeichnen sich durch eine konsolenartige, hellgrau gefärbte, wellige Oberseite aus (Abb. 12). Unten sind sie anfangs cremefarben und später dann bräunlich-grau gefärbt (Porenschicht). Die frische Zuwachskante ist weiß. Die mehrjährigen Fruchtkörper besitzen einen Mycelialkern und können eine Größe bis zu 30 cm erreichen. Werden sie am Stamm sichtbar, ist der Holzkörper in der Regel schon stark zerstört. Der Zunderschwamm dringt meistens über Wunden (z. B. Astabbrüche, Fällschäden) in den Wirt ein. Deshalb ist es wichtig, jegliche Stamm-Verletzungen zu vermeiden.

Austernseitling***Pleurotus ostreatus* (JACQ.) P. KUMM. (1871)**

Dieser auf lebenden Bäumen wachsende Schwächeparasit kommt an verschiedenen Laubbäumen vor. Bevorzugt besiedelt wird neben Pappeln, Weiden und Linden, insbesondere die Rot-Buche. Als Saprobiont besiedelt der Pilz neben liegenden Stämmen vorwiegend Stubben und verursacht im Kernholz eine intensive Weißfäule. Der Austernseitling wächst von Oktober bis März, vorzugsweise an Rot-Buche und ist auch nach den ersten Frosträchten noch zu finden. Im Gegensatz zu den meisten anderen Pilzarten sporuliert er auch unter winterlichen Bedingungen. Der Pilz hat während der Fruchtkörperbildung einen hohen Lichtbedarf. Der unbelaubte Zustand der Bäume fördert somit die Bildung der als Speisepilz beliebten Pilzfruchtkörper. Diese wachsen in Büscheln am Holz, sind hellblättrige Lamellenpilze mit nierenförmigem Hut und seitlich ansetzendem Stiel (Abb. 13). Die Farbe des Pilzes ist stark variabel und reicht von graulila über graubraun bis blauschwarz. Die Oberseite ist glänzend. Die weißlichen oder ockergelben Sporen sind klebrig und haften so recht leicht an Baumstämmen, an welche sie durch den Wind verweht werden (NIESAR 2013).



Abb. 13: Fruchtkörper von *Pleurotus ostreatus* an Rot-Buche (Foto: A. Wenning)

Buchenschleimrübling***Mucidula mucida* (SCHRAD.) PAT. (1887)**

Die etwa 2-8 cm breiten, weißen bis elfenbeinfarbenen Fruchtkörper sind rundlich und leicht durchscheinend. Bei feuchter Witterung ist die Fruchtkörperoberseite von einer schleimigen Schicht bedeckt. Ältere Fruchtkörper sind eher ockerfarben. Die breiten, entfernt stehenden, weißen Lamellen sind am Stiel angeheftet. Der gekrümmte Stiel ist schlank mit einem deutlichen Ring. Die Fruchtkörper bilden sich von September bis November auf alten abgestorbenen oder noch lebenden, aber geschwächten Buchenstämmen und -ästen (Abb. 14).



Abb. 14: Fruchtkörper des Schleimrüblings an Buche (Foto: A. Wenning)

Riesenporling***Meripilus giganteus* (PERS.) P. KARST. (1882)**

Ein weiterer wurzelbürtiger Fäuleerreger ist der Riesenporling. Es handelt sich um einen Schwächeparasiten, der zumeist an den Wurzeln älterer Laubbäume zu finden ist. Der Pilz besiedelt neben der Rot-Buche auch Linden, Eichen und Platanen. Dort erzeugt er eine Weißfäule, die jedoch nur wenig in das Stammholz vordringt. Auch steigt die durch den Riesenporling erzeugte Wurzelfäule nur minimal im Stamm empor. Das Auftreten der Fruchtkörper ist ein Zeichen fortgeschrittener Zerstörung des Wurzelwerkes und des baldigen Absterbens der befallenen Bäume. *M. giganteus* lebt überwiegend als Saprobiont an absterbenden Wurzeln und kommt oft an Stubben vor. Da er bevorzugt an Altbäumen wächst, ist er auch in Park- und Gartenanlagen häufig anzutreffen. Die sich im Spätsommer bis Herbst entwickelnden Fruchtkörper mit ihren typischen dachziegelartig überlappenden, fächerförmigen Hüten können dabei bis zu einem Meter groß werden. Die gelbbraunen Fruchtkörper unterscheiden sich von denen des Klapperschwammes (*Grifola frondosa* [DICKS.] GRAY) durch die sich bei Druck schwärzende Porenschicht. Die Oberseite der bis zu 30 cm großen

Einzelhüte ist gelb- bis dunkelbraun und zeigt am Rand häufig eine hellere Wachstumszone (Abb. 15).



Abb. 15: Fruchtkörpergruppe eines Riesenporlings (*Meripilus giganteus*) (Foto: A. Wenning)

Eichhase

***Grifola frondosa* (DICKS.) GRAY (1821)**

Des Weiteren tritt als wurzelbürtiger Weißfäuleerreger an Rot-Buche (aber auch an Eiche) der Eichhase (*Grifola frondosa* [DICKS.] GRAY) in Erscheinung. Der Pilz bildet büschelige, aus zahlreichen gestielten, runden Einzelhüten bestehende Fruchtkörper. Diese 20-40 cm großen Gebilde stehen gesellig in bis zu 100 Stück zusammen. Die Fruchtkörper erscheinen zwischen Juli und September in Buchen- sowie in gemischten Laubwäldern. Der Eichhase lebt als Parasit oder Saprobiont am Grund lebender oder toter Bäume.

Brandkrustenpilz

***Kretzschmaria deusta* (HOFFM.) P. M. D. MARTIN (1970)**

Der Brandkrustenpilz dringt häufig über Rindenschäden im Stock- und Wurzelbereich ein und verursacht hier eine ausgeprägte Holzfäule. Er gehört zur Abteilung der Schlauchpilze (Ascomyzeten). Im Frühsommer entstehen die hellen, relativ gut sichtbaren

Zuwachszonen der Nebenfruchtform. Die schwarzen, krustenartigen Fruchtkörper der Hauptfruchtform werden im Laufe des Sommers im Stammanlaufbereich sowie am Stammfuß gebildet (Abb. 16). Die hervorgerufene Holzfäule („Weißfäule“) führt zu einem drastischen Verlust an Festigkeit. Dies ist auch unter dem Gesichtspunkt der Verkehrssicherung zu beachten.



Abb. 16: Ältere Fruchtkörper von *Kretzschmaria deusta* an Altbuche (Foto A. Wenning)

Angebrannter Rauchporling

***Bjerkandera adusta* (WILLD.) P. KARST. (1879)**

Bei diesem Pilz handelt es sich um einen Saprobionten, der aber auch als Wund- und Schwächeparasit nach mechanischer Verletzung oder physiologischer Beeinträchtigung der Bäume in Erscheinung tritt. Die Fruchtkörper sind flach anliegend, im oberen Bereich leicht abstehend oder dünn konsolenförmig. Häufig werden die oberseitig braun bis schwarzen Fruchtkörper auch dachziegelartig angelegt. Die Ränder erscheinen gelappt zoniert und radial gewellt. Es handelt sich um einen aggressiven Erreger von Weißfäule, die von außen nach innen voranschreitet. Durch die Kernholzfäule kann es zur erheblichen Verringerung der Wasserleitfähigkeit des Baumes kommen. Die Art tritt ganzjährig in Erscheinung, ist jedoch besonders

im Herbst an totem Laubholz häufig. Seltener findet man sie an Nadelholz oder lebenden geschwächten Stämmen.

Striegelige Tramete

***Trametes hirsuta* (WULFEN) LLOYD (1924)**

Die Fruchtkörper der Striegeligen Tramete sind einjährig, jedoch kann man sie ganzjährig finden. Eine Besonderheit ist, dass *T. hirsuta* oft an sonnenexponierten und relativ trockenen Standorten wächst, ähnlich wie der Spaltblättling (*Schizophyllum commune*) (WEBER K., 2001). Deshalb findet man die Fruchtkörper häufig auch an Pfosten, Zäunen oder anderem verbauten Holz. Die Striegelige Tramete lebt meist saprotroph an toten Ästen oder toten Stammbereichen (Abb. 17). Seltener tritt sie als Wundparasit an Laubholz in Erscheinung. In Ausnahmefällen ist sie auch an Nadelholz zu finden. Im befallenen Substrat verursacht der Pilz eine Weißfäule.

Die Fruchtkörper bilden halbkreisförmige Konsolen, welche oft dachziegelartig beieinanderstehen. Diese setzen in der Regel seitlich am Substrat an. Die Fruchtkörper sind weißlich mit ockerfarbenem Zuwachsrand, ca. 3 – 10 cm breit und ca. 0,5 – 1 cm dick. Besonderes Merkmal ist die mit starren „striegeligen“ Haaren bedeckte Oberseite. Diesem Filz verdankt die Striegelige Tramete ihren Namen. Bei älteren Fruchtkörpern ist die Oberseite typischerweise mit einem grünlichen Algenbewuchs besetzt. Auf der Unterseite sind feine weiße Poren sichtbar, aus denen das ebenfalls weiße Sporenpulver freigesetzt wird.

Neben dem genannten Pilz kommen an der Buche viele weitere Vertreter dieser Gattung vor. Dazu gehören neben der Buckeltramete, *Trametes gibbosa* (PERS.) FR. (1838) auch die Schmetterlingstramete, *Trametes versicolor* (L.) LLOYD (1921). Diese besiedeln Buchen-



Abb. 17: Fruchtkörper der Striegeligen Tramete (*Trametes hirsuta*) an einem besonnten Buchenstubben (Foto: A. Wenning)

stubben häufig erst 4-6 Jahre nach dem Einschlag. *T. versicolor* besitzt auf ihrer samtig behaarten Oberseite eine mehrfarbige („bunte“), sich wiederholende Zonierung. Die Farbzonen glänzen seidig (kurze Haare) oder sind matt (längere Haare, Haarfilz) und variieren farblich sehr stark.

Trameten bilden konsolenförmige Fruchtkörper, die nicht selten zusammen an ein und dem selben Stück Holz oder Stubben gedeihen. Diese Pilzsukzession spielt eine wichtige Rolle bei der Zersetzung von Totholz in Buchenwäldern.

Phytophthora-Krankheit der Rot-Buche

***Phytophthora cambivora* (PETRI) BUISMAN (1927)**

***Phytophthora citricola* SAWADA u. a. Arten**

Das als „Wurzelhalsfäule“ beschriebene Schadbild an Rot-Buche, insbesondere auf wechselfeuchten Standorten, wird durch eine Vielzahl von *Phytophthora*-Arten verursacht. *Phytophthora* spp. sind pilzähnliche Organismen, die viele Pflanzenarten besiedeln können. Als Erreger treten am häufigsten die Oomyzeten *Phytophthora cambivora* und *Phytophthora citrico-*



Abb. 18: Symptome - aufgeplatzte Rinde mit starkem Schleimfluss und aufsteigenden Nekrosen im Stammfußbereich einer Rot-Buche (Foto: A. Wenning)

la auf, gelegentlich können weitere am Krankheitsgeschehen beteiligt sein (JUNG, 2005).

Phytophthora cambivora befällt zuerst die Feinwurzeln, später Hauptwurzeln und schließlich werden Rinden- und Kambiumnekrosen sichtbar.

Typisch sind, neben dem Zurücksterben der Krone bei Altbüchen, Befallsstellen mit intensivem Safffluss an Wurzelanläufen und Stammbasis (Abb. 18). Unter der Rinde befinden sich aufsteigende, zungenförmige Nekrosen des Kambiums. Bei langjährigem Krankheitsverlauf treten Sekundärschäden auf, verursacht durch z. B. Brandkrustenzpilz oder Hallimaschbefall. Diese bewirken eine weitere Ausbreitung der Rindennekrosen sowie Holzfäulen. Damit erhöht sich die Bruchanfälligkeit der Bäume.

Die Verbreitung der Erreger erfolgt über begeißelte Zoosporen. Diese benötigen neben hoher Luftfeuchtigkeit gemäßigte Temperaturen für ihre Verbreitung. Befallsjahre zeichnen sich durch niederschlagsreiche Perioden mit hoher und langanhaltender Bodennässe aus. Die Abwehrfähigkeit der nässeempfindlichen Buchen wird herabgesetzt. Der Erreger kann durch Verletzungen in die Rinde des Stammfußes vordringen. Folgt im Frühjahr und insbesondere auch im Sommer extrem trockene Witterung, ist eine Etablierung des Krankheitserregers und der damit einhergehenden Schadsymptome wahrscheinlich.

Bei einem Befall durch *P. citricola* können die Sporen in höhere Stammregionen über Risse und kleinere Verletzungen als Mycel in das Rindengewebe einwachsen. Dort verursachen sie mehrere Meter lange Rindennekrosen. Folgebefall durch Fäulepilze erhöht die Bruchanfälligkeit der befallenen Stamm- und Astabschnitte.

Phytophthora ramorum, der Erreger des „Sudden Oak Death“ in Amerika, wurde Anfang der 1990er Jahre auch in Europa nachgewiesen. *P. ramorum* ist ein zu den Eipilzen (Oomyceten) gehörender Schaderreger, dessen Einschleppung und Ausbreitung in der EU verhindert werden soll. Er ist als Unionsquarantäneschädling gelistet und unterliegt dadurch amtlichen Überwachungs- und Bekämpfungsmaßnahmen.

6. Ausblick

Im atlantischen Klimabereich ist die Rot-Buche eine vitale und konkurrenzstarke Baumart. Unter den Witterungsverhältnissen der vergangenen Jahre, mit zunehmend warmem Klima und häufig wiederkehrenden Trockenperioden, lassen ihre Konkurrenzkraft und Vitalität aber deutlich nach. Das bietet vielen pilzlichen Schwächeparasiten - einschließlich Endophyten - verbesserte Lebensbedingungen. Intensive Schädigungen des Wirtes sind die jetzt sichtbare Folge. Die gesteigerte Pathogenität der Pilze im Zusammenhang mit einer erhöhten Vulnerabilität der Bäume führt teilweise zum massiven Absterben von Altbüchen und somit zu einer rasanten Änderung der Buchenbestände in Branden-

burg. Diese aktuellen Entwicklungen widerspiegeln den gewaltigen Druck, der auf Waldbeständen lastet, sich an die schnell verändernden klimatischen Bedingungen anzupassen (HEYDECK & DAHMS, 2001). Gleichzeitig werden Fragen zur zukunftsorientierten Waldbewirtschaftung aufgeworfen.

Literatur:

BREITENBACH J. & F. KRÄNZLIN (1991) - Pilze der Schweiz. Band 1. Ascomyceten. Verlag Mycologia Luzern.

BUTIN, H. (2011) - Krankheiten der Wald- und Parkbäume. Stuttgart: Ulmer.

DELFS-SIEMER, U. (1993) - Ergebnisse zur Thermotheapie von Eicheln und Bucheckern. Allgem. Forstzeit-schr. 48: 927-930.

EWALD GERHARDT (2006) - BLV Handbuch Pilze. BLV, München.

GERHARDT, E. (2011) - Der große BLV-Pilzfürer, 224 f. BLV Verlag.

HEYDECK, P. (2006) - Pilzliche und pilzähnliche Organismen als Krankheitserreger an Eichen. Eberswalder Forstliche Schriftenreihe Bd. 25: 65-71.

HEYDECK, P.; DAHMS, C. (2001) - Zur Bedeutung pilzlicher Organismen als Risikofaktoren bei der Realisierung des Waldumbauprogramms im Bundesland Brandenburg. Beiträge Forstwirtschaft. u. Landschaftsökol. 35/2: 77-82.

JUNG, T. (2005) - Wurzel- und Stammschäden an Buchen (*Fagus sylvatica* L.) durch bodenbürtige Phytophthora-Arten in Bayern: Schadbilder, Verbreitung und Standortbezüge. Forst und Holz 60: 131-139.

MIGGEL, B. (2008) - Die Schichtpilze der Gattung *Stereum* PERS. ex S. F. GRAY 1821. Südwestdeutsche Pilzrundschau 44/2: 49-60.

NIESAR, M.; HARTMANN, G.; KEHR, R. et al. (2007) - Symptome und Ursachen der aktuellen Buchenrindenerkrankung in höheren Lagen von Nordrhein-Westfalen. Forstarchiv 78: 105-116.

NIESAR, M.; ZÜBRIK, M.; KUNCA, A. (2013) - Waldschutz im Klimawandel [Forest Protection in Climate Change]. Landesbetrieb Wald und Holz Nordrhein-Westfalen.

WEBER, K. ; MATTHECK C. (2001) - Taschenbuch der Holzfäulen im Baum. Verlag Forschungszentrum Karlsruhe.

Gefährdung der Rot-Buche (*Fagus sylvatica* L.) durch Tiere und abiotische Einflüsse

Kati Hielscher

Einleitung

Der Arealschwerpunkt der Rot-Buche liegt in West- und Mitteleuropa. Sie ist im Bundesland Brandenburg eine wesentliche Baumart der potenziellen natürlichen Vegetation und in Mitteleuropa bisher eine der konkurrenzstärksten Baumarten. Lange Zeit galt die Rot-Buche als weitgehend unempfindlich gegenüber Schäden (ALTENKIRCH et al. 2002, NIESAR et al. 2013). Sie wird jedoch als empfindlich gegenüber Trockenstress, Staunässe, Wechselfeuchte, Spätfrost und extremen Winterfrösten eingestuft (BRESSEM 2008, SCHÜTT et al. 2011). In der folgenden Darstellung werden ausgewählte Tierarten und abiotische Einflüsse vorgestellt, die in Brandenburg Schäden an Rot-Buchen verursachen.

Rot-Buche und Klimakrise

Einzelne absterbende Rot-Buchen waren und sind auf Wald- und Forstflächen regelmäßig auffindbar. Starben von 2013 bis 2015 Rot-Buchen in Brandenburg ab, ging dies meist auf Staunässe in der Nähe von Gewässern zurück.

Die Rot-Buche benötigt mindestens 500 - 600 mm Jahresniederschlag sowie ein relativ mildes Klima im Winter (SCHÜTT et al. 2011). Insbesondere die Jahre 2018 bis 2020 mit aufeinanderfolgend höheren Jahresmitteltemperaturen und geringeren Jahresniederschlägen als im langjährigen Mittel (Tab. 1) verursachten ab 2019 deutliche Vitalitätseinbußen und Absterbeerscheinungen an Rot-Buchen in Brandenburg. Insbesondere die jährliche Summe von ca. 400 - 500 mm Niederschlag in den Jahren 2018 - 2020 hat in Brandenburg den Wasserbedarf der Rot-Buche nicht oder nur unzureichend gedeckt.

Tab. 1: Klimadaten der Jahre 2018 - 2020 für Brandenburg (Datenquelle: DEUTSCHER WETTERDIENST 2020a, b, 2021)

	Jahresmitteltemperatur in °C	Jahresniederschlag in l/m ²
Langjähriges Mittel	8,7	557
2018	10,8	390
2019	11,1	505
2020	10,9	511

Diese abiotisch begründeten Vorschädigungen ermöglichen insbesondere holz- und rindenbrütenden Insektenarten sowie potenziell pathogenen Pilzen eine

erleichterte Besiedlung ihres Wirtsbaumes. Seit 2019 haben sich die Flächen mit Absterbeerscheinungen an Rot-Buchen in Brandenburg mehr als verundertfacht (Abb. 1). Häufigster Auslöser des Absterbens ist seither die Trockenheit (MÖLLER et al. 2020, 2021). Das Absterbe geschehen folgt um ein Jahr zeitverzögert auf das extrem trockene und warme Jahr 2018. Die Waldzustandserhebung verzeichnete im Jahr 2019 den Beginn eines drastischen Vitalitätseinbruchs der Rot-Buche in Brandenburg (MLUK 2020, WENNING & HENTSCHEL 2021).

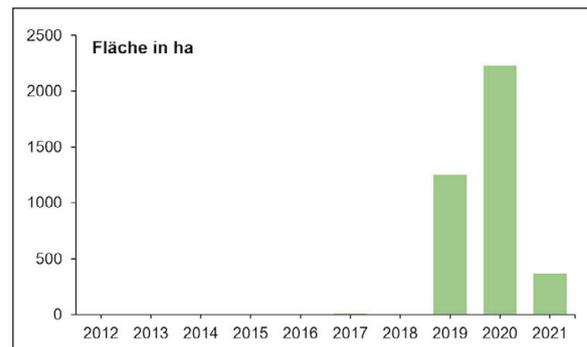


Abb. 1: Flächen mit Absterbeerscheinungen an mindestens 5 % der Rot-Buchen in Brandenburg in den letzten zehn Jahren (Stand 31.07.2021)

Schäden an Jungpflanzen

Schon Bucheckern bilden – besonders in Mastjahren – eine wichtige Nahrungsquelle für Wildschweine, Mäuse, Vögel, Insekten und weitere Tierarten. Die Bedrohung von Jungpflanzen durch abiotisch verursach-

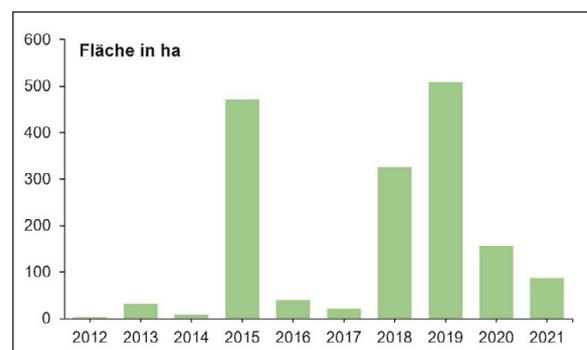


Abb. 2: Flächen bis zum Jungwuchsalter, auf denen mindestens 20 % der Rot-Buchenpflanzen durch Trockenheit geschädigt wurden (Dürreschäden) in den letzten zehn Jahren in Brandenburg (Stand 31.07.2021)

te Schäden oder Tiere nimmt mit zunehmendem Alter der Pflanzen ab. Abiotische Schäden bzw. Ausfälle werden an jungen Pflanzen zumeist durch Spätfröste oder Trockenheit verursacht. So traten in Brandenburg Dürreschäden an Rot-Buchen bis zum Jungwuchsalter vermehrt im Jahr 2015 und ab 2018 auf (Abb. 2).

Erd-, Feld-, Rötel- und Schermäuse können im Winterhalbjahr Fraßschäden an Rinde und Wurzeln junger Pflanzen verursachen (WENK 2016, HARTMANN & BUTIN 2017). Auch der Elbebiber beschädigt oder tötet junge und alte Rot-Buchen durch das Abnagen der Rinde oder die Fällung ganzer Bäume. Neben dem üblichen Wildverbiss wurden in Brandenburg seit 2014 verstärkt Schäden durch Wildschweine in jungen Pflanzungen (z. B. Douglasien, Erlen) festgestellt, bei denen ganze Pflanzen abgebissen und Pflanzungen z. T. fast vollständig vernichtet wurden. Im November 2020 nahm Schwarzwild in einem Rot-Buchenvoranbau in der Oberförsterei Groß Schönebeck ca. 4.000 Pflanzen auf (Abb. 3).



Abb. 3: Rot-Buchenpflanze, von einem Wildschwein abgebissen (Foto: Lutz Hamann)

Schäden durch Insekten entstehen an den Blättern von Jungpflanzen z. B. durch den Fraß des Buchen-Springrüsslers (*Orchestes fagi* L.) oder von Grünrüsslern (z. B. *Phyllobius argentatus* L. – Silbergrüner Laubholzrüssler). Andere polyphage Insektenarten fressen an



Abb. 4: Blausieblarve in einem Stämmchen (Foto: K. Hielscher)

Wurzeln, wie z. B. Maikäferengerlinge (*Melolontha* spp.) oder an den noch dünnen Stämmchen, wie z. B. die Raupe des zu den Schmetterlingen zählenden Blausiebs (*Zeuzera pyrina* L., Abb. 4).

In Bayern wurden Ausfälle in Buchenvoranbauten unter Kiefernoberstand auf Wurzelfraß durch die Larven von Wurzelbohrern zurückgeführt (GÖßWEIN 2014). Dort wurden die Raupen mehrerer Arten der zu den Schmetterlingen zählenden Wurzelbohrer nachgewiesen und der Heidekraut-Wurzelbohrer (*Phymatopus hecta* L.) als einer der Verursacher determiniert.

Abiotische Schäden

Rot-Buchen sind aufgrund ihres relativ flachen Wurzelsystems besonders anfällig für Sturmschäden. Nach den umfangreichen Schäden durch die Stürme Xavier und Herwart im Jahr 2017 zählte die Rot-Buche in Brandenburg neben Eichen und Kiefern zu den am stärksten betroffenen Baumarten (Abb. 5).



Abb. 5: durch den Sturm Xavier geworfene Rot-Buchen im Stadtwald Eberswalde (Foto: K. Hielscher)

Rot-Buchen reagieren empfindlich auf Veränderungen des Wasserhaushaltes. Sie vertragen weder eine zu geringe Wasserversorgung in der Vegetationsperiode noch längere Überflutungsphasen im Sommer (ALTENKIRCH et al. 2002).

Frostereignisse können im Frühjahr Schäden an Blättern und Blüten und im Winter Schäden an der Rinde der Stämme verursachen (ALTENKIRCH et al. 2002).

Sonnenbrand verursacht Rindenschäden am Stamm sonnenexponierter Bäume, die das Absterben und Aufreißen von Rindenpartien bewirken und so Eintrittspforten für Pilze, wie den Spaltblättling (vgl. WENNING & DAHMS 2021) sowie holz- und rindenbrütende Insektenarten schaffen.

Holz- und Rindenbrütende Insekten

Der Buchenprachtkäfer (*Agrius viridis fagi* RATZEBURG) gilt als forstwirtschaftlich bedeutendste Prachtkäferart an Rot-Buchen. Dieser Rindenbrüter besiedelt Rot-Buchen, die bereits eine Vorschädigung aufweisen und

ist ein typischer Besiedler von Kronenästen. Durch die Schädigung bzw. das Abtöten der Äste trägt er zur Kronenverlichtung und in deren Folge zu verstärkter Besonnung und Sonnenbrand der Kronenäste bei (BRÜCK-DYCKHOFF et al. 2019). Bevorzugte Befallsorte sind süd- und südwestexponierte Bestandesränder, lichte Bestände, freigestellte Bäume, besonders durch Trockenheit vorgeschädigte Bestände bzw. Bäume, frisch gepflanzte Heister und Befallsorte des Vorjahres. Massenvermehrungen folgen auf außergewöhnlich trockene und heiße Jahre. So wurden in Brandenburg seit 2019 zunehmende Schadholzmengen und im Jahr 2020 insgesamt 260 m³ Schadholz gemeldet. Der Flug dieser Wärme liebenden Prachtkäferart erfolgt hauptsächlich von Mai bis Juli. Die Entwicklung vom Ei bis zum Käfer dauert meist 1 bis 2 Jahre. Eine weitere Prachtkäferart, die sich an Rot-Buchen entwickeln kann, ist der stark polyphage Goldgruben-Prachtkäfer (*Chrysobothris affinis* FABRICIUS).

Dem Kleinen Buchenborkenkäfer (*Taphrorychus bicolor* HERBST) wurde in älterer Fachliteratur keine nennenswerte forstwirtschaftliche Bedeutung beigegeben (z. B. SCHWERDTFEGER 1981). Unter den einheimischen Baumarten besiedelt er Rot-Buche, Hainbuche, Trauben- und Stiel-Eiche (PFEFFER 1995). Die rindenbrütende Borkenkäferart entwickelt sich in der Regel an abgestorbenen und absterbenden Ästen und Stämmen sowie an liegenden Hölzern (Abb. 6). Nach überdurchschnittlich trockenen und heißen Sommern werden auch lebende vorgeschädigte Rot-Buchen besiedelt und weitergehende Schädigungen verursacht bzw. die Regeneration der Bäume verhindert oder verzögert (DELB 2004). Bevorzugte Befallsorte sind lichte Bestände, vorgeschädigte Bestände bzw. Bäume, Bestandesränder und Befallsorte des Vorjahres. In Brandenburg wurden Schäden durch den Kleinen Buchenborkenkäfer ab 2019 auffällig. Die größte, bis-



Abb. 6: Brutbilder des Kleinen Buchenborkenkäfers (Foto: K. Hielscher)

her für Brandenburg gemeldete Schadholzmenge lag im Jahr 2020 bei 1.355 m³. In der Regel entwickeln sich zwei Generationen pro Jahr mit Hauptflugzeiten im März und Mai/Juni.

Eine weitere kleine, an Rot-Buchen vorkommende rindenbrütende Borkenkäferart ist *Ernoporicus fagi* FABRICIUS (Abb. 7). Die Art, deren forstwirtschaftliche Bedeutung als geringer eingeschätzt wird (DELB 2004), besiedelt absterbende Äste und Zweige. Aufgrund der großen Ähnlichkeit der besiedelten Habitatstrukturen und der Brutbilder können *Ernoporicus fagi* und der Kleine Buchenborkenkäfer leicht verwechselt werden.



Abb. 7: *Ernoporicus fagi* (Foto: K. Hielscher)

Der Sägehörnige Werftkäfer (*Hylecoetus dermestoides* L.), ein stark polyphag lebender Holzbrüter, kann sich an der Mehrzahl der heimischen Laub- und Nadelbaumarten entwickeln. Seine bevorzugten Wirtsbaumarten sind jedoch Rot-Buche und Eichenarten (Abb. 8). Er besiedelt bevorzugt Stubben, feucht liegende Hölzer und stehende Bäume mit Rindenschäden, wie sie z. B. im fortgeschrittenen Verlauf der Komplexkrankheit Buchenrindennekrose entstehen.



Abb. 8: Ausschlupflöcher des Sägehörnigen Werftkäfers am Stamm einer Rot-Buche (Foto: K. Hielscher)

Der Laubnutzholzborkenkäfer oder auch Buchennutzholzborkenkäfer (*Trypodendron domesticum* L.) entwickelt sich polyphag an vielen Laubbaumarten. Die namensgebende Rot-Buche zählt zu den häufig besiedelten Wirtsbaumarten dieses holzbrütenden Borkenkäfers. PARINI & PETERCORD (2006) beschrieben die Besiedlung scheinbar vitaler Rot-Buchen durch *Trypodendron domesticum* in der deutsch-belgisch-luxemburgischen Grenzregion. Nekrosen in der Bastsschicht, die durch das Saugen der Buchenwollschildlaus entstanden sein könnten, wurden von den Autoren als möglicher Auslöser des Befalls angesehen. Die Gänge des Brutsystems können im weiteren Verlauf auch holzzerstörenden Pilzen als Eintrittspforte dienen (Abb. 9).

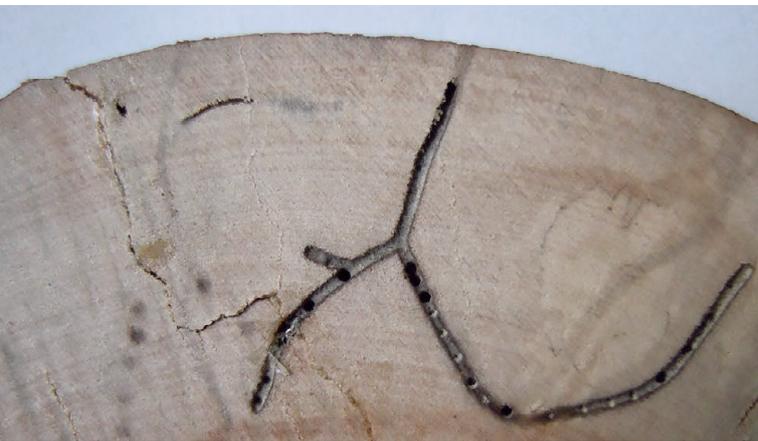


Abb. 9: Brutsysteme von Nutzholzborkenkäfern (*Trypodendron spec.*) (Foto: K. Hielscher)

Der Linierte Laubnutzholzborkenkäfer oder auch Eichennutzholzborkenkäfer (*Trypodendron signatum* FABRICIUS) vollzieht seine Larvalentwicklung polyphag an einer Vielzahl von Laubbaumarten. Eichen werden von dieser holzbrütenden Borkenkäferart als Brutsubstrat bevorzugt, jedoch auch die Rot-Buche zählt zur Liste der Wirtsbaumarten.

Beide *Trypodendron*-Arten besiedelten in Belgien scheinbar vitale Rot-Buchen, die jedoch sämtlich in einem Bereich wuchsen, in dem die Rot-Buchen zuvor unter außergewöhnlichem Frost gelitten hatten (HENIN et al. 2003).



Abb. 10: Brutsystem des Ungleichen Holzbohrers (Foto: K. Hielscher)

Eine weitere holzbrütende Borkenkäferart, der Ungleiche Holzbohrer (*Xyleborus dispar* FABRICIUS) lebt polyphag an einer Vielzahl von Laubbaumarten und kann auch Rot-Buchen besiedeln. Schäden verursacht dieser Holzbohrer insbesondere durch das Abtöten von Jungpflanzen und Heistern (Abb. 10).

Blatffressende Insekten

Der Rotschwanz, Buchen-Streckfuß oder Buchenrotschwanz (*Calliteara pudibunda* L.) entwickelte in Mitteleuropa nicht selten lokale Massenvermehrungen. Sie begannen immer in Altbuchenbeständen, von wo aus sie später auf jüngere Pflanzen übergingen (VELDMANN & BIEHL 1986). Die stark polyphage Raupe frisst in Mitteleuropa hauptsächlich an Rot- und Hainbuchen, kann jedoch nahezu alle Laubbaum- und Straucharten befallen (VELDMANN & BIEHL 1986). Auslöser der von den oben genannten Autoren beschriebenen Massenvermehrung im Hainich waren die trockenen und warmen Sommer 1982/1983. Die Fraßschäden erscheinen oft desaströs, entstehen jedoch erst im Spätsommer, so dass die Entwicklung der Knospen für das Folgejahr nicht mehr beeinträchtigt wird (VELDMANN & BIEHL 1986). Einjährige Jungpflanzen überleben Kahlfraß zumeist nicht, ältere Pflanzen werden in der Regel nicht wesentlich beeinträchtigt (VELDMANN & BIEHL 1986, ALTENKIRCH et al. 2002).

Die polyphagen Raupen der Nonne (*Lymantria monacha* L.) bevorzugen als Nahrung die Nadeln diverser Nadelbaumarten. In Fichten- und Kiefernbeständen durchlaufen sie wiederholte Massenvermehrungen. Sie fressen jedoch auch an den Blättern von Rot-Buchen und selten an anderen Laubbaumarten (ALTENKIRCH et al. 2002, PRIEN 2016). An Rot-Buche und Lärche verläuft die Larvalentwicklung schneller als an Eiche, Fichte oder Kiefer (MAJUNKE et al. 2004). Laubbäume überstehen einmaligen Kahlfraß in der Regel ohne nennenswerte Ausfälle (MAJUNKE et al. 2004). Massenvermehrungen enden meist erst nach starken Fraßschäden und unter Beteiligung natürlicher Gegenspieler bzw. durch Erkrankungen der Raupen.

Die stark polyphagen Raupen des Schwammspinners (*Lymantria dispar* L.) bevorzugen als Nahrungspflanzen Eichen, Hainbuche, Rot-Buche, Obstbäume, Lärchen und Birken.

Der Buchen-Frostspanner (*Operophtera fagata* SCHARFENBERG) durchläuft seine Larvalentwicklung zumeist an Rot-Buche oder Hänge-Birke sowie seltener an weiteren Laubbaumarten (SCHWENKE 1978). Die Raupen fressen an Pflanzen aller Altersklassen. Gelegentlich verursachen sie auffällige Fraßschäden an jungen Rot-Buchen (PRIEN 2016).

Die Raupe des Kleinen Forstspanners (*Operophtera brumata* L.) ernährt sich stark polyphag (Abb. 11). Ca. 100 Wirtspflanzenarten sind bekannt, bevorzugt werden z. B. Eichen, Ulmen, Obstbäume, Hainbuche und Ahorn (SCHWENKE 1978, EPP0 2021). Die Entwicklung der Raupen wird maßgeblich durch die Koin-

zidenz des Austriebs der Knospen mit dem Schlupf der Raupen aus dem Ei bestimmt (SCHWENKE 1978, SINGER und PARMESAN 2010, MANNAI et al. 2017). Starker Zeitversatz beider Termine kann eine hohe Mortalitätsrate des ersten Raupenstadiums verursachen. Massenvermehrungen laufen in Mitteleuropa meist in Eichen- oder Eichenmischbeständen ab. In Südeuropa waren auch Rot-Buchenbestände stärker betroffen (SCHWENKE 1978).



Abb. 11: Raupe des Kleinen Frostspanners (Foto: K. Hielscher)

Der Große Frostspanner (*Erannis defoliaria* CLERCK) lebt als Raupe stark polyphag an Laubbäumen und bevorzugt Eichen, Hainbuche und Obstbäume als Fraßpflanzen (Abb. 12). Nicht selten fressen die Raupen auch an Pappeln, Ulmen, Birken und Linden (SCHWENKE 1978). Im Norden Brandenburgs bei Schönhorn wurden im Frühjahr 2005 die Blätter von Eichen und Rot-Buchen vornehmlich durch Große Frostspanner beschädigt (MÖLLER, mdl.).



Abb. 12: Raupe des Großen Frostspanners (Foto: K. Hielscher)

Verschiedene Frostspannerarten treten oft vergesellschaftet auf. Raupenfraß an Rot-Buchenblättern durch Frostspanner wurde in Brandenburg zuletzt von 2012 bis 2014 mit abnehmendem Umfang der geschädigten Flächen gemeldet. Die maximale Flächengröße der überwiegend merklichen und nur selten starken Schäden belief sich auf 55 ha im Jahr 2012.

Auch der polyphage Eichenspinner (*Lasiocampa quercus* L.) kann seine Larvalentwicklung an jungen Rot-Buchen durchlaufen. So wurden z. B. im Jahr 2003 Rot-Buchenvoranbauten im Amt für Forstwirtschaft Kyritz sichtbar befallen.

Die Raupen vieler weiterer mehr oder weniger polyphager Schmetterlingsarten können an den Blättern der Rot-Buche gefunden werden (Abb. 13).



Abb. 13: Jüngere Raupenstadien des Nagelflecks (*Aglia tau* L.) (Foto: K. Hielscher)

Der im Käferstadium leicht zu übersehende Buchenspringgrüssler (*Orchestes fagi* L.) hat im Vergleich zu anderen Bundesländern in Brandenburg bisher nicht so ausgeprägte Schäden verursacht. Die Larven leben in Blattminen, die nur an der Rot-Buche angelegt werden. Die Käfer fressen bevorzugt an den Blättern der Rot-Buche sowie gelegentlich an den Blättern anderer Laubbaumarten, wie z. B. an Obstbäumen und Erlen (METZLER & BUBLITZ 2014). Der Fraß kann das Absterben von Blattbereichen sowie ganzen Blättern oder das vorzeitige Abfallen der Blätter verursachen (HARTMANN & BUTIN 2017). Bei starker Vermehrung können Zuwachseinbußen oder eine reduzierte Bucheckernmast resultieren, von einer nachhaltigen Schädigung der Rot-Buchen wird jedoch nicht ausgegangen (METZLER & BUBLITZ 2014).

Saugende Insektenarten

Die Buchenwollschildlaus (*Cryptococcus fagisuga* LINDINGER), die durch weiße Wachswollebeläge an den Stämmen von Rot-Buchen auffällt, wurde in Brandenburg in den letzten Jahren kleinflächig nachgewiesen. Die Meldungen aus den Forstrevieren lagen seit 2012 bei jährlich maximal 9 ha Forstfläche mit mindestens 20 % besiedelten Rot-Buchen. Dürrejahre, wie zunehmend zu erwarten, fördern die Vermehrung der Schildlaus, die vitale Bäume besiedelt und durch den Wind verbreitet wird (ALTENKIRCH et al. 2002). Sie wird als ein auslösender Faktor des komplexen Krankheitsbildes der Buchenrindennekrose angesehen (Abb. 14, 15).

Die Kolonien der Gemeinen Buchenzierrlaus bzw. Buchenblattbaumlau (*Phyllaphis fagi* L.) befinden sich auf der Unterseite der Blätter und bewirken, dass sich



Abb. 14: Buchenwolschildläuse am Stamm
(Foto: K. Hielscher)

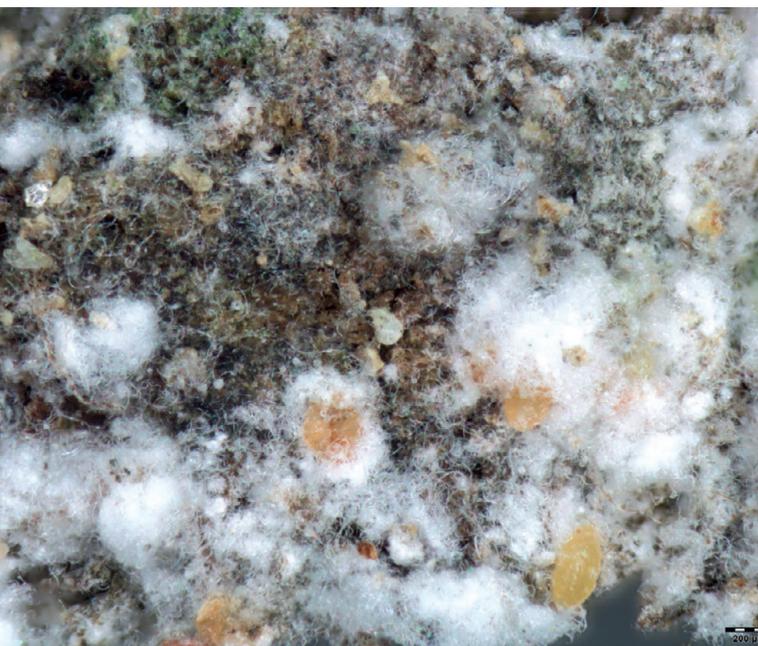


Abb. 15: Buchenwolschildläuse, von Wachswolle umgeben
(Foto: K. Hielscher)

das Blatt nach unten einrollt (Abb. 16). Auch vorzeitige Blattverluste sind bei starkem Befall möglich. Die Buchenblattbaumlaus hat als Honigtauerzeugerin Bedeutung als Nahrungsquelle für Bienen (SCHMUTTERER 1952).



Abb. 16: Buchenblattbaumläuse an einer Blut-Buche
(Foto: K. Hielscher)

Die Buchenkrebslaus (*Lachnus pallipes* HARTIG) wurde mehrfach an Proben aus Mecklenburg-Vorpommern nachgewiesen und hat dort intensive Schäden in Jungwüchsen verursacht (MÖLLER, mdl.). Sie lebt auf der Rinde von Zweigen, Ästen und Stämmen und verursacht durch ihre saugende Nahrungsaufnahme das Aufplatzen der Rinde und beulige Auftreibungen der Befallsstellen. Junge Pflanzen können befallsbedingt auch absterben (NIESAR 2010). Auffällig ist die Vergesellschaftung mit Waldameisen (*Formica*-Arten).

Gallbildende Tierarten

In Brandenburg sind an den Blättern der Rot-Buche besonders häufig die Gallen der Buchenblattgallmücke (*Mikiola fagi* HARTIG) und seltener die Gallen der Kleinen Buchengallmücke (*Hartigiola annulipes* HARTIG) zu finden (Abb. 17, 18). Neben Gallmückenarten, zu denen an der Rot-Buche auch *Phegomyia fagicola* KIEFFER zählt (Abb. 19), beherbergen Buchenblätter auch die filzigen Gallbildungen von Gallmilben, wie



Abb. 17: Gallen der Buchenblattgallmücke (*Mikiola fagi*)
(Foto: K. Hielscher)

Aceria nervisequus CANESTRINI (Abb. 20, 21) und *Aceria stenaspis* NALEPA (Abb. 22). *Mikiola fagi* erreichte in Brandenburg z. B. im Jahr 2010 auffällig hohe Dichten, so dass manchmal fast jedes Blatt betroffen zu sein scheint.



Abb. 18: Gallen der Kleinen Buchengallmücke (*Hartigia annulipes*) (Foto: K. Hielscher)



Abb. 21: Filzrasen der Gallmilbe *Aceria nervisequus* zwischen den Blattnerven (Foto: K. Hielscher)



Abb. 19: Gallen der Gallmücke *Phegomyia fagicola* (Foto: K. Hielscher)



Abb. 22: Eingerollter Blatttrand durch die Gallmilbe *Aceria stenaspis* (Foto: K. Hielscher)



Abb. 20: Filzrasen der Gallmilbe *Aceria nervisequus* an Blattnerven (Foto: K. Hielscher)

Eingeschleppte Insektenarten und potenzielle Gefahren

Der Schwarze Nutzholzborkenkäfer (*Xylosandrus germanus* BLANDFORD) ist in Ostasien beheimatet und wurde von dort wahrscheinlich mit Holztransporten nach Nordamerika und vor 1952 auch nach Deutschland verschleppt (FREUDE et al. 1981). Von Deutschland ausgehend breitete er sich in viele weitere Länder Europas aus. Die Rot-Buche zählt zu den bevorzugten Wirtsbaumarten des stark polyphagen Schwarzen Nutzholzborkenkäfers (FREUDE et al. 1981). Er besiedelt ein breites Spektrum an Substraten von jungen Bäumen bis zu Stubben sowie von vorgeschädigten Bäumen bis zu Totholz. Von Pflanzenschutzmittelbehandlungen ist der Schwarze Nutzholzborkenkäfer als einzige holzbrütende Borkenkäferart aufgrund der Zu-

lassungssituation ausgenommen.

Der Asiatische Laubholzbock (ALB, *Anoplophora glabripennis* MOTSCHULSKY) ist in der EU als prioritärer Unionsquarantäneschädling eingestuft (Durchführungsverordnung (EU) 2019/2072 der Kommission vom 28. November 2019, Delegierte Verordnung (EU) 2019/1702 der Kommission vom 1. August 2019). In anderen deutschen Bundesländern gab oder gibt es bereits Vorkommen im Freiland (z. B. Bayern, Nordrhein-Westfalen, Sachsen-Anhalt), so dass die Einschleppungsgefahr für diese Art auch in Brandenburg als besonders hoch eingeschätzt werden kann. Die Rot-Buche zählt zwar nicht zu den Hauptwirtsbaumarten des ALB, sie wurde jedoch in Deutschland sowie Österreich bereits besiedelt und ist für die komplette Entwicklung vom Ei bis zum Käfer geeignet (JKI 2016).

Die Rot-Buche wäre auch ein geeigneter Wirtsbaum für weitere Unionsquarantäneschädlinge, wie z. B. den als prioritär eingestuften Citrusbock (CLB, *Anoplophora chinensis* FORSTER).

Komplexe Erkrankungen der Rot-Buche

Rot-Buchen können aufgrund wechselnder Kombinationen abiotischer Ursachen und biotischer Verursacher mit fließenden Übergängen so weit geschädigt werden, dass sie über kurz oder lang absterben (ALTENKIRCH et al. 2002). Die seit Jahrzehnten bekannte Buchenrindennekrose, eine komplexe Erkrankung unter Beteiligung der Buchenwollschildlaus, des Pilzes *Neonectria coccinea* (PERS.) ROSSMAN & SAMUELS sowie ggf. weiterer Pilzarten und holzbrütender Insektenarten entwickelt sich nach milden Wintern mit großen Niederschlagssummen sowie anhaltend hoher Feuchtigkeit und nach starkem Befall durch die Buchenwollschildlaus, die durch warme, trockene Sommer gefördert wird (BRESSEM 2008, Abb. 23). Während des aktuellen Schadgeschehens seit 2018 in Brandenburg wurde diese Form einer komplexen Erkrankung weniger häufig festgestellt.

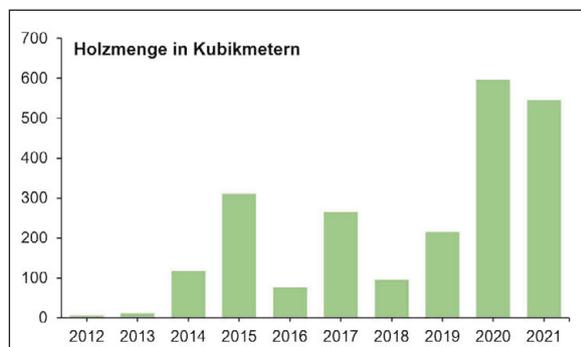


Abb. 23: Schadholzmengen mit Buchenrindennekrose in Brandenburg in den letzten zehn Jahren (Stand 31.07.2021)

Typisch für Brandenburg sind im aktuellen Krankheitsgeschehen eher Trocken- und Hitzeschäden mit Folgebesiedlern bzw. die Buchenvitalitätsschwäche (vgl. auch MÖLLER et al. 2020, 2021, Abb. 24). Seit 2019 zeigen hier viele Altbuchen Zopffrocknis, das Absterben von Kro-

nenteilen oder der ganzen Oberkrone. BRESSEM (2008) beschreibt die Buchenvitalitätsschwäche als bevorzugt in aufgelichteten Beständen, an relativ freistehenden Altbuchen und an südexponierten Rändern auftretende, durch Hitze und Trockenheit ausgelöste Schädigung, die durch Bestandesauflichtung gefördert und oft durch rindenbrütende Käferarten verstärkt wird. Auch LANGER et al. (2020) beobachteten in Nordwestdeutschland seit Herbst 2018 hauptsächlich das Schadbild der Buchenvitalitätsschwäche, das anfangs prädisponierte oder vorgeschädigte Rot-Buchen betraf, jedoch später alle Altersklassen und auch günstige Standorte erfasste. Die beschriebene Vitalitätsschwäche wird von einer Vielzahl von Pilzarten begleitet (LANGER et al. 2020). Aus Mecklenburg-Vorpommern und Thüringen berichten Jansen (2021) und WENZEL et al. (2021) über massive Trockenschäden an Rot-Buchen und die z. T. nachfolgende Besiedelung durch Rindenbrüter.



Abb. 24: Ausschnitt einer Rot-Buchenkronen mit deutlicher Vitalitätsminderung (Foto: K. Hielscher)

Ein Teil der Rot-Buchen scheint in Brandenburg auch durch extremen Trockenstress ohne nennenswerte Beteiligung von biotischen Schadursachen abgestorben zu sein.

Rot-Buche als Lebensraum

Rot-Buchen bieten im Vergleich zu Eichen einem weniger umfangreichen Artenspektrum an phytophagen Insekten Lebensraum. Andererseits werden sie von einer Reihe naturschutzrelevanter Arten besiedelt. Im Folgenden werden nur wenige Beispielarten genannt. Der Eremit (*Osmoderma eremita* SCOPOLI) steht stellvertretend für die Lebensgemeinschaft der Baumhöhlen. Seine Larven entwickeln sich im feuchten Mulm meist großvolumiger Baumhöhlen in einer Vielzahl von Laubbaumarten. Bevorzugte Wirtsbaumarten sind Eichen, Linden und Rot-Buchen.

Ein weiterer Baumhöhlenbewohner ist der sehr seltene Veilchenblaue Wurzelhalsschnellkäfer (*Limoniscus violaceus* MÜLLER). Seine Larvalentwicklung vollzieht sich in bis zum Boden reichenden, mulmgefüllten Baumhöhlen in Rot-Buchen oder Ulmen.

Der Hirschkäfer (*Lucanus cervus* L.) entwickelt sich an morschen Stubben, morschen Wurzeln lebender Bäume oder Totholz mit Bodenkontakt. Viele Baumarten wie auch die Rot-Buche sind als Wirte für die Larvalentwicklung geeignet. Das langsame, mehrjährige Wachstum der Larven erfordert möglichst langsam verrottende Holzsubstrate, die über mehrere Jahre als Nahrungsquelle dienen können.

Gemeinsam ist diesen drei Beispielarten, dass sie aufgrund ihrer relativ geringen Ausbreitungsfähigkeit auf ein kontinuierliches Angebot geeigneter Brutbäume bzw. Brutsubstrate angewiesen sind. Sonderstrukturen an Rot-Buchen, wie Baumhöhlen, Pilzfruchtkörper, Abbrüche, Risse, Spalten und stehende Wurzelteller bilden Lebensräume für eine Vielzahl von Insektenarten sowie auch für Vögel und Fledermäuse (WINTER et al. 2005, Abb. 25).



Abb. 25: Rot-Buche mit vielfältigen Sonderstrukturen (Foto: K. Hielscher)

Zusammenfassung

Auffällig ist, dass die meisten der in diesem Beitrag aufgeführten Tierarten, die Rot-Buchen schädigen können, polyphage Arten sind, die in ihrer Entwicklung nicht ausschließlich von Rot-Buchen abhängig sind.

Abiotisch bedingte Vorschädigungen und Absterbeerscheinungen, ausgelöst durch die überdurchschnittliche Trockenheit und Wärme der Jahre 2018 bis 2020, haben die Eignung der Rot-Buche für phytophage Folgebesiedler erhöht. Die zunehmenden Schadh Holzmeldungen für Buchenprachtkäfer, den Kleinen Buchenborkenkäfer und Absterbeerscheinungen spiegeln diese Entwicklung wider. Folgebesiedler tragen zum Absterben von Zweigen, Ästen, Kronenbereichen, Altbäumen und Jungpflanzen bei.

Ergebnisse aus Nordwestdeutschland deuten schon länger darauf hin, dass die Rot-Buche anfälliger für abiotische und biotische Schadfaktoren ist, als lange Zeit angenommen wurde (BRESSEM 2008). In Nordostdeutschland hingegen zeigt die Rot-Buche im Hinblick auf Waldschäden und Waldzustandserhebung erst seit 2018 starke Vitalitätseinbußen (vgl. auch WENNIG & HENTSCHEL 2021). An Rot-Buchen in Brandenburg werden die z. T. komplexen Schadbilder der Buchenvitalitätsschwäche, seltener der Buchenrindennekrose und auch Anzeichen für extremen Trockenstress beobachtet.

Sanitärhiebe sind aufgrund der Verteilung der Käferarten im Bestand, der optisch und jahreszeitlich schwierigen Befallserkennung, der schnellen Holzentwertung, der Probleme der Arbeitssicherheit durch die starke Bruchgefahr und durch die schadensverstärkende Wirkung neu entstandener Bestandeslücken wesentlich schwieriger als in Beständen anderer Baumarten umzusetzen. Aus Waldschutzsicht müssen Rot-Buchen, die unter der Buchenvitalitätsschwäche und Pilzbefall leiden, nicht beseitigt werden (u. a. LANGER et al. 2020). Generell sollten Rot-Buchenbestände nicht oder nur schwach aufgelichtet werden, da sonnenexponierte Bäume stärker durch Trockenheit, Hitze, Sonneneinstrahlung und Wärme liebende Folgebesiedler bedroht sind. Vor dem Hintergrund der auch in Zukunft kaum zu verhindernden abiotischen Vorschädigungen und komplexen Erkrankungen sollte abgewogen werden, wo eine zügige Holznutzung vor Einsetzen der bei der Rot-Buche schnell verlaufenden Holzentwertung und wo das Belassen geschädigter und absterbender Bäume zur Anreicherung von Habitatbäumen und Totholz auch im Hinblick auf den Schutz von Insekten erfolgen soll.

Dank

Besonderer Dank gilt meinen Kolleginnen und Kollegen aus den brandenburgischen Forstrevieren, Oberförstereien und Landeswaldoberförstereien für Meldungen und Hinweise zu Insektenvorkommen und Forstschäden.

Literatur

- ALTENKIRCH, W.; MAJUNKE, C.; OHNESORGE, B. [Hrsg.] (2002): Waldschutz auf ökologischer Grundlage. Ulmer, Stuttgart.
- BRESSEM, U. (2008): Komplexe Erkrankungen an Buche. Beiträge aus der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt 3: 87 - 107.
- BRÜCK-DYCKHOFF, C.; PETERCORD, R.; SCHOPF, R. (2019): Vitality loss of European beech (*Fagus sylvatica* L.) and infestation by the European beech splendour beetle (*Agrilus viridis* L., Buprestidae, Coleoptera). Forest Ecology and Management 432: 150 - 156.
- DELB, H. (2004): Rindenbrüter an Buche. FVA-Waldschutz-Info 4/2004.
- DEUTSCHER WETTERDIENST (2020a): Klimastatusbericht Deutschland Jahr 2018. DWD, Geschäftsbereich Klima und Umwelt, Offenbach, 23 Seiten, www.dwd.de/DE/derdwd/bibliothek/fachpublikationen/selbstverlag/selbstverlag_node.html, <https://www.dwd.de/DE/leistungen/klimastatusbericht/klimastatusbericht.html>
- DEUTSCHER WETTERDIENST (2020b): Klimastatusbericht Deutschland Jahr 2019. DWD, Geschäftsbereich Klima und Umwelt, Offenbach, 23 Seiten, www.dwd.de/DE/derdwd/bibliothek/fachpublikationen/selbstverlag/selbstverlag_node.html, <https://www.dwd.de/DE/leistungen/klimastatusbericht/klimastatusbericht.html>
- DEUTSCHER WETTERDIENST (2021): Klimastatusbericht Deutschland Jahr 2020. DWD, Geschäftsbereich Klima und Umwelt, Offenbach, 29 Seiten, www.dwd.de/DE/derdwd/bibliothek/fachpublikationen/selbstverlag/selbstverlag_node.html, <https://www.dwd.de/DE/leistungen/klimastatusbericht/klimastatusbericht.html>
- EPPO (2021): *Operophtera brumata* (CHEIBR). Hosts. <https://gd.eppo.int/taxon/CHEIBR/hosts>
- FREUDE, H.; HARDE, K. W.; LOHSE, G. A. (1981): Die Käfer Mitteleuropas. 10. Band. Goecke & Evers, Krefeld.
- GÖßWEIN, S. (2014): Fraßschäden an Buchenvorantbauten durch Wurzelbohrer (Lepidoptera, Hepialidae) in Mittelfranken. Forstschutz Aktuell 59: 18 - 22.
- HARTMANN, G.; BUTIN, H. (2017): Farbatlas Waldschäden. 4. Aufl., Ulmer, Stuttgart.
- HENIN, J.-M.; HUART, O.; LEJEUNE, P.; RONDEUX, J. (2003): Qualitative Survey of Five Beech Damaging Coleoptera (Scolytidae and Lymexylonidae) in Wallonia (Southern Belgium). In: MCMANUS, M. L.; LIEBHOLD, A. M. [eds.]: Proceedings: Ecology, Survey and Management of Forest Insects; 2002 September 1-5; Krakow, Poland. Gen. Tech. Rep. NE-311.
- JKI (2016): Notfallplan und Leitlinie zur Bekämpfung des Asiatischen Laubholzbockkäfers *Anoplophora glabripennis* in Deutschland. Bundesanzeiger Bekanntmachung vom 10.01.2017, B5: 2 - 82.
- LANGER, G. J.; BUSSKAMP, J.; LANGER, E. J. (2020): Absterbeerscheinungen bei Rotbuche durch Trockenheit und Wärme. AFZ-DerWald 4/2020: 24 - 27.
- JANSEN, M. (2021): Waldschutzsituation 2020 in Mecklenburg-Vorpommern. AFZ-DerWald 9/2021: 51 - 54.
- MAJUNKE, C.; MÖLLER, K.; FUNKE, M. (2004): Die Nonne. Waldschutz-Merkblatt 52. LFE & MLUR.
- MANNAI, Y.; EZZINE, O.; HAUSMANN, A.; NOUIRA, S.; LAHBIB, M.; JAMAA, B. (2017): Budburst phenology and host use by *Operophtera brumata* (LINNAEUS, 1758) (Lepidoptera: Geometridae) in three Mediterranean oak species. Annals of Forest Science 74: 3. <https://doi.org/10.1007/s13595-016-0600-3>
- METZLER, B.; BUBLITZ, T. (2014): Der Buchenspringrüssler (*Rhynchaenus fagi* L., syn. *Orchestes fagi* L.). Waldschutz-Info 4/2014 der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg.
- MLUK, 2020: Waldzustandsbericht 2020 des Landes Brandenburg. Ministerium für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Klimaschutz des Landes Brandenburg (MLUK), Landeskompetenzzentrum Forst Eberswalde (LFE), Eberswalde.
- MÖLLER, K.; HIELSCHER, K.; WENNING, A.; DAHMS, C. (2020): Waldschutzsituation 2019 in Brandenburg und Berlin. AFZ-DerWald 11/2020: 48 - 52.
- MÖLLER, K.; HIELSCHER, K.; WENNING, A.; DAHMS, C. (2021): Waldschutzsituation 2020 in Brandenburg und Berlin. AFZ-DerWald 9/2021: 47 - 50.
- NIESAR, M. (2010): Waldameisen und Baumläuse schädigen Buchenkultur. Warn- und Informationsmeldung Forst-, Wald- und Baumschutz Nr. 4 vom 05.08.2010.
- NIESAR, M.; ZUBRIK, M.; KUNCA, A. (2013): Waldschutz im Klimawandel. 2. Aufl., Nikara, Slowakei.
- PARINI, C.; PETERCORD, R. (2006): Der Laubnutzholzborkenkäfer *Trypodendron domesticum* L. als Schädling der Rotbuche. Mitteilungen aus der Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz 59/06: 63 - 77.
- PFEFFER, A. (1995): Zentral- und westpaläarktische Borken- und Kernkäfer. Pro Entomologia, Naturhistorisches Museum Basel.
- PRIEN, S. [Hrsg.] (2016): Ökologischer Waldschutz. Ulmer, Stuttgart.
- SCHMUTTERER, H. (1952): Zur Kenntnis der Buchenblattlaus *Phyllaphis fagi* (L.) (Homoptera, Aphidoidea), einer wichtigen Honigtauerzeugerin auf Buche. Anzeiger für Schädlingkunde 25: 1 - 5.

SCHÜTT, P.; SCHUCK, H. J.; STIMM, B. (2011): Lexikon der Baum- und Straucharten. Nikol, Hamburg.

SCHWENKE, W. (1978): Die Forstschädlinge Europas. Schmetterlinge. 3. Band. Parey, Hamburg, Berlin.

SCHWERDTFEGGER, F. (1981): Die Waldkrankheiten. 4. neu bearbeitete Auflage, Parey, Hamburg, Berlin.

SINGER, M. C.; PARMESAN, C. (2010): Phenological asynchrony between herbivorous insects and their hosts: signal of climate change or pre-existing adaptive strategy? *Phil. Trans. R. Soc. B* 365: 3161 - 3176.

VELDMANN, G.; BIEHL, H. (1986): Der Buchenrotschwanz (*Dasychira pudibunda* L.) – ein gradierender Schädling unserer Buchenaltbestände. *Sozialistische Forstwirtschaft* 36: 111, 114 - 115.

WENK, M. (2016): Waldschutz-Merkblatt Nr. 55 – Mäuse. Sonderdruck MLUL [Hrsg.].

WENNING, A.; DAHMS, C. (2021): Pilzliche und pilzähnliche Organismen an Rot-Buche (*Fagus sylvatica*). Eberswalder Forstliche Schriftenreihe 71: in diesem Heft.

WENNING, A.; HENTSCHEL, R. (2021): Der Vitalitätszustand der Buche in Brandenburg. Eberswalder Forstliche Schriftenreihe 71: in diesem Heft.

WENZEL, A.; THIEL, J.; STRACKE, M.; STÜRTZ, M. (2021): Waldschutzsituation 2020 in Thüringen. *AFZ-DerWald* 9/2021: 30 - 33.

WINTER, S.; FLADE, M.; SCHUMACHER, H.; KERSTAN, E.; MÖLLER, G. (2005): The importance of near-natural stand structures for the biocoenosis of lowland beech forests. *Forest Snow and Landscape Research* 79, 1/2: 127 - 144.

Wuchsreaktionen der Rot-Buche auf die Witterung: ausgewählte Ergebnisse von Jahrringanalysen in Nordostdeutschland

Jens Schröder, Marieke van der Maaten-Theunissen, Ernst van der Maaten und Eric A. Thurm

1 Einführung

Das Anpassungsvermögen der Rot-Buche (*Fagus sylvatica* L.) an Witterungsextreme ist seit längerer Zeit Gegenstand vielfältiger wissenschaftlicher Auseinandersetzungen und angewandter forstlicher Forschung (RENNENBERG et al. 2004, GESSLER et al. 2006). Im Mittelpunkt des Interesses stehen dabei die Risiken von Vitalitäts- und Wachstumsschäden durch Trockenstress und die Fähigkeit dieser ökologisch wie wirtschaftlich wichtigen Baumart, mit diesen Risiken umzugehen (FRANK et al. 2015, HENTSCHEL et al. 2016). Obwohl die Ansichten zur „Zukunftsfähigkeit“ der Buche in der angewandten Wissenschaft uneinheitlich sind, gehen viele Publikationen von wachsenden Herausforderungen bis hin zu Bedrohungen für die Rot-Buche in einem Teil ihres aktuellen Areals aus, gerade angesichts des fortschreitenden Klimawandels (METTE et al. 2013; KNUTZEN et al. 2017, LEUSCHNER 2020).

Im Rahmen der jährlichen Waldzustandserhebungen sind seit einigen Jahren zunehmend starke Einschränkungen des Kronenzustands der Rot-Buche in Deutschland zu beobachten (HENTSCHEL 2019, BMEL 2020). Diese Entwicklung, die in anderen Beiträgen der vorliegenden Schrift aufgegriffen wird, korrespondiert mit einer Folge außergewöhnlich trockener Perioden mit überdurchschnittlichen Temperaturen in den Jahren 2018-2020 (LANGER et al. 2020). Gerade der Vergleich mit anderen Jahren zeigt, wie drastisch sich die Witterungsverhältnisse dieser Jahre von der Zeit bis dahin unterscheiden: Für alle drei Jahre wurden z. B. an der Station Potsdam so hohe Durchschnittstem-

peraturen ermittelt wie noch nie zuvor im Zeitraum der dort durchgeführten Messungen (Abb. 1). Das Jahr 2018 war zusätzlich das trockenste dieses Zeitraums.

Die vergangenen drei Jahre sind so etwas wie der vorläufige Höhepunkt einer Entwicklung, die zu gerichteten Verschiebungen in den Wachstumsbedingungen für die Rot-Buche in weiten Gebieten des nordostdeutschen Tieflands führen wird. Im Umgang der waldbaulichen Praxis mit der Baumart stellt sich angesichts der verbreiteten Schäden und Ausfälle die Frage, ob diese sich eventuell schon vor dem akuten Eintreten ankündigen und an geeigneten Indikatoren festgestellt werden könnten. Zu dem breiten Spektrum von biologischen und ökologischen Parametern, die dafür herangezogen werden könnten, gehören auch Veränderungen auf Ebene der Jahrringbildung. Dieser Beitrag stellt auszugsweise anhand von Beispielen einige Erkenntnisse vor, die in dendroökologischen Untersuchungen des Landeskompetenzzentrums Forst Eberswalde (LFE) über die möglichen Einflüsse der Witterung auf die Jahrring- bzw. Zuwachsentwicklung speziell bei Rot-Buche gewonnen werden konnten.

2 Untersuchungsansätze, Methoden und Material

Der Jahrring ist im Kontext dendroökologischer Forschung eine zentrale Größe, von ihm leiten sich sowohl die Biomasse-Produktivität des Baumes als auch seine Potenziale zur Kronenausbildung (Photosynthese) sowie zur Bildung von Speicher- und Abwehrstoffen ab. Seine Größenänderung über die Zeit, die dem

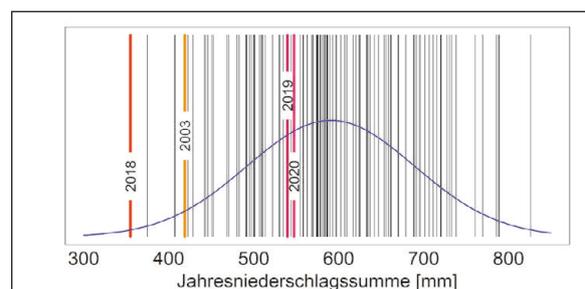
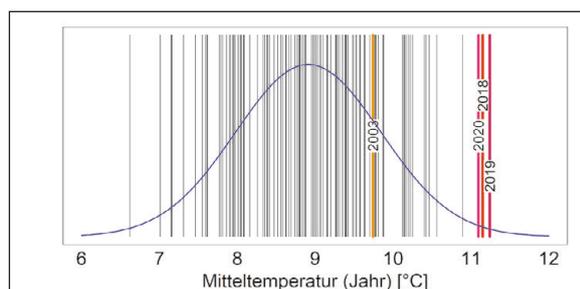


Abb. 1: Mitteltemperaturen und Niederschlagssummen seit 1900 an der Station Potsdam (Quelle: DWD). Jedes Jahr ist durch einen senkrechten Strich repräsentiert, der bisherige Rekord- bzw. „Jahrhundertssommer“ 2003 und die Jahre 2018-2020 sind hervorgehoben.

Radialzuwachs eines Baumes entspricht, wird deshalb als biologischer Indikator für seine Vitalität und sein Wachstumsvermögen gesehen (SCHWEINGRUBER 1996, DOBBERTIN 2005). Um das Verhalten bzw. die Umweltreaktionen von Bäumen und Beständen zu charakterisieren, werden meist nicht nur einzelne markante Jahre betrachtet, sondern die Entwicklung des Wachstums über längere Perioden hinweg (Zeitreihenanalysen) sowie die Zuwachswerte vor, während und nach Extremjahren (LLORET et al. 2011). Zum bestmöglichen Ausschluss von zufälligen Effekten auf Einzelbauebene werden außerdem in der Regel die mittleren Verläufe repräsentativer Stichproben untersucht („Chronologien“, SCHWEINGRUBER 1996).

Für verlässliche Analysen der Witterungs-Zuwachs-Beziehungen ist es notwendig, dass das Witterungssignal in der zeitlichen Varianz der Zuwachswerte so wenig wie möglich durch Konkurrenzeffekte beeinflusst wird. Das lässt sich durch die Auswahl der zu beprobenden Bäume ausschließlich aus dem vorherrschenden bzw. dominanten Bereich gewährleisten. Für jeden Baum wird aus zwei versetzt entnommenen Bohrkernproben der mittlere Einzelbaumverlauf bestimmt. Die resultierenden Messreihen der Jahrringbreiten (JRB) werden in dem am LFE angewandten Standardablauf auf den BHD auf Brusthöhe standardisiert, so dass die doppelte Summe der JRB dem BHD ohne Rinde entspricht (SCHRÖDER 2015). Dadurch lassen sie sich problemlos zur Beurteilung der Wuchsleistung z. B. im Vergleich mit Ertragstafeln verwenden. Zum Zweck der „Ausreißerprüfung“ werden die JRB-Zeitreihen in einem weiteren Schritt in Zeitreihen des relativen BHD überführt – auf dieser Grundlage lassen sich Bäume mit auffällig von der mittleren Bestandesentwicklung abweichendem Wachstumsverlauf ggf. aus der Stichprobe entfernen. Dies trägt zusätzlich dazu bei, dass im abgeleiteten Stichprobenmittel primär die Zusammenhänge zwischen externen, auf alle Bäume des Bestandes erst einmal gleich wirkenden Faktoren wie eben der Witterung enthalten sind (BECK 2009).

Das Vorgehen bei der Gewinnung und Aufbereitung der Jahrringproben für die folgenden Auswertungen entsprach dem oben dargestellten LFE-Standard, der in wesentlichen Teilen auf Empfehlungen von Dr. Wolfgang Beck aufbaut und den wissenschaftlichen Vorgaben in diesem Fachgebiet entspricht (BECK 2009, 2010, SCHRÖDER 2015). Die Stichprobengrößen von jeweils 12-20 Bäumen je Untersuchungseinheit sind der Einheitlichkeit der Versuchsbestände angemessen: Für jede Stichprobe lässt sich die gewünschte Repräsentativität anhand des „expressed population signal“ (EPS) beurteilen, das in allen Fällen oberhalb der in der Fachliteratur (WIGLEY et al. 1984) geforderten Schwelle liegt. Die Bestimmung von Weiserjahren, die ein besonders starkes und besonders einheitliches Abweichen vom mittleren Zuwachstrend anzeigen, folgt dem in SCHRÖDER (2015) vorgestellten Ansatz. Dieser verwendet anstelle der JRB die Jahrringindizes (JRI), die das Verhältnis zwischen tatsächlicher und „erwarteter“ JRB wiedergeben, also um den Wert von 1 variieren. Die erwartete JRB entspricht dem Funktionswert

einer spline-Funktion, die an den Verlauf der JRB über der Zeit angepasst wird (BUNN 2008) und deren Anzahl von Knoten, d. h. deren Flexibilität, zur Länge der Zeitreihe proportional ist. Liegt der Mittelwert zuzüglich der doppelten Standardabweichung aller JRI-Werte eines Jahres unter dem Referenzwert von 1, dann handelt es sich nach dem hier verwendeten Ansatz um ein negatives Weiserjahr, liegt der Mittelwert abzüglich der doppelten Standardabweichung über 1, um ein positives Weiserjahr. Alle jahrringbezogenen Auswertungen erfolgten mit entsprechenden Zusatzpaketen (VAN DER MAATEN-THEUNISSEN et al. 2015, BUNN 2021) in der statistischen Programmierumgebung R (R CORE TEAM 2021).

Die Auswertungsparameter umfassen im Wesentlichen Kennwerte der JRB- und der JRI-Zeitreihen nach BECK (2009) sowie Resilienzkomponenten nach LLORET et al. (2011). Zur ersten Gruppe der Zeitreihen-Kennwerte gehören

- die Autokorrelation (AK), hier betrachtet als AK der ersten Ordnung, d. h. der Pearson-Korrelationskoeffizient zwischen allen Jahreswerte mit ihren jeweiligen Vorjahreswerten,
- die Sensitivität (SEN) als Maß der mittleren Abweichung zwischen Jahreswert und Folgewert, hier berechnet für die JRB-Zeitreihen,
- die Gleichläufigkeit (GLK) als Maß für die Übereinstimmung im Richtungswechsel (Jahr-zu-Jahr-Variabilität) zwischen verschiedenen Zeitreihen.

Die AK kann als Anhaltspunkt für die Fähigkeit des untersuchten Kollektivs angesehen werden, den jährlichen Zuwachs unabhängig von kurzfristigen äußeren Einflüssen autonom zu gewährleisten. Komplementär dazu ermöglicht es die Sensitivität, die Einflussstärke externer Faktoren wie der Witterung abzuschätzen (BECK 2009). Die Gleichläufigkeit ist ein Ähnlichkeitsmaß, das angibt, wie einheitlich das Zuwachsverhalten verläuft, sie ist damit ebenfalls ein Indikator für die Stärke der Umwelteinflüsse (SCHRÖDER et al. 2019). Die genannten Parameter sind jeweils als Mittel für das gesamte jeweils betrachtete Kollektiv angegeben, zum Teil erfolgte auch die getrennte Berechnung für verschiedene Perioden.

Die Resilienz-Kennwerte beschreiben die Wuchsreaktionen der Bäume auf Extrem- bzw. Weiserjahre anhand von JRB oder JRI. Diese Jahre können nach eigenen Motiven ausgewählt werden, oder man betrachtet die durch Modelle wie den oben beschriebenen Ansatz identifizierten Weiserjahre (s. auch VAN DER MAATEN-THEUNISSEN et al. 2015). LLORET et al. (2011) definieren die folgenden drei Parameter:

- Resistance (RT) als Maß für die Stärke der Wuchsreaktion in einem Extremjahr im Verhältnis zum Mittelwert einer Reihe von vorangegangenen Jahren,
- Recovery (RV) als Maß für die Stärke der „Erholung“ nach einem Extremjahr, angegeben als Verhältnis des Zuwachses im Extremjahr zum Mittelwert einer Reihe von darauffolgenden Jahren,

- **Resilience (RC)** als Maß für das Zurückerlangen eines vor dem Extremjahr bestehenden Niveaus, ausgedrückt als Quotient zwischen dem Mittelwert einer Reihe von Folgejahren und dem Mittelwert einer Reihe von vorangegangenen Jahren.

3 Fallbeispiele

3.1 Überregionale Baumartvergleiche im Projekt NaLaMa-nT

Das Verbundprojekt „Nachhaltiges Landmanagement im norddeutschen Tiefland“ (NaLaMa-nT) hat während seiner Laufzeit 2010-2015 vor dem Hintergrund sich ändernder ökologischer, ökonomischer und gesellschaftlicher Rahmenbedingungen Wissens- und Entscheidungsgrundlagen in verschiedenen Sektoren der Landnutzung erarbeitet (ALBERT et al. 2015). Die Modellregionen im Projekt waren die Landkreise Diepholz und Uelzen, der Fläming zwischen Westbrandenburg und dem östlichen Sachsen-Anhalt sowie der Landkreis Oder-Spree in Ostbrandenburg. Im Bereich der Waldbewirtschaftung ging es z. B. um die Frage,

ob es zwischen den regional wichtigen Baumarten Rot-Buche (*Fagus sylvatica*), Eiche (*Quercus robur* und *Q. petraea*), Wald-Kiefer (*Pinus sylvestris*) sowie Douglasie (*Pseudotsuga menziesii*) wesentliche Unterschiede in der Reaktion auf Witterungswirkungen gibt (SCHRÖDER 2017). In den Regionen wurden dazu jeweils vier Reinbestands-Flächen mit den Baumarten ausgewählt, in denen jeweils 20 Bäume beprobt wurden. Das mittlere Alter der Buche betrug 2015 überall etwa 125 Jahre, der Bestand in Oder-Spree ist rund zehn Jahre jünger. Auf Basis der Einzelzeitreihen der JRB erfolgte art- und regionalspezifisch die Herleitung des mittleren JRI-Verlaufs, aus dem wiederum die Weiserjahre für die entsprechenden Bestände abgeleitet wurden. Für die Rot-Buche zeigt sich dabei in der beispielhaften Darstellung der Zeit seit 1950 eine höhere Zahl von Weiserjahren v. a. in Diepholz und im Fläming, während in Oder-Spree deutlich weniger Weiserjahre auftraten (Abb. 2).

Für alle vier Buchenbestände war das Jahr 1976 ein negatives Weiserjahr, in dem der Zuwachs einheitlich und überdurchschnittlich stark zurückging. Ähnliche

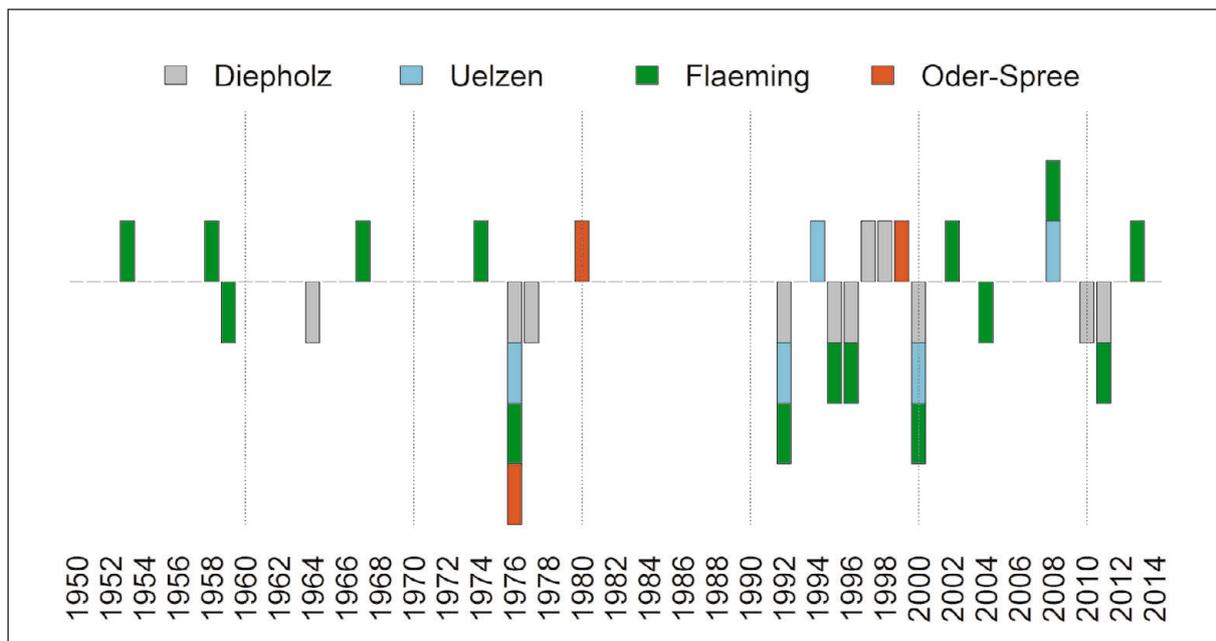


Abb. 2: Weiserjahre der vier Rot-Buchen-Bestände, die im Verbund NaLaMa-nT untersucht wurden. Markierungen oberhalb der waagerechten Mittellinie zeigen positive, Markierungen unterhalb negative Weiserjahre in den durch die verschiedenen Farben gekennzeichneten Regionen an.

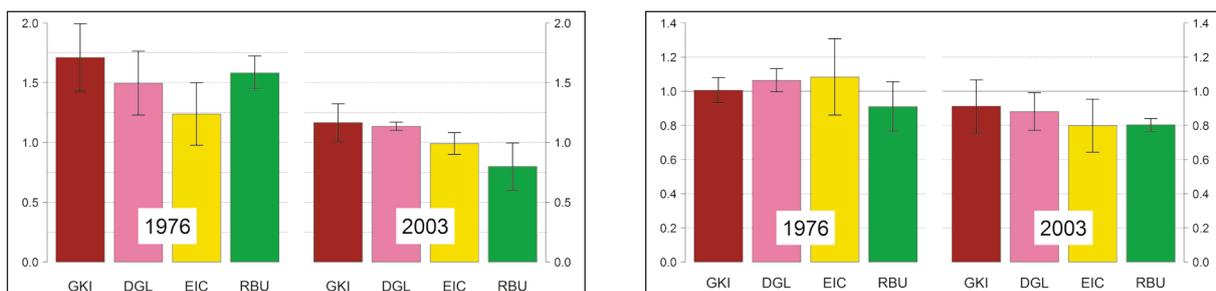


Abb. 3: Recovery (links) und Resilience anhand des Mittels der Jahrringindizes über vier Jahre vor und vier Jahre nach den Weiserjahren 1976 und 2003 für jeweils vier Beispielbestände der Baumarten Kiefer (GKI), Douglasie (DGL), Eiche (EIC) und Rot-Buche (RBU) in den Modellregionen des Projekts NaLaMa-nT (Schröder 2017).

Effekte sind bei anderen Baumarten für 2003 bekannt – da die Buche gerade auf Sommertrockenheit häufig erst im Folgejahr reagiert, drückt sich das in Abb. 2 im Fläming im Weiserjahr 2004 aus. Für 1976 und 2003, in denen die Vegetationsperioden sehr warm und trocken waren, wurden deshalb die oben genannten Resilienzkomponenten berechnet. Im Folgenden sind die Erholung (RV) und die Resilienz (RC) für die vier Baumarten zusammengefasst, wobei die Fehlerspanne der Standardabweichung vom Mittel der vier Regionen entspricht (Abb. 3). Interessanter als die Differenzen zwischen den Baumarten sind hier die durchschnittlich schwächeren Erholungs- und Resilienzwerte aller Arten einschließlich der Buche 2003 im Vergleich zu 1976.

Neben der Zuwachsreaktion auf ausgewählte Jahre wurden für die Beispielbestände auch die Veränderungen von Autokorrelation und Sensitivität in den Zeitreihen über die rekonstruierbare Wachstumszeit hinweg analysiert. Dazu wurden die Perioden von 1955 bis 1984 und von 1985 bis 2014 miteinander verglichen. Es zeigte sich vor allem für die Buche eine deutliche Abnahme der AK bei steigender SEN. Die stärkste Reaktion gerade in der SEN zeigte der Buchenbestand im Fläming, während die AK für Diepholz am deutlichsten zurückging (Abb. 4).

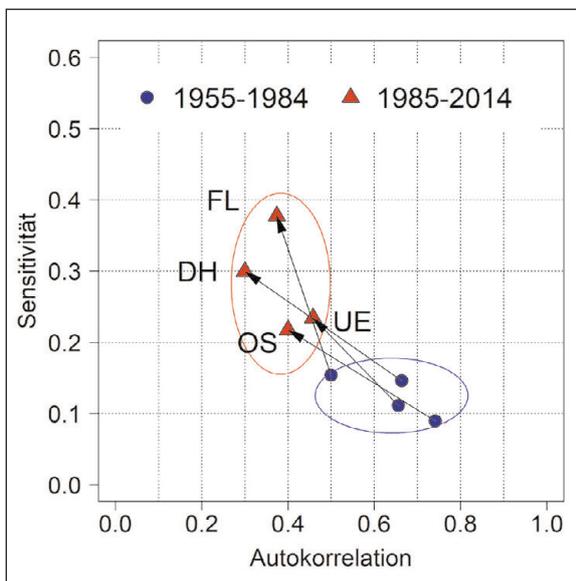
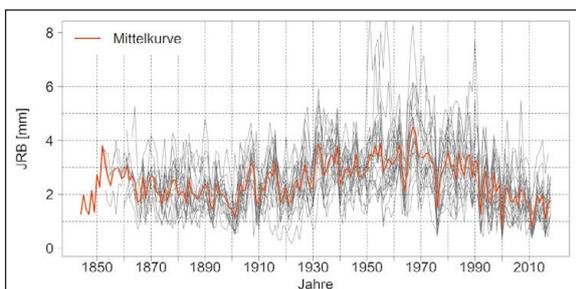


Abb. 4: Mittlere Autokorrelation und Sensitivität für vier Buchenbestände in Norddeutschland im Vergleich der Perioden 1955-1984 und 1985-2014 (DH=Diepholz, FL=Fläming, OS=Oder-Spree, UE=Uelzen)



Die im Projekt vorgenommenen Abschätzungen zu den regionalen Auswirkungen des Klimawandels haben für den Fläming eine relativ starke, für Oder-Spree eine noch größere Zunahme des Trockenstress-Risikos ergeben. Unter den vier betrachteten Baumarten ist davon vor allem die Buche betroffen. Die relativ kleine Zahl von Weiserjahren in Oder-Spree deutet auf einen an die lokalen, für die Buche grenzwertigen Bedingungen gut angepassten Bestand hin, während die höhere Zahl dieser Jahre im Fläming und in Diepholz nahe legt, dass die Jahrringbreiten der Bestände dort schon längere Zeit eng an die klimatische Wasserverfügbarkeit gekoppelt waren und unter Mangelbedingungen schnell „zeichnen“. Die geringere Erholung (als einzige Baumart wächst die Buche z. B. kurz nach 2003 nicht stärker als vor 2003, Abb. 3) und die abnehmende Resilienz auf Basis der JRI können baumartbezogene Stressreaktionsmuster anzeigen (LEUSCHNER 2020). Sie legen auch nahe, dass bei weiter steigendem Trockenstressrisiko für die Buche das Gesamt-Risikopotenzial steigt (KÄTZEL et al. 2017).

3.2 Der Zuwachsverlauf bei älteren Bäumen im Buchenwald Grumsin

Die Untersuchungen des LFE im GenMon-Verbundprojekt (KUNZ 2019) umfassten unter anderem dendrochronologische Auswertungen, um das zurückliegende Wachstum der Bäume zu rekonstruieren. Dazu wurden 20 Bäume eines Altbestandes beprobt, der sich über mehrere Hektar erstreckt und auch genetisch charakterisiert wurde. Die ausgewählten Individuen wiesen bei der Probenahme 2018 Brusthöhendurchmesser zwischen 73 und 95 cm auf, der Grundflächendurchmesser betrug knapp 82 cm. Das Alter auf dieser Höhe lag zwischen 150 und 180 Jahren. Den Wachstumsgang aller Probebäume einschließlich des arithmetischen Mittels aller Zeitreihen zeigt Abb. 5 sowohl für den gesamten rekonstruierbaren Zeitraum als auch – zur besseren Erkennbarkeit – für die letzten einhundert Jahre.

In der Analyse des mittleren Verlaufs zeigt sich nach einem verhaltenen Beginn bis etwa 1900 eine wachstumsstärkere Phase bis Mitte der 1960er Jahre. Von da an bzw. seit dem deutlich sichtbaren Extremjahr 1976 gehen die Jahrringbreiten im Mittel wieder zurück auf ein Niveau zwischen einem und zwei Millimetern pro Jahr. Deutlich sichtbar sind auch teilweise sehr hohe

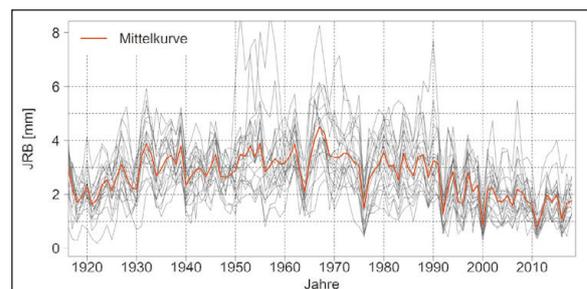
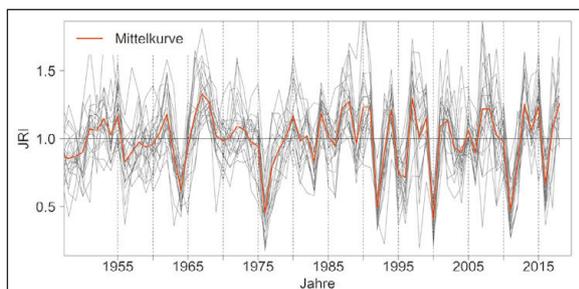


Abb. 5: Verlauf der Jahrringbreitenentwicklung im Untersuchungsbestand Grumsin seit 1844 (links) bzw. hervorgehoben seit 1920.

Zuwächse bei einigen Bäumen Mitte des vergangenen Jahrhunderts – Effekte von Reaktionsholzbildung in einer Phase mit dynamischem Kronenausbau sind hier nicht ganz auszuschließen. Der Zuwachsrückgang ab einem Alter von etwa 100-120 Jahren ist zum Teil sicher auch durch einen normalen Alterstrend geprägt (WEST 2020). Aussagekräftiger als die JRB-Zeitreihen sind in Bezug zu möglichen externen Einflüssen die Zeitreihen der Jahrringindizes sowie die auf dieser Basis abgeleiteten Weiserjahre (Abb. 6). Hier zeigt sich eine auffällige Einheitlichkeit in den Trendabweichungen von Jahr zu Jahr, die seit etwa 1990 noch einmal zunimmt. Die große Parallelität der JRI-Zeitreihen spiegelt sich auch in der relativ hohen Zahl von Weiserjahren, die für diesen Bestand ausgewiesen werden (Abb. 6 rechts). In dieser Darstellung sieht man neben den anhand des üblichen Ansatzes (SCHRÖDER 2015) bestimmten Jahren auch „schwache“ Weiserjahre, in denen das Ende der Box des entsprechenden Box-Whisker-Plots über bzw. unter der Bezugslinie mit dem Wert 1 liegt (entspricht in etwa dem Mittelwert \pm Standardabweichung).

Die JRI-Zeitreihen ergeben seit 1990 vier negative Weiserjahre (1992, 2000, 2004 und 2011); in den vierzig Jahren davor waren es nur zwei (1964 und 1976). Auffällig in den JRI-Zeitreihen wie auch in der Darstellung in Abb. 6 rechts ist die viel stärkere Abweichung nach unten in negativen Weiserjahren im Vergleich zu schwächeren Ausschlägen nach oben in positiven Jahren. Die Zeitreihenparameter zeigen eine ähnliche Dynamik wie im Durchschnitt der NaLa-Ma-nT-Flächen: Während die mittlere AK 1955-1984 noch bei rund 0,44 lag, verringerte sie sich 1985-2014 leicht auf 0,37. Stärker fiel die Steigerung der SEN von 0,25 auf 0,39 aus. Die mittlere Gleichläufigkeit (GLK) zwischen allen Bäumen betrug im Gesamtzeitraum seit 1900 rund 0,70, Auch hier sind jedoch Veränderungen zu beobachten: Von 1900 bis 1959 betrug die mittlere GLK etwa 0,67, von 1960 bis 2018 lag sie bei 0,73. Zwischen den Mittelwerten beider Perioden besteht nach dem t-Test ein statistisch signifikanter Unterschied mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit bei $p < 0,001$. Die Jahrringauswertungen für den Buchenbestand im Grumsin belegen demnach zum einen eine relativ starke Ähnlichkeit im jährlichen Zuwachsverhalten der Bäume, zum anderen eine deutliche Abhängigkeit von der Varianz externer Faktoren. Beides hat sich in den vergangenen Jahrzehnten im Vergleich zu den Jahrzehnten davor gesteigert.



3.3 Buchenvitalität und extreme Witterung: das Vorhaben BuVit

Die zunehmenden Kronenschäden sind nicht nur in Brandenburg, sondern auch in angrenzenden Bundesländern auffällig. Aus diesem Grund initiierte die Landesforst Mecklenburg-Vorpommern 2020 das Vorhaben „BuVit-MV“ (Buchen-Vitalität), an dem auch ThüringenForst, der Nationalpark Hainich, die Technische Universität Dresden mit der Professur für Waldwachstum und Produktion von Holzbiomasse und der Fachbereich Waldressourcenmanagement des LFE beteiligt sind (THURM 2020). Ein Untersuchungsansatz ist die Analyse verschiedener Eigenschaften für Bäume, die kaum geschädigt bis völlig vital erscheinen, im Vergleich zu Bäumen mit deutlich geschädigten Kronen (starker Laubverlust, abnehmende Feinreisigmenge, z. T. Totäste in der Krone). Im Einklang mit dem Fachbereich Waldschutz am LFE (MLUK 2021) werden diese Kronenschäden der verbreiteten „Buchen-vitalitätsschwäche“ nach den Extremjahren 2018 und 2019 zugeordnet, das entsprechende Kollektiv trägt im Folgenden die Charakterisierung „krank“.

Für eine Reihe von beispielhaften Beständen in Mecklenburg-Vorpommern, Thüringen und Brandenburg wird nun untersucht, ob sich die beiden Gruppen („vital“ und „krank“) hinsichtlich bestimmter Merkmale unterscheiden. Für Brandenburg erfolgen die Analysen in zwei Abteilungen (173 und 193) des Reviers Breitefenn in der Landeswald-Oberförsterei Chorin nordöstlich von Eberswalde. Die Abteilungen liegen in einem größeren, von Rot-Buche geprägten Waldgebiet auf nährstoffkräftigen, mäßig frischen Bändersand-Braunerden ohne Grund- oder Stauwassereinfluss in welligem Gelände (GRÜLL 2020, unveröffentlicht). Beide Bestände setzen sich fast vollständig aus Buche zusammen, sind mehrschichtig und weisen eine flächige Naturverjüngung auf. Sie sind auch Gegenstand eigener Arbeiten des LFE zur Vitalität der Buche, die weitere Flächen einschließen (siehe Beitrag von WENNING und HENTSCHEL in diesem Band). Mit den Wirkungen des unterschiedlichen Status‘ der Bäume auf ihr Laubaustriebsverhalten im Frühjahr beschäftigte sich z. B. eine Bachelorarbeit an der Hochschule für nachhaltige Entwicklung Eberswalde, die am LFE betreut wurde (WAGNER 2020).

Ein zentraler Teil der BuVit-Untersuchungen in den Beständen Breitefenn 173 und 193 ist auf die Jahrringent-

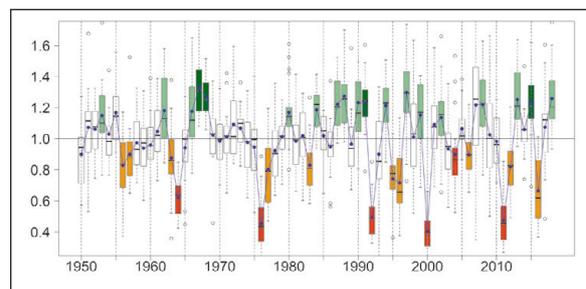


Abb. 6: Zeitreihen des Jahrringindex (JRI) 1950-2018 für die 20 Probestämme im Grumsin (links) sowie abgeleitete Weiserjahre in diesem Zeitraum. Neben den „normalen“ Jahren (grün bzw. rot) sind auch „schwache“ Weiserjahre (hellgrün bzw. orange) dargestellt.

wicklung „krank“ im Vergleich mit „vitalen“ Bäumen gerichtet. Dazu wurden in beiden Beständen durch das Team der TU Dresden Bohrkerne an jeweils 12 Baum-paaren entnommen. Die weitere Aufbereitung und Vermessung der Bohrkerne erfolgte ebenfalls durch die Arbeitsgruppe an der TU Dresden. Die ausgewählten und beprobten Paare bestehen jeweils aus einem als vital und einem als krank angesprochenen Baum, die möglichst nah beieinander stehen. Die Paarbildung sollte eventuelle kleinstandörtliche Effekte als differenzierenden Faktor minimieren. Als Probestämme wurden vorrangig Vertreter der Stammklassen 1 und 2 genutzt. Sie weisen ein mittleres Alter von 127 (Abt. 173) bzw. 135 (Abt. 193) auf, 1,3 m Höhe auf, die jüngsten Bäume sind gut 100, die ältesten 150-155 Jahre alt. Die

BHD-Verteilung der Stichproben aus den beiden Beständen zeigt Abb. 7. Zwischen den Stichproben der Vitalitätsklassen bestehen nach Wilcoxon-Test keine Mittelwertunterschiede, auch von Fläche zu Fläche liegen die BHDs statistisch auf demselben Niveau.

Die Zuwachs- bzw. JRB-Entwicklung über der Zeit wird im Folgenden in der gesamten Länge dargestellt, jeweils getrennt für die Flächen und Vitalitätsklassen (Abb. 8). Für jedes der betrachteten vier Kollektive sowie für die je Fläche zusammengeführten Bäume insgesamt wurden im Lauf der Auswertungen auch die JRI-Zeitreihen und darauf aufbauend die Weiserjahre abgeleitet. Stellvertretend fasst Abb. 9 die Weiserjahre für die „kranken“ und die „vitalen“ Probestämme aus der Abteilung 173 zusammen. Tendenziell zeigen sich in der ersten Untergruppe mehr Weiserjahre als bei den als vital eingeschätzten Bäumen.

Im direkten Vergleich der Bestände und Stichproben in Abb. 10 zeigt sich, dass die Zuwachsverläufe der jeweils 24 Bäume je Fläche quasi einem identischen Muster folgen. Die beiden Bestände, die geografisch nur etwa 500-700 m voneinander entfernt sind, unterliegen denselben Witterungswirkungen und zeigen absolut vergleichbare Reaktionen (Abb. 10). Etwas differenzierter fällt der Vergleich zwischen den Vitalitätsklassen aus: Während die „vitalen“ Bäume der Abt. 193 in den letzten Jahrzehnten im Mittel etwas höhere Zuwächse aufweisen als die der Abt. 173, ist das Verhältnis bei den „kranken“ Bäumen genau umgekehrt (Abb. 10). Stellt man die Gruppen vitaler und kranker Bäume je Fläche gegenüber, dann zeigt sich für die Proben aus Abt. 193 ein auffälliger Unterschied (Abb. 11). Seit etwa 1990 trennen sich die mittleren Zeitreihen der JRB, die heute als „krank“ angesprochenen Bäume bleiben deutlich zurück. Dieser Effekt lässt sich durch einen t-Test der Mittelwerte der Kollektive

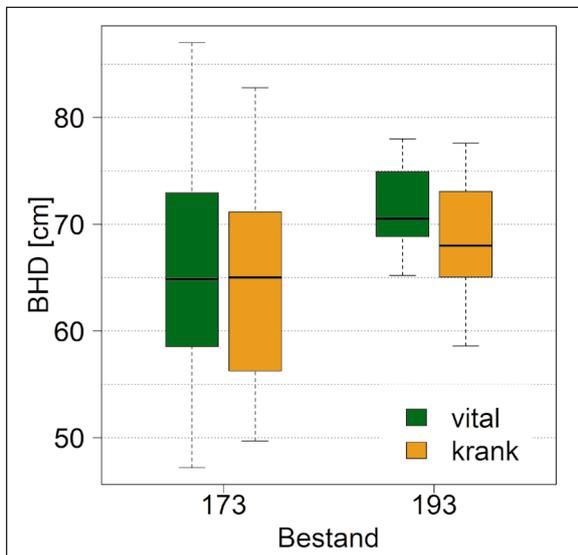


Abb. 7: Verteilung der BHD-Werte für die Untersuchungs-kollektive aus den Buchen-Beständen der Abteilungen Breitefenn 173 und 193

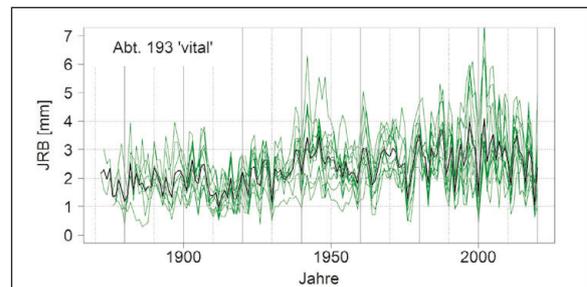
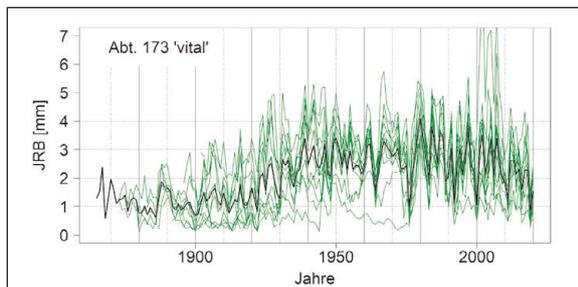
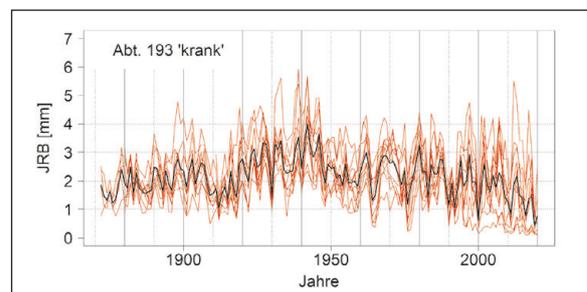
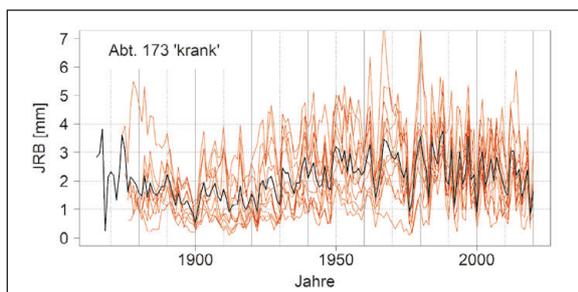


Abb. 8: Zeitreihen der Jahrringbreite (JRB) für die Probestämme der Abteilungen 173 (links) und 193 im Revier Breitefenn sowie für die Kollektive „krank“ (oben) und „vital“. Jede Untergruppe umfasst jeweils zwölf Bäume bis auf 193 „krank“ (elf Bäume).

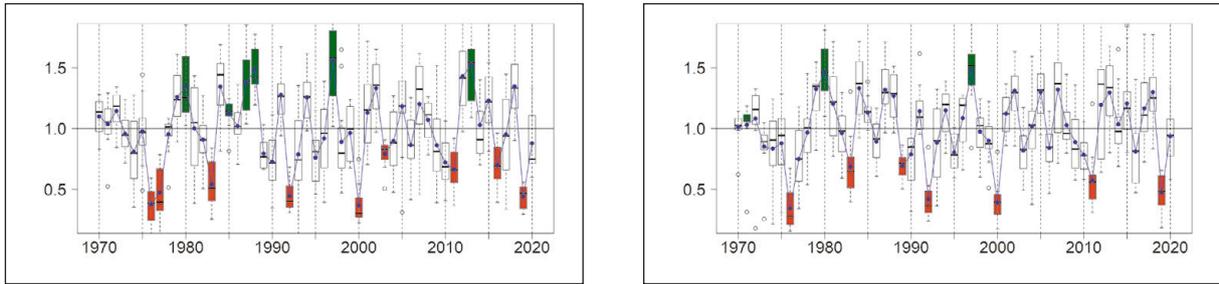


Abb. 9: Weiserjahre im Zuwachsverlauf anhand der Jahrringindex- (JRI-) Zeitreihen für die „kranken“ (links) und die „vitalen“ Prohebäume aus der Abteilung Breitefenn 173. Rot sind negative, grün sind positive Weiserjahre hervorgehoben.

von 1990-2020 belegen. Danach besteht für diese Periode ein statistisch hochsignifikanter Unterschied ($p < 0,001$) zwischen dem Mittelwert der kranken (1,65 mm) und dem der vitalen (2,75 mm) Bäume. Hier deutet sich die Bestätigung einer der Ausgangshypothesen von BuVit an (die Korrelation zwischen Zuwachsverhalten und Vitalität), die sich aber in der Abteilung 173 nicht in dem Maße reproduziert.

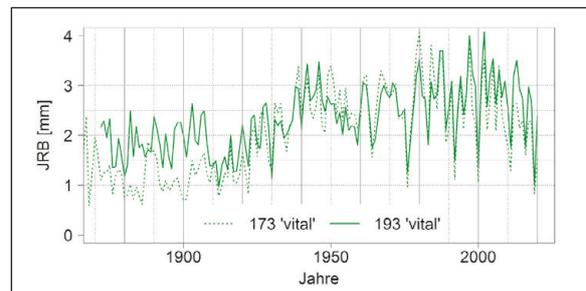
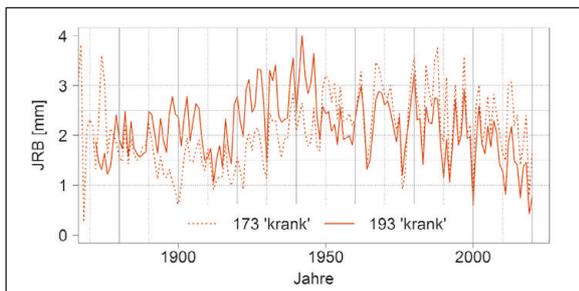
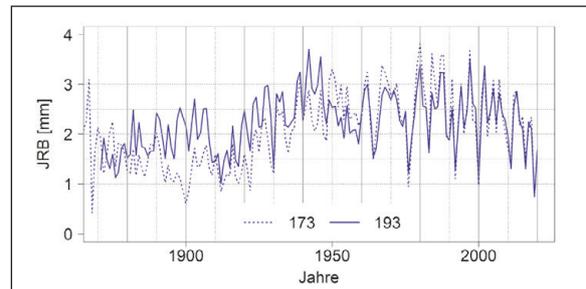


Abb. 10: Zeitreihen der mittleren Jahrringbreite (JRB) für die Prohebäume in den Abteilungen 173 und 193 mit den Kollektiven „krank“ und „vital“ im Vergleich.

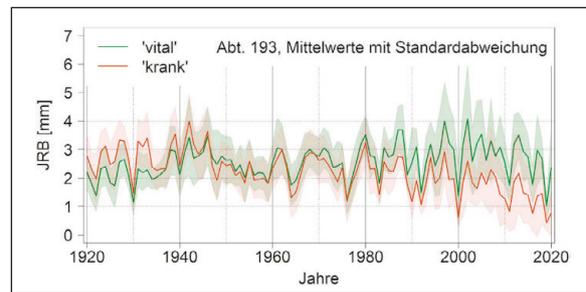
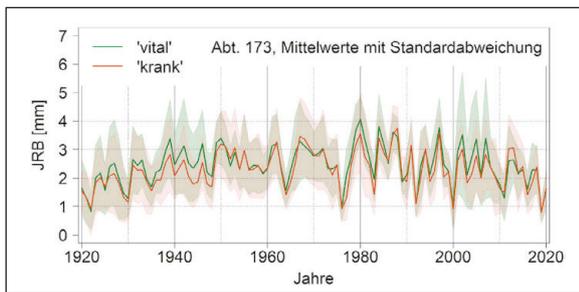


Abb. 11: Entwicklung der mittleren Jahrringbreite (JRB) über die Zeit 1920-2020 für die „vitalen“ und „kranken“ Prohebäume der Abt. 173 und 193. Mit dargestellt ist der Bereich, der jeweils durch die Standardabweichung des Mittelwerts der Teilkollektive abgedeckt wird.

Als letztes sollen auch für die Bestände in Breitefenn die Veränderungen der Zeitreihenparameter betrachtet werden. AK und SEN folgen im Vergleich der Perioden 1955-1984 mit 1985-2014 dem Muster, das auch in 3.1 und 3.2 festgestellt wurde: Von Werten für den Gesamtbestand um 0,48 (Abt. 173) bzw. 0,46 (Abt. 193) ging die AK auf 0,30 bzw. 0,28 zurück, während die SEN von 0,34 auf 0,41 bzw. von 0,30 auf 0,36 anstieg. Die vitalitätsbezogenen Teilkollektive verhielten sich parallel dazu, wobei die vitalen Bäume mit höheren AK starteten, aber auf niedrigere Werte absanken als die kranken. Die SEN lag schon in der

ersten Periode in beiden Abteilungen für die kranken Bäume höher, dies setzte sich auch in den Steigerungen zur zweiten Periode fort. Am stärksten zeigte sich das in der Zunahme der SEN für die kranken Bäume der Abt. 193 von 0,29 auf 0,47. In Bezug auf die GLK wurde nicht weiter nach Perioden unterschieden, die Werte für die letzten 60 Jahre seit 1961 liegen relativ hoch für Abt. 173 (0,75 für die kranken sowie jeweils 0,74 für die vitalen und alle Bäume zusammen). Abt. 193 zeigt geringfügig niedrigere GLK-Werte von 0,70 (krank) bzw. 0,72 (vitale und alle Bäume) für die betrachteten 60 Jahre.

4 Fazit

Als einheitlicher Trend in allen hier vorgestellten Untersuchungen haben sich immer wieder Hinweise auf schwieriger werdende Standortbedingungen und entsprechend „nervöses“, weniger stabiles Zuwachsverhalten der Rot-Buche ergeben. Die in den Beständen im Grumsin und in Breitefenn sichtbare Abnahme der absoluten Radialzuwächse sollte nicht überbewertet werden: Sie entspricht einerseits einem übergeordneten Alterstrend (WEST 2019), andererseits wird nach Überführung der Radial- in biologisch relevantere Kreisflächenzuwächse häufig aus der Abnahme ein mindestens gleichbleibendes Niveau (BECK 2010). Hinsichtlich der Extremjahre in den untersuchten Beständen sind vor allem die Jahre 1976, 1992, 2000 und 2011 auffällig, die für die Fläche im Fläming, für Grumsin und für Breitefenn (beide Abteilungen) negative Weiserjahre waren. Zumindest für Teilkollektive der Breitefenn-Abteilungen belegten die JRI-Zeitreihen auch für 2016 und 2019 negative Weiserjahre.

Die Stabilität und letztlich auch die Resilienz der Waldökosysteme und einzelner Baumarten wie der Rot-Buche folgen u. a. aus dem Verhältnis zwischen der Stärke der Umweltreaktion, die man (mit Einschränkungen) in der Sensitivität und ihrer zeitlichen Entwicklung ablesen kann, und der autonomen Steuerung des Zuwachses auf Basis der eigenen Reserven durch die Bäume (Autokorrelation, BECK 2009). Wünschenswert für ein geringes Risiko beim Anbau der Buche wäre demnach eine möglichst geringe Sensitivität gekoppelt mit hoher Autokorrelation in den Zeitreihen. Dieses Verhältnis gestaltet sich für alle hier dargestellten Versuchsbestände aktuell ungünstiger als noch vor einigen Jahrzehnten. Damit deutet sich für Nordostdeutschland eine wachsende Vulnerabilität der vorhandenen Rot-Buchen-Bestände im Klimawandel und hier besonders der älteren, großen Individuen an, vor allem im Fall von Extremereignissen wie Dürreperioden (METTE et al. 2013, LEUSCHNER 2020). Untersuchungen zum Effekt des Alters bzw. der Baumhöhe auf die Trockenstresstoleranz belegen, dass es einen negativen Zusammenhang zwischen diesen Eigenschaften gibt (z. B. GROTE et al. 2016, WEST 2019). In diesem Licht ist auch verständlich, dass gerade die hohen, starken Individuen in den relativ dicht geschlossenen, mehrschichtigen Untersuchungsbeständen in Breitefenn (und darüber hinaus) die deutlichsten Schäden aufweisen (siehe auch LANGER 2020).

Obwohl dazu noch keine systematische Auswertung für Brandenburg vorliegt, scheint die Intensität der Vitalitätseinbußen nicht nur von der Einzelbaumdimension abzuhängen. Schäden werden besonders aus den Gebieten berichtet, die für die Rot-Buche standörtlich besonders geeignet bewertet sind. An den Rändern, z. B. im Schlaubetal, sind auch nach den Ergebnissen des Projekts NaLaMa-nT (siehe 3.1) die Reaktionen

auf Extremjahre in Wachstum und Vitalität nicht ganz so drastisch und einheitlich, da hier generell schon härtere Bedingungen und damit ein höherer Selektionsdruck herrschen. Für eine andere Region und andere Baumarten haben das auch KAHLE et al. (2007) festgestellt: Die Wirkung von Trockenstress war dort am stärksten, wo die durchschnittlichen Wuchsbedingungen am günstigsten waren (mittlere Höhenlagen mit ausreichend Wasserversorgung). Die Vermutungen werden in Bezug auf die Rot-Buche gestützt durch die Ergebnisse von MUFFLER et al. (2020). Demnach bestehen an den Trockengrenzen der Buchenverbreitung eine geringere Sensitivität gegenüber dem Mangelfaktor Wasser und eine größere Vielfalt in den Zuwachsreaktionen der Einzelbäume auf Umweltwirkungen. Dies führen die Autorinnen und Autoren auf evolutive Prozesse auf Basis eines entsprechend hohen Anpassungsvermögens der Buche an Extrembedingungen zurück.

Interessant aus forstlich-waldbaulicher Sicht ist die von MUFFLER et al. (2020) festgestellte geringere Synchronität im Zuwachsverhalten an den „Trockenrändern“ des Rot-Buchen-Areals. Zur Gewährleistung eines hohen Reaktionsvermögens auf gerichtete Umweltveränderungen ist es wünschenswert, dass das gegebene genetische Potenzial einer Population möglichst breit bzw. divers ist. Vor diesem Hintergrund wäre gerade eine möglichst geringe Gleichläufigkeit in Zuwachszeitreihen ein Zeichen großen Anpassungsvermögens (SCHRÖDER et al. 2019) und umgekehrt eine hohe GLK ein Indikator für Populationen, die sehr eng den Witterungsverläufen folgen (müssen) und damit kaum noch Reserven an Individuen aufweisen, die über abweichende Reaktionsmuster verfügen. Führt man den Gedanken weiter, so ergibt sich daraus, dass die weiter im Vordergrund stehende Naturverjüngung regelmäßig und in möglichst breiter Verteilung durch künstliche Verjüngungsverfahren wie Saat und Pflanzung ergänzt werden sollte, um so die Varianz in der genetischen Ausstattung der Bestände zu steigern.

In zusammenfassender Betrachtung der vorgestellten Untersuchungsergebnisse deuten sich zwar eine Reihe von naheliegenden bzw. biologisch plausiblen Zusammenhängen an, sie treten aber (wie im Fall der zurückbleibenden Jahrringbreiten bei vitalitätsschwächeren Bäumen in Breitefenn) nicht einheitlich auf allen Flächen auf, oder sie beruhen (wie die beobachteten Abnahmen von AK bei steigender SEN auf so gut wie allen Flächen) auf wissenschaftlich nicht allseitig akzeptierten Annahmen und Interpretationen. Dass die Jahrringforschung zum Erkenntnisfortschritt gerade auch auf dem Gebiet der angewandten Klimafolgenforschung (auf dem auch die strategischen Überlegungen zu Baumarteneignung angesiedelt sind) substanziell beitragen kann, lässt sich jedoch schon auf Basis der hier vorgestellten Forschungsprojekte mit Recht festhalten.

Literatur

ALBERT, M.; HANSEN, J.; NAGEL, J.; SCHMIDT, M.; SPELLMANN, H. 2015: Assessing risks and uncertainties in forest dynamics under different management scenarios and climate change. *Forest Ecosystems* (2) 14.

BECK, W. 2009: Growth patterns of forest stands – the response towards pollutants and climatic impact. *iForest* 2: 4–6.

BECK, W. 2010: Auswirkungen von Trockenheit und Hitze auf den Waldzustand in Deutschland - waldwachstumskundliche Ergebnisse der Studie im Auftrag des BMELV. In: J. NAGEL (Hg.): DVFFA, Sektion Ertragskunde: Beiträge zur Jahrestagung in Körbecke: 56–65.

BMEL (Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft; Hrsg.) 2021: Ergebnisse der Waldzustandserhebung 2020. <https://www.bmel.de/DE/themen/wald/wald-in-deutschland/waldzustandserhebung.html> (10.10.2021).

BUNN, A. G. 2008: A dendrochronology program library in R (dplR). *Dendrochronologia* 26 (2): 115-124.

Bunn, A. G. 2021: R documentation on dplR. <https://www.rdocumentation.org/packages/dplR/versions/1.7.2> (11.10.2021)

DOBBERTIN, M. 2005: Tree growth as indicator of tree vitality and of tree reaction to environmental stress: a review. *European Journal of Forest Research* 124 (4): 319–333.

FRANK, D.; POULTER, B.; SAURER, M. et al. 2015: Water-use efficiency and transpiration across European forests during the Anthropocene. *Nature Climate Change* 5: 579-584, DOI 10.1038/NCLIMATE2614

GESSLER, A.; KEITEL, C.; KREUZWIESER, J. 2006: Potential risks for European beech (*Fagus sylvatica* L.) in a changing climate. *Trees* 21: 1–11.

GROTE, R.; GESSLER, A.; HOMMEL, R. et al. 2016: Importance of tree height and social position for drought-related stress on tree growth and mortality. *Trees* 30: 1467–1482, DOI 10.1007/s00468-016-1446-x

HENTSCHEL, R.; HOMMEL, R.; POSCHENRIEDER, W. et al. 2016: Stomatal conductance and intrinsic water use efficiency in the drought year 2003: a case study of European beech. *Trees* 30: 153–174, DOI 10.1007/s00468-015-1284-2

HENTSCHEL, R. 2019: Waldzustand im Trockenjahr 2018 – Ergebnisse aus dem Level I Programm in Brandenburg. *Eberswalder Forstliche Schriftenreihe* 67: 25-32.

KAHLE, H. P.; MUTSCHLER, A.; SPIECKER, H. 2007: Zuwachsreaktionen von Waldbäumen auf Trockenstress. Erste Ergebnisse retrospektiver Analysen in verschiedenen Höhenlagen des Südschwarzwaldes unter be-

sonderer Berücksichtigung der Jahre 1947, 1976 und 2003. In: J. Nagel (Hg.): DVFFA, Sektion Ertragskunde: Beiträge zur Jahrestagung in Alsfeld: 6–16.

KÄTZEL, R.; FLECK, M.; ALBERT, M. 2017: Die Wälder des norddeutschen Tieflandes unter dem Einfluss aktueller und zukünftiger Risikofaktoren – Beispiele für eine Gefährdungsanalyse. *Eberswalder Forstliche Schriftenreihe* 64: 45-54.

KNUTZEN, F.; DULAMSUREN, C.; MEIER, I.C. et al. 2017: Recent Climate Warming-Related Growth Decline Impairs European Beech in the Center of Its Distribution Range. *Ecosystems* 20: 1494–1511. DOI 10.1007/s10021-017-0128-x

KUNZ, M. 2019: Anzeichen des Klimawandels frühzeitig sichtbar machen. *LWF aktuell* 122: 41.

LANGER, G. J.; Busskamp, J.; Langer, E. J. 2020: Absterbeerscheinungen bei Rotbuche durch Trockenheit. In: *AFZ – Der Wald* 75 (4): 24–27.

LEUSCHNER, C. 2020: Drought response of European beech (*Fagus sylvatica* L.) – a review. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*

LLORET, F.; KEELING, E. G.; SALA, A. 2011: Components of tree resilience: effects of successive low-growth episodes in old ponderosa pine forests. *Oikos* 120 (12): 1909–1920.

METTE, T.; DOLOS, K.; MEINARDUS, C. et al. 2013: Climatic turning point for beech and oak under climate change in Central Europe. *Ecosphere* 4 (12): 145.

MLUK (Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Klimaschutz des Landes Brandenburg, Hrsg.) 2020: Diagnosereport 2019. Diagnostische Arbeiten unter besonderer Berücksichtigung pilzlicher Organismen. Eberswalde und Potsdam, 26 S. https://forst.brandenburg.de/sixcms/media.php/9/diagn_19.pdf (12.10.2021).

MUFFLER, L.; WEIGEL, R.; HACKETT-PAIN, A. J. et al. 2020: Lowest drought sensitivity and decreasing growth synchrony towards the dry distribution margin of European beech. *Journal of Biogeography* 47 (9): 1910-1921.

R CORE TEAM 2021: R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.

RENNENBERG, H.; SEILER, W.; MATYSSEK, R.; GESSLER, A.; KREUZWIESER, J. 2004: Die Buche (*Fagus sylvatica* L.) – ein Waldbaum ohne Zukunft im südlichen Mitteleuropa? *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 175 (10/11): 210-224.

SCHRÖDER, J. 2015: Zum Einfluss der Witterung auf Wuchsverhalten und Vitalität der Trauben-Eiche (*Quercus petraea* [Matt.] Liebl.). *Stuttgart/Dresden (Ulmer); Forstwissenschaftliche Beiträge Tharandt* 34.

SCHRÖDER, J. 2017: Vom Kambium zum Totholz? – Drittmittelforschung am LFE. In: „Im Auftrag“: Drittmittelforschung am Landeskompetenzzentrum Forst Eberswalde (LFE). Eberswalder Forstliche Schriftenreihe 64: 13-24.

SCHRÖDER, J.; Baumann, T.; Körner, M. et al. 2019: Douglasie, Küsten-Tanne und Lärche – Wachstumsverlauf und witterungssensitive Zuwachsreaktionen von Hoffnungsträgern in Nordostdeutschland. In: U. Kohnle u. J. Klädtke (Hg.): DVFFA, Sektion Ertragskunde: Beiträge zur Jahrestagung in Zwiesel:161-172.

SCHWEINGRUBER, F. H. 1996: Tree Rings and Environment. Dendroecology. Bern, Stuttgart, Wien: Paul Haupt.

THURM, E. A. 2020: Trockenjahre 2018/2019 und wie weiter? Waldbauliche Optionen im Klimawandel. In: LFoA (Hrsg.). Heft 1 Frühjahr/ Sommer 2020. Beilage Mitarbeitermagazin: 10-15.

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: 34-38, DOI 10.1016/j.dendro.2015.05.006

WAGNER, J. 2020: Phänologische Folgeerscheinungen nach Vitalitätsproblemen an der Rotbuche in Brandenburg. Bachelorarbeit am Fachbereich für Wald und Umwelt der Hochschule für nachhaltige Entwicklung Eberswalde.

WEST, P. D. 2020: Do increasing respiratory costs explain the decline with age of forest growth rate? *Journal of Forestry Research* 31 (3): 693-712.

WIGLEY, T. M. L.; BRIFFA, K. R.; JONES, P. D. 1984: On the Average Value of Correlated Time Series, with Applications in Dendroclimatology and Hydrometeorology. *Journal of Climate and Applied Meteorology* 23: 201-213.

Biochemische Blatthaltsstoffe als Stressindikatoren bei Rot-Buchen

Ralf Kätzel und Sonja Löffler

1 Zur Bewertung der Vitalität auf der Grundlage biochemischer Blatthaltsstoffe

In Anlehnung an TESCHE (1995) ist die „Vitalität“ von Organismen an die Reaktionsfähigkeit gebunden, Belastungen auf der Grundlage des individuellen physiologischen Leistungspotenzials zu ertragen. Dieses physiologische Potenzial spiegelt sich u.a. in biochemischen Prozessen (Energiebereitstellung, Biomasseproduktion, Abwehrpotenzial etc.) und in daran gebundene Inhaltsstoffe wider, die messbar sind und somit als Indikator für den jeweiligen physiologischen Zustand dienen können.

Für die Einschätzung des Gesundheits- resp. Stresszustandes von Bäumen stehen eine Reihe von Indikatoren für unterschiedliche Fragestellungen zur Verfügung. Hierzu gehören u. a. Merkmale zum Kronenzustand (s. Kap. 2), zum Durchmesserwachstum (s. Kap. 5), spezifische Schadsymptome sowie physiologische Parameter (KÄTZEL und LÖFFLER 2016).

Seit 2003 werden von 13 Buchen auf der Level-2-Dauerbeobachtungsfläche Beerenbusch (Menz, 1207) jährlich Blattproben gewonnen und ausgewählte biochemische Inhaltsstoffe untersucht. Diese aus dem Energie-, Primär- und Sekundärstoffwechsel der Bäume extrahierten Inhaltstoffe stehen in enger Beziehung zur stoffwechselfysiologischen Leistungsfähigkeit bzw. zum Stresszustand der Bäume. Aufgrund ihrer Indikatorfunktion werden sie als Biomarker (KÄTZEL 2003) bezeichnet. Allgemein sind Biomarker physiologische und/oder biochemische Parameter, die auf abiotische und biotische Einflüsse reagieren und auf den verschiedenen Organisationsebenen eines Organismus (Molekül, Zelle, Gewebe, Organ) als Maß für die die Wirkung von Umwelteinflüssen quantifiziert werden können (mod. nach ZIMMERMANN 1996). Ob Blatthaltsstoffe als Biomarker genutzt werden können, zeigt sich z.B. bei Stressversuchen, wie nachfolgend am Beispiel von Trockenstressversuchen gezeigt werden soll.

Neben den jährlichen absoluten Gehalten dieser Blatthaltsstoffe sind ihre stöchiometrischen Verhältnisse zueinander (Biomarkermuster), ihre baumindividuelle Variabilität unter nahezu identischen Standortbedingungen und ihre Variabilität über möglichst lange Zeitreihen, insbesondere wenn die Bäume periodischen Stresszuständen ausgesetzt sind, von besonderem Interesse.

2 Referenzbereiche zur Vitalitätsbewertung

Eine Voraussetzung für die Verwendung von quantitativen Bioindikatoren ist die Kenntnis von Referenzbereichen resp. Grenzwerten für den jeweiligen Untersuchungsparameter. Erst der Vergleich der ermittelten Werte mit den vorgegebenen Referenzgrößen ermöglicht eine Bewertung und die Identifizierung von kritischen physiologischen Vitalitätszuständen. Die Festlegung von Referenzbereichen ist nur auf der Grundlage einer möglichst hohen Anzahl vitaler Bäume unter weitgehend stressfreien Bedingungen möglich. Da für die Buche bislang derartige Referenzbereiche für die untersuchten organischen Blatthaltsstoffe fehlen, sollen hier solche Grenzwerte vorgeschlagen werden, wobei zwischen Referenz-, Übergangs- und Warnbereichen unterschieden werden muss.

Grundlage für die Bestimmung dieser Bereiche waren die Mittelwerte (MW) und Standardabweichungen (s) der Untersuchungsjahre 2004 bis 2020 der 13 Probebäumen auf der Versuchsfläche Beerenbusch mit einer jährlichen WZE-Einstufung in den Vitalitätsstufen von 0 bis 0,5, d.h., mit einem visuell eingeschätzten Blattverlust $\leq 10\%$. Aus diesem Ansatz wird deutlich, dass sich sowohl die einbezogenen Bäume als auch ihre Anzahl von Jahr zu Jahr unterscheiden können (Tab. 1). Sowohl 2019 als auch 2020 betrug der Blattverlust bei allen Bäumen mehr als 10 %, so dass aus diesen beiden Jahren keine Werte berücksichtigt werden konnten.

Angesichts der saisonalen Dynamik gelten die hier vorgeschlagenen Vitalitätsbereiche ausschließlich für den Beprobungszeitraum 30. bis 33. Kalenderwoche. Neben dem Referenzbereich (MW $\pm 0,5s$) wird ein oberer und/oder ein unterer Übergangsbereich (MW $\pm 1s$) ermittelt. Darüber hinaus beginnen obere und/oder untere Warnbereiche (Tab. 2).

Werte außerhalb des Vitalitätsbereiches nur eines einzelnen Parameters können durch physiologische Reaktionen im Zuge von Anpassungsprozessen begründet sein und sind nicht zwangsläufig mit einem „Schaden“ gleichzusetzen. Daher müssen mehrere Indikatoren zur Auswertung herangezogen werden. Ferner gelten die hier vorgeschlagenen Bereiche nur für Baumkollektive mit mehr als 10 Bäumen.

Tab. 1: In die Ermittlung der Vitalitätsbereiche einbezogenen Bäume (Baum 4 wurde 2006 durch Baum 4.1 ersetzt)

Baum-Nr./Jahr	1	2	3	4/4.1	5	6	7	8	9	10	11	12	13	Anzahl
2004		x	x	x/-	x	x		x	x	x		x	x	10
2005	x	x	x	x/-	x	x	x	x	x	x			x	11
2006	x	x	x	-/-	x	x	x	x		x	x	x	x	11
2007				-/-						x			x	2
2008			x	-/x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	11
2009	x	x		-/x	x	x	x	x	x	x				9
2010				-/x	x	x		x		x			x	6
2011														0
2012								x		x	x		x	4
2013					x					x			x	3
2014					x			x	x	x			x	5
2015		x	x	-/x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	12
2016										x	x		x	3
2017			x					x		x				3
2018					x			x						2
														92

Tab. 2: Vitalitätsbereiche für ausgewählte biochemische Parameter von vitalen Buchen (Blattverlust 0 - 10 %) unter Zugrundelegung der Bäume aus Tab. 1; Probenahme 30. bis 33. KW (n = 92)

Parameter	Referenzbereich	Übergangsbereich	Warnbereich
Blatt-Trockenmasse [mg]	≥ 120	< 120 - 99	< 99
Wassergehalt [%]	≥ 53,4	< 53,4 – 52,0	< 52,0
Blattfläche [mm ²]	≥ 2124	< 2124 – 1843	< 1843
Osmolalität [osmol kg ⁻¹]	≤ 0,660	> 0,660 – 0,695	> 0,695
Gesamtchlorophyllgehalt [mg g ⁻¹ TM]	≥ 4,82	< 4,82 – 3,89	< 3,89
Verhältnis Gesamtchlorophyll/Carotinoide	≥ 5,23	< 5,23 – 3,30	< 3,30
Lösliche Kohlenhydrate [mg g ⁻¹ TM]	≤ 135 ≥ 121	> 135 – 142 < 121 – 114	> 142 < 114
Stärke [mg g ⁻¹ TM]	≤ 25 ≥ 12	> 25 – 31 < 12 – 6	> 31 < 6
Lösliche Aminosäuren [μmol g ⁻¹ TM]	≤ 9,6	> 9,6 – 10,8	> 10,8
Prolin [μmol g ⁻¹ TM]	≤ 0,53	> 0,53 – 0,70	> 0,70
Prolin [% AS]	≤ 6,6	> 6,6 – 7,7	> 7,7
Proteine [mg g ⁻¹ TM]	≤ 34	> 34 – 40	> 40
Gesamtascorbat [mg g ⁻¹ TM]	≤ 5,0	> 5,0 – 5,7	> 5,7
Folin-positive Verbindungen [μmol g ⁻¹ TM]	≤ 404	> 404 - 447	> 447
Vanillin-positive Verbindungen [μmol g ⁻¹ TM]	≤ 286	> 286 - 326	> 326
Procyanidine [μmol g ⁻¹ TM]	≤ 256	> 256- 289	> 289
Ortho-Dihydroxyphenole [μmol g ⁻¹ TM]	≤ 325	> 325 - 374	> 374

3 Veränderung der Blattinhaltsstoffe bei Wassermangel

3.1 Verlauf von Trockenstressreaktionen

Da die monokausalen Beziehungen zwischen der Veränderung von Blattinhaltsstoffen infolge von Wassermangel nur durch kontrollierte Trockenstressexperimente untersucht werden können, wurden in den Sommermonaten der Jahre 2013 und 2014 derartige Versuche im Gewächshaus der Humboldt-Universität zu Berlin in Dahlem durchgeführt. Hierzu wurden unter gleichen Versuchsbedingungen in Containern getopfte 2-jährige Buchen für eine begrenzte Zeit ausgetrocknet, während eine identische Kontrollgruppe optimal bewässert wurde. Die Pflanzen wurden für mehrere Wochen vor Versuchsbeginn im Gewächshaus akklimatisiert. Der Wasserverlust der Austrocknungsvariante wurde wöchentlich durch Wägung der Töpfe ermittelt. Der Vitalitätszustand der Pflanzen wurde durch regelmäßige Blattbonituren, Wachstumswerte, kontinuierliche Blattturgormessungen beurteilt. Als Kriterien zur Bewertung der Trockenstressbelastung wurden neben Schadsymptomen an den Blättern vor allem biochemische Indikatoren (Biomarker: Blatt-Wasser-, Gesamtchlorophyll-, Stärke-, Kohlenhydrat-, Prolin-, Ascorbatgehalt und ausgewählte phenolische Verbindungen) verwendet. Die Blätter wurden zu Beginn des Versuches und nach vier sowie sechs Wochen nach Versuchsbeginn hinsichtlich dieser Blattinhaltsstoffe analysiert. Identische Versuchsanordnungen wurden parallel mit zwei Eichenarten, Kiefern und Douglasien durchgeführt (KÄTZEL et al. 2015). Die Auswertung erfolgte baumartenspezifisch zwischen der bewässerten Kontrollvariante und den Stressvarianten.

Das Ziel der Untersuchungen war es u. a., den Verlauf der Trockenstressreaktion sowie die Trockenstresstoleranz der Baumarten zu vergleichen. Ebenso sollte das Erholungsvermögen nach Wiederbewässerung und die Konditionierung der Pflanzen durch frühere Stresssituationen geprüft werden. Die verwendeten Parameter wurden hinsichtlich ihrer Indikatoreignung für die Frühdiagnose von physiologischen Stresszuständen der Bäume bewertet.

Im Vergleich zu den parallel untersuchten Eichen reagierten die Buchen deutlich später auf den Wasserverlust. Vergleicht man die relative Veränderung der Blattinhaltsstoffe gegenüber den bewässerten Kontrollbäumen, so fielen insbesondere die Konzentrationsänderungen von drei Blattinhaltsstoffen auf: Prolin, freie Aminosäuren und Stärke. Der Blattstärkegehalt sank nach vierwöchigem Wassermangel ab und der Prolingehalt stieg um mehr als das Fünffache gegenüber dem der Kontrollbäume an. Der prozentuale Anteil des Prolins innerhalb des Gesamtpools der freien Aminosäuren hat eine seit langem bekannte Indikatorfunktion u.a. für osmotischen Stress. Ebenso erhöhte sich auch der Gesamtgehalt an freien Aminosäuren.

Nach weiteren zwei Wochen war eine deutliche Zunahme der Gehalte an freien Aminosäuren festzustellen. Ebenso sanken die Stärkegehalte weiter ab. Erst-

mals wurde eine Verminderung der Chlorophyll- und Blattwassergehalte gemessen (Abb. 1).

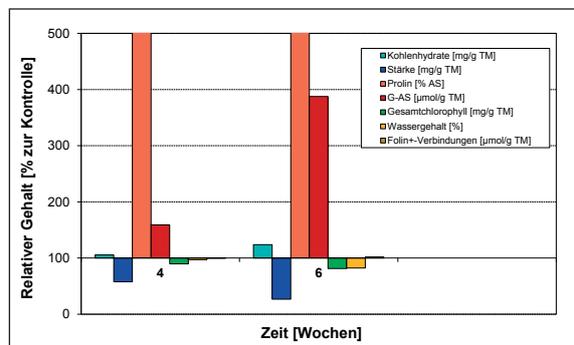


Abb. 1: Relative Veränderung ausgewählter Blattinhaltsstoffe von zweijährigen Buchen vier und sechs Wochen nach Aussetzen der Bewässerung im Vergleich zu den bewässerten Kontrollpflanzen (=100 %)

Im Jahre 2015 wurden auf der Lysimeter-Versuchstation Britz nahe Eberswalde 15-jährige Buchen unter Freilandbedingungen untersucht, denen ebenfalls das Wasser entzogen wurde. Blattproben wurden zu Versuchsbeginn und nach acht sowie zehn Wochen entnommen. Hier zeigten sich ähnliche Ergebnisse, wobei die deutlichen Veränderungen der Blattinhaltsstoffe erst nach zehn Wochen zu beobachten waren. Die Akkumulation freier Aminosäure erwies sich noch vor dem Anstieg des Prolingehaltes, sowie dem Abbau der Stärke- und des Chlorophyllgehalte als intensivste Stressreaktion. Die späte Zunahme der Osmolalität des Blattpresssaftes und der stabile Blattwassergehalt zeigen, dass bei dieser Versuchsanstellung nur ein milder Trockenstress induziert wurde (Abb. 2).

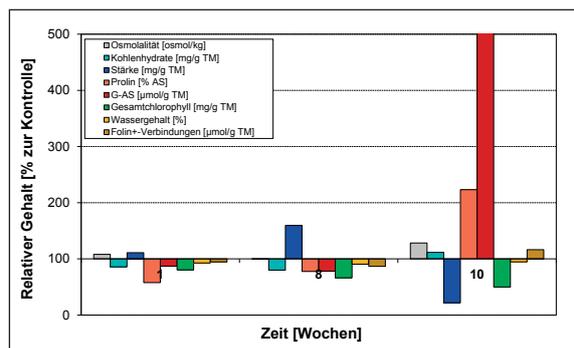


Abb. 2: Relative Veränderung ausgewählter Blattinhaltsstoffe von 15-jährigen Buchen nach einer, acht und zehn Wochen nach Aussetzen der Bewässerung im Vergleich zu den bewässerten Kontrollpflanzen (=100 %)

3.2 Konditionierung durch vorangegangene Stressereignisse

Die Abschwächung der Trockenstressreaktionen bei älteren Buchen unter Freilandbedingungen warf die Frage auf, ob die Bäume durch frühere, überlebte Trockenstressereignisse konditioniert werden können.

Hierzu wurden die Buchen aus dem Gefäß- resp. Gewächshausversuch des Jahres 2013 im Folgejahr

einem erneuten Trockenstress ausgesetzt und mit einem Baumkollektiv verglichen, dem 2014 erstmals das Wasser entzogen wurde (und das im Vorjahr noch zur Kontrollgruppe gehörte: TS 2014). Betrachtet man die am stärksten trockenstressanzeigenden Parameter Prolin, Stärke und freie Aminosäuren, so fielen bei allen drei Blattinhaltsstoffen die Stressreaktionen bei dem Buchenkollektiv am stärksten aus, das 2014 erstmalig mit Wasserentzug konfrontiert wurde („Stressgruppe TS 2014“).

Zwar sanken die Stärkegehalte der vorkonditionierten Buchengruppe nach Wasserentzug rasch ab, verblieben aber auf einem relativ hohen Niveau. Nach achtwöchiger Versuchsdauer lagen die Stärkegehalte dieser Gruppe sogar noch über dem der Kontrolle, die nach Hitzephasen im Gewächshaus trotz Bewässerung ebenfalls abfielen. Bei Buchen, die erstmalig Trockenstress ausgesetzt wurden, waren die Stärkegehalte ab der sechsten Woche nach dem Versuchsbeginn auf einem sehr geringen Niveau (Abb. 3a).

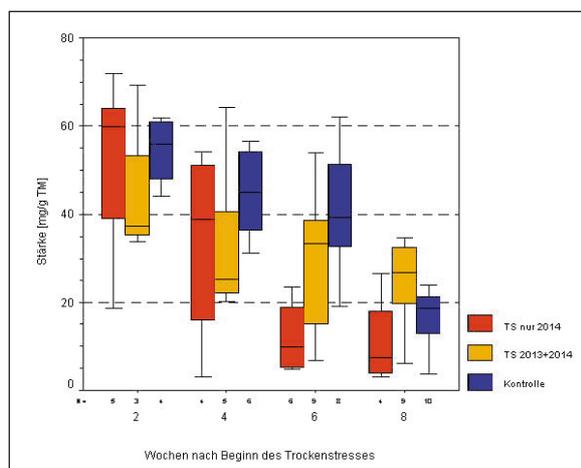
Noch eindrucksvoller ist der Anstieg des Prolingehaltes bei der neuen Stressgruppe TS 2014 ab der sechsten Woche nach Versuchsbeginn. Diese Pflanzen verhiel-

ten sich 2014 genauso wie die Buchen der vorkonditionierten Gruppe, die im Jahr 2013 erstmals Wassermangel ertragen mussten (TS 2013 + 2014). Nach dieser Vorkonditionierung fiel die Reaktion im Folgejahr deutlich geringer aus. Die Prolingehalte stiegen erst in der 8. Woche an und erreichten hier 14 Tage später das Niveau der neuen Stressgruppe (Abb. 3b).

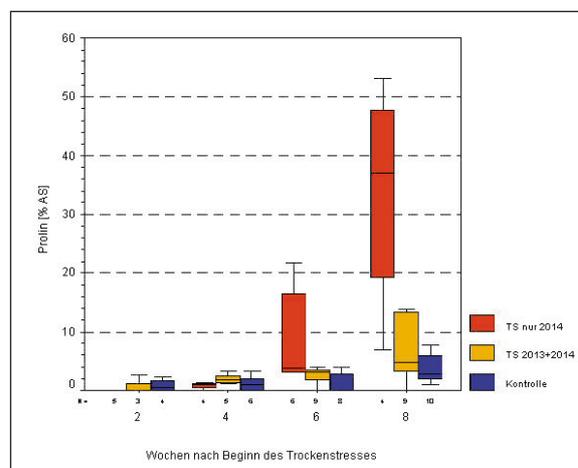
Die Blattgehalte an freien Aminosäuren stiegen in den ersten vier Versuchswochen mit zunehmender Temperatur im Gewächshaus an. Eine Differenzierung zwischen den drei Varianten war erst nach sechs Wochen zu beobachten. Von da an stiegen die Aminosäuregehalte der neuen Stressgruppe TS 2014 stetig an, während die Gehalte der vorkonditionierten Buchen (TS 2013 + 2014) unter Trockenstress wie auch die Kontrollpflanzen auf einem niedrigen Niveau verblieben (Abb. 4).

3.3 Biomarker als Frühindikatoren

Im Vergleich der untersuchten Baumarten bei dem Trockenstressversuch 2013 zeigten sich auch die Unterschiede der Anpassungsstrategien zwischen Rot-Buchen und Eichen unter mehrwöchigen akuten



a



b

Abb. 3: Vergleich der Gehalte an Stärke (a) und Prolin (b) während der achtwöchigen Versuchsdauer zwischen Rot-Buchen der „Kontrollgruppe“, der aus dem Vorjahr konditionierten und der erstmaligen „Stressgruppe“ im Untersuchungsjahr 2014

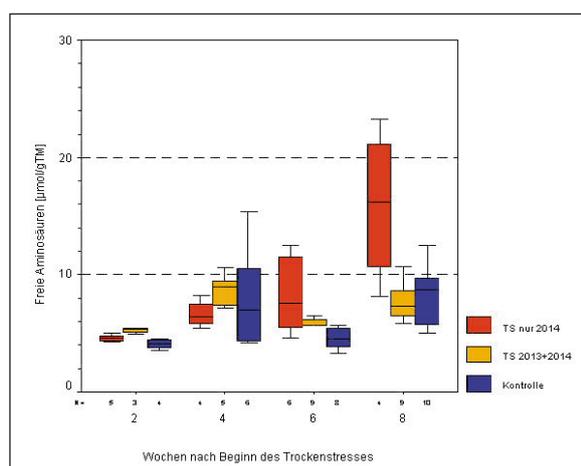


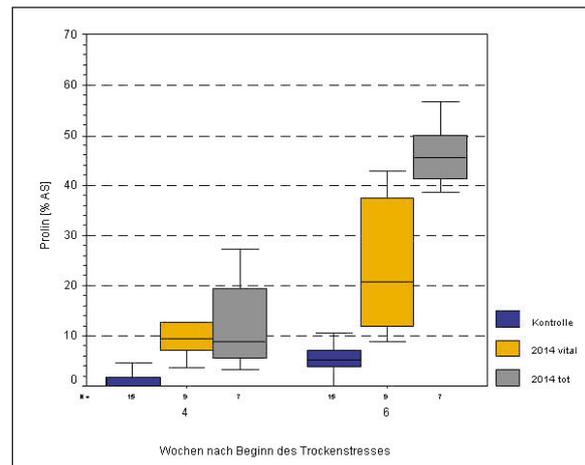
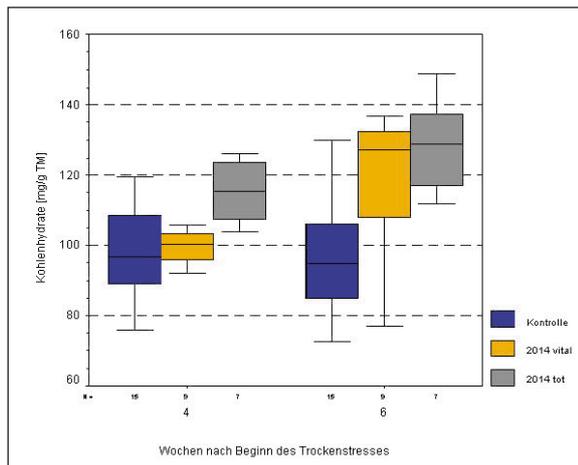
Abb. 4: Vergleich der Gehalte an freien Aminosäuren während der achtwöchigen Versuchsdauer zwischen Rot-Buchen der „Kontrollgruppe“, der aus dem Vorjahr konditionierten und der erstmaligen „Stressgruppe“ im Untersuchungsjahr 2014

Wassermangelbedingungen. Während einige Eichen noch während des sechswöchigen Trockenstresses abstarben, überlebten alle Buchen. Nach der Winterruhe 2013/14 waren jedoch 7 der 15 Buchen der Trockenstressvariante abgestorben und trieben nicht mehr aus. Hier stellte sich die Frage, ob sich die Biomarkerreaktionen der abgestorbenen Bäume bereits während der Stressphase von den überlebenden unterschieden.

In der Retrospektive bestätigten sich die Unterschiede zwischen den beiden Individuengruppen bereits frühzeitig während der akuten Stressphase. Die Differenzierung zwischen den überlebenden und später abgestorbenen Buchen war bezüglich der Gehalte an Stärke, löslichen Kohlenhydraten, freien Aminosäuren und Prolin hoch signifikant.

Bei den im Folgejahr abgestorbenen Bäumen waren bereits nach vierwöchigem Wassermangel die Gehalte an löslichen Kohlenhydraten deutlich erhöht, ebenso folgten nach sechs Wochen die Prolingehalte (Abb. 5). Besonders auffällig war der Anstieg der freien Aminosäuren und der Abfall der Stärkegehalte nach sechs Wochen Wassermangel (Abb. 6 und 7). Dagegen eignet sich der Blattwassergehalt weniger als Frühindikator. Die Medianwerte waren hier zwar geringer aber die Unterschiede nicht signifikant (Abb. 8).

Obwohl die Trockenstressreaktionen der Buchen insgesamt später einsetzten als bei den Eichen, betraf dies jedoch vor allem die überlebenden Bäume. Die im Folgejahr abgestorbenen Bäume reagierten mit einer sehr zeitigen Stressreaktion.



a

b

Abb. 5: Differenzierte Reaktion bei Trockenstress zwischen überlebenden und im Jahre 2014 abgestorbenen Buchen am Beispiel der Gehalte an Kohlenhydraten (a) und Prolin (b) im Vergleich zur bewässerten Kontrolle im Untersuchungsjahr 2013

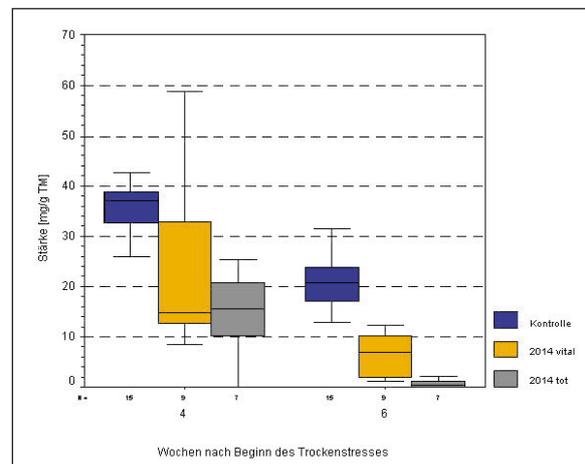
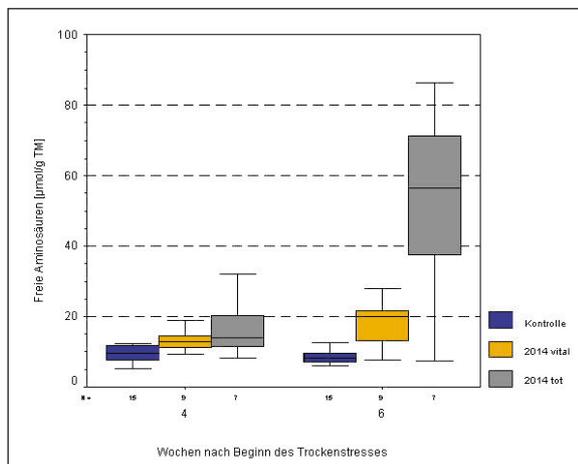


Abb. 6: Differenzierte Reaktion bei Trockenstress zwischen überlebenden und im Jahre 2014 abgestorbenen Buchen bezüglich der Gehalte an freien Aminosäuren im Vergleich zur bewässerten Kontrolle im Untersuchungsjahr 2013

Abb. 7: Differenzierte Reaktion bei Trockenstress zwischen überlebenden und im Jahre 2014 abgestorbenen Buchen bezüglich der Stärkegehalte im Vergleich zur bewässerten Kontrolle im Untersuchungsjahr 2013

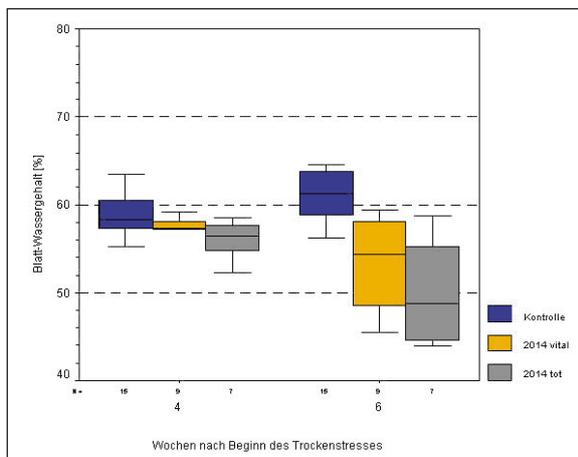


Abb. 8: Differenzierte Reaktion bei Trockenstress zwischen überlebenden und im Jahre 2014 abgestorbenen Buchen bezüglich des Blattwassergehaltes im Vergleich zur bewässerten Kontrolle im Untersuchungs-jahr 2013

4 Dynamik der Biomarker beim Untersuchungsbestand der Level-2-Buchen-Dauerbeobachtungsfläche Beerenbusch (Menz)

4.1 Prozentualer Blattwassergehalt, Blattflächen und Blatttrockenmassen

Der Blattwassergehalt reflektiert zum einen die Aufrechterhaltung des Blattturgors des Baumes (auch unter Wassermangelbedingungen) und weist zum anderen aber auch auf andere Blatt- resp. Baumschäden hin, die die Wasserversorgung (z.B. Wurzelschäden und Störungen im Wassertransportsystem) beeinflussen. Der durchschnittliche Blattwassergehalt der physiologisch aktiven, schadsymptomfreier Buchenblätter sollte den prozentualen Anteil von 53 % (bezogen auf das Blattfrischgewicht) möglichst nicht unterschreiten.

Zu Beginn der Langzeituntersuchungen im Trocken-sommer 2003 konnte das Untersuchungskollektiv diesen Referenzwert noch immer überschreiten, u.a. da die boden- und baumbürtigen Wasserspeicher zum Zeitpunkt der Probennahme Ende Juli/Anfang August noch immer ausreichend gefüllt und die physiologischen Anpassungsreaktionen der isohydrischen Buchen erfolgreich waren (Abb. 9).

Mit Ausnahme der Jahre 2006 und 2010 verblieben die relativen Blattwassergehalte bis 2011 auf einem hohen Niveau. Singuläre Wassermangelsituationen konnten jeweils im Folgejahr unmittelbar ausgeglichen werden. Dies änderte sich ab dem Untersuchungs-jahr 2012, in dem die Blattwassergehalte mit Ausnahme der Jahre 2013 und 2016 nahezu stetig fielen. Besonders auffällig ist der Abfall der Blattwassergehalte ab 2018. Auch bei günstigeren Witterungsbedingungen im Jahre 2020 fielen sie weiter ab. Dies zeigt, dass die Blattwassergehalte – wie auch bei dem Trockenstress-experiment - nicht in einem unmittelbaren zeitlichen Zusammenhang mit dem jeweiligen Trockenstresser-

eignis stehen, sondern erst als Spätfolgen sichtbar werden (Abb. 9).

Da sich die relativen Blattwassergehalte auf die Frischgewichte der Blätter beziehen, lohnt auch eine Untersuchung der absoluten Blattflächen. Dass Trockenphasen eine Reduktion der Blatt- (resp. Transpirations-) Oberflächen zur Folge haben können, ist seit langem bekannt. Allerdings ist die alleinige Betrachtung von Blattflächengrößen als Vitalitätsindikator kritisch, da die Blattflächen allgemein einer hohen Streuung auch unter vergleichbaren Strahlungsbedingungen an der oberen Kronenperipherie unterliegen. Bei der Proben-nahme wurde dies berücksichtigt, indem jeweils ein breites Spektrum unterschiedlicher Blattgrößen der entnommenen Probezweige untersucht wurde. Dies spiegelt sich in den Streuungen der Werte wider (Abb. 10). Im Durchschnitt sollten Buchenblätter gesunder Bäume größer als 21 cm² sein. In den Jahren 2011, 2014, 2016, 2017 und 2019 lagen die Mittelwerte der Blattflächen deutlich unter dem kritischen Referenzwert von 18 cm². Besonders auffällig ist die andauernde Kleinblättrigkeit in den beiden Folgejahren nach dem Trockenjahr 2015. Größere Blattflächen wurden erst wieder im Frühjahr 2018 ausgebildet, dem unmittelbar ein extrem trockener Sommer folgte. In 2020 stiegen die Blattflächen wieder an, befanden sich aber immer noch im Warnbereich (Abb. 10).

Die Auswirkungen von Trockenereignissen zeigen sich entsprechend bei den Blatttrockenmassen immer erst im Folgejahr. Die einzelbaumweise Darstellung zeigt die Varianz der mittleren Blatttrockenmassen zwischen den einzelnen Probezäumen. Besonders interessant

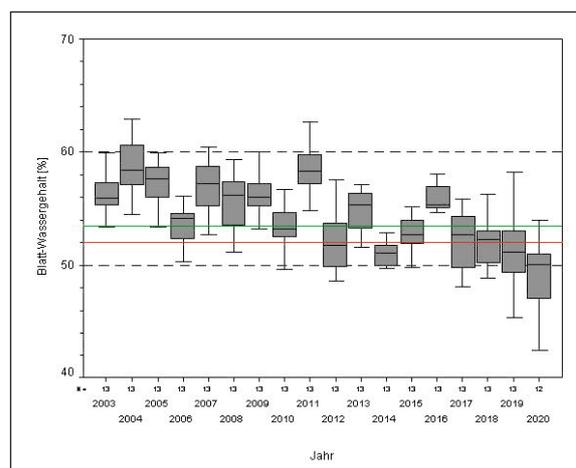


Abb. 9: Zeitreihe der Blattwassergehalte der Buchen der Dauerbeobachtungsfläche Beerenbusch (grüne Linie = untere Grenze des Referenzbereiches, rote Linie = untere Grenze des Warnbereiches)

sind die Blatttrockenmassen des Baumes 2 (rote Linie), der im Jahr 2021 einen Blattverlust von 90 % aufwies und am stärksten geschädigt war. Bereits ab dem Jahr 2014 sanken bei dieser Buche die Blatttrockenmassen kontinuierlich und waren ab 2018 die geringsten des Probenbaumkollektivs (Abb. 11).

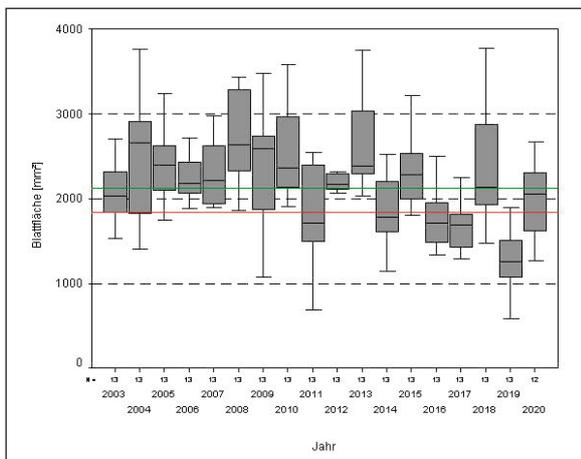


Abb. 10: Zeitreihe der Blattflächen der Buchen der Dauerbeobachtungsfläche Beerenbusch (grüne Linie = untere Grenze des Referenzbereiches, rote Linie = untere Grenze des Warnbereiches)

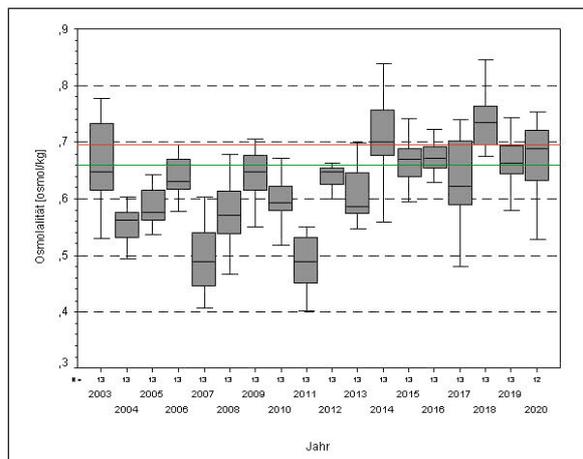


Abb. 12: Zeitreihe der Werte für die Osmolarität des Presssaftes der Buchenblätter der Dauerbeobachtungsfläche Beerenbusch (grüne Linie = obere Grenze des Referenzbereiches, rote Linie = obere Grenze des Warnbereiches)

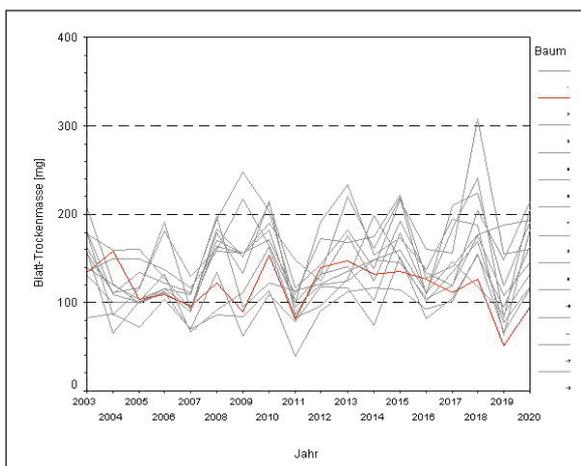


Abb. 11: Einzelbaumweise Darstellung der Zeitreihe der mittleren Blatttrockenmassen der Buchen der Dauerbeobachtungsfläche Beerenbusch (rote Linie zeigt den Baum 2, der im Jahre 2021 einen 90 %igen Blattverlust zeigte)

4.2 Osmolarität des Blattpresssaftes

Mit zunehmender Trockenheit steigt die Osmolarität des Blattpresssaftes u.a. durch die Akkumulation von osmotisch wirksamen Ionen und Moleküle unmittelbar an. Werte der Osmolarität oberhalb von 0,69 osmol kg⁻¹ weisen auf Anpassungsreaktionen infolge von Wassermangel hin. Dieser Wert wurde von einigen Buchen bereits im Jahre 2003 überschritten, obwohl der Medianwert noch unterhalb des Grenzwertes lag. Der höchste Mittelwert der Osmolarität wurde im Jahr 2018 gemessen. In diesem Jahr lagen erstmals alle Buchen des Untersuchungskollektives oberhalb des Referenzbereiches. In den beiden Folgejahren ordneten sich die Medianwerte im Warnbereich (noch immer oberhalb des Referenzbereiches) an (Abb. 12).

4.3 Stärke

Die Stärkegehalte in Blättern unterliegen hohen Schwankungen. Infolge verminderter Syntheseraten

bzw. höhere Abbauraten sinken die Blattstärkegehalte. Bereits die Trockenstressexperimente zeigten, dass niedrige Stärkegehalte häufig ein Indiz für vorangegangene Belastungszustände sind. Medianwerte unterhalb der Referenzgrenze von 12 mg/g TM wurden in den Jahren 2004, 2007, 2009, 2010, 2016 und 2018 nachgewiesen. In Abweichung von Jungpflanzen des Gefäßversuches 2013 wurden in den Trockenjahren 2003, 2015, 2019 und 2020 normale resp. erhöhte Gehalte gemessen (Abb. 13).

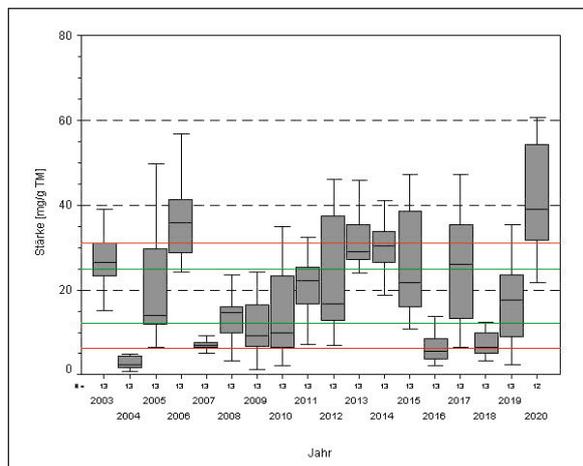


Abb. 13: Zeitreihe der Gehalte an Stärke in Blättern der Buchen der Dauerbeobachtungsfläche Beerenbusch (grüne Linien = Referenzbereich, rote Linie = untere/obere Grenze des Warnbereiches)

4.4 Ascorbat

Ascorbinsäure (Vitamin C) ist ein wichtiger Bestandteil des Redoxsystems zur Vermeidung von oxidativem Stress. Erhöhte Gehalte oberhalb von 5 mg/g TM weisen auf eine Aktivierung dieses zellulären Abwehr-/Schutzsystems hin. Erhöhte Gehalte an Ascorbat wurden in den Jahren 2009, 2010, 2013, 2015, 2018 und 2019 (bezogen auf die Medianwerte) beobachtet (Abb. 14).

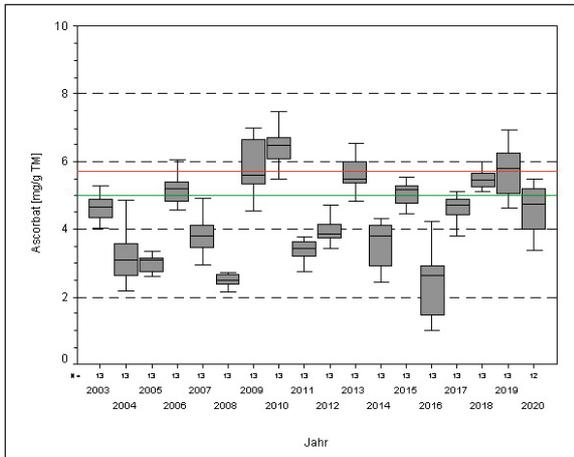


Abb. 14: Zeitreihe der Gehalte an Ascorbat in Blättern der Buchen der Dauerbeobachtungsfläche Beerenbusch (grüne Linie = obere Grenze des Referenzbereiches, rote Linie = obere Grenze des Warnbereiches)

4.5 Gesamtgehalt an freien Aminosäuren und Prolin

Die Gesamtgehalte an freien (ungebundenen) Aminosäuren sind in Buchenblättern generell gering (bei gleichzeitig geringen Streuungen) und liegen im Referenzbereich unterhalb von $9,6 \mu\text{mol/gTM}$. Abweichungen hiervon können unterschiedliche Ursachen (z.B. hohe Stickstoffeinträge, hohe Proteinabbauraten) haben. Die außergewöhnlich hohen Aminosäuregehalte im Trockenjahr 2018 sind ein wichtiger Indikator für den hohen akuten Stresszustand, dem die Buchen ausgesetzt sind. Der hohe Mittelwert und die hohe Streuung der Werte belegen im Vergleich zu anderen Trockenjahren (2003, 2015) den extremen Trockenstress des Jahres 2018. Anpassungsreaktionen führen in den beiden Folgejahren zu einem Absinken der Gehalte, so dass sie sich jetzt im Referenzbereich befinden (Abb. 15).

Eine deutlich größere Dynamik zeigt der Gehalt der Aminosäure Prolin innerhalb der Zeitreihe. Mit Ausnahme

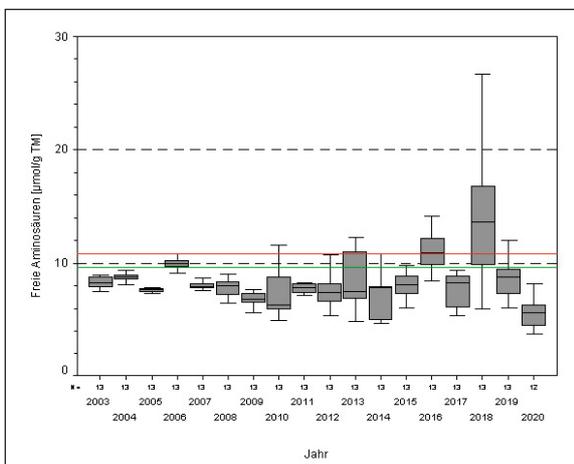


Abb. 15: Zeitreihe der Gehalte an freien Aminosäuren in Blättern der Buchen der Dauerbeobachtungsfläche Beerenbusch (grüne Linie = obere Grenze des Referenzbereiches, rote Linie = obere Grenze des Warnbereiches)

des Trockenjahres 2003 lagen die prozentualen Prolingehalte bis 2014 auf einem geringen Niveau. Dies ändert sich abrupt mit dem Trockenjahr 2015, mit einem hohen Medianwert oberhalb des Referenzbereiches von 6,6 % Prolin des Gesamtaminosäuregehaltes, der auch im niederschlagsreichen Sommer 2016 noch erhöht war. Nach der Erholung im Jahr 2017 stieg der Prolingehalt im extremen Trockenjahr 2018 erneut auf einen neuen Rekordwert oberhalb des Warnbereiches. In den beiden Folgejahren sanken die Anteile wieder unterhalb des Referenzbereiches. Auffällig ist jedoch wiederum die hohe Streubreite der Werte im Jahr 2019 (wie 2016), die die unterschiedliche physiologische Plastizität der Buchen gegenüber Stressbelastungen widerspiegelt (Abb. 16)

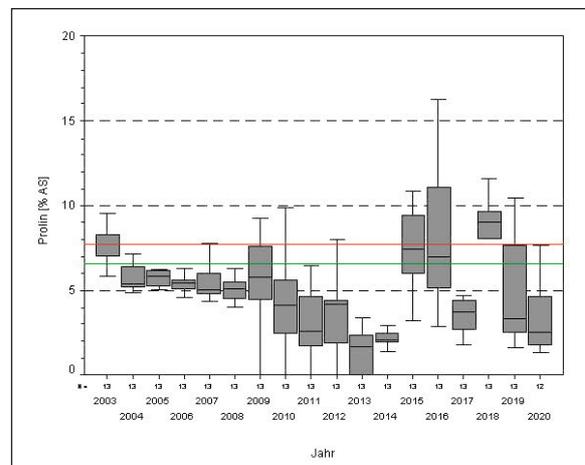


Abb. 16: Zeitreihe der prozentualen Anteile an Prolin bezogen auf den Gesamtgehalt an freien Aminosäuren in Blättern der Buchen der Dauerbeobachtungsfläche Beerenbusch (grüne Linie = obere Grenze des Referenzbereiches, rote Linie = obere Grenze des Warnbereiches)

4.6 Phenolische Inhaltsstoffe

Aus der Gruppe der untersuchten phenolischen Blattinhaltsstoffe sollen hier Zeitreihen der Gehalte an Folin-positiven Verbindungen, an niedermolekularen ortho-Dihydroxyphenolen und an hochmolekularen, kondensierten Tanninen (Vanillin-positive Verbindungen) vorgestellt werden. Generell unterliegt die Synthese dieser Sekundärmetabolite einer starken genetischen Kontrolle. Innerhalb der Familie der *Fagaceae* enthalten Buchenblätter höhere Gehalte an phenolischen Inhaltsstoffen als z.B. Eichen. Im ökophysiologischen Kontext haben phenolische Inhaltsstoffe vielfältige Funktionen (z.B. Abwehr gegenüber biotischen Schaderregern). Über die stressphysiologische Regulation der Phenolsynthese ist bei Buchen jedoch wenig bekannt.

Da immer die gleichen Bäume zur gleichen Zeit untersucht wurden, können genotypabhängige Unterschiede der Phenolgehalte weitgehend ausgeschlossen werden. Somit wurden die dynamischen Schwankungen der Gehalte innerhalb der Zeitreihe vor allem durch Umwelteinflüsse ausgelöst. Bei allen untersuchten phenolischen Inhaltsstoffen stiegen die Gehalte von Jahr zu Jahr an und überschritten 2015, 2017, 2019

und 2020 den Referenz- bzw. Warnbereich. Von 2003 bis 2016 durchlaufen die Gehalte eine Wellenbewegung mit Tiefpunkten in den Jahren 2004 und 2011 und höheren Gehalten in den Jahren 2006 bis 2008 bzw. 2015 und 2016. Da die höchsten Gehalte in den witterungsbezogen unterschiedlichen Jahren 2017 und 2019 gemessen wurden, können die Anstiege nicht unmittelbar auf Trockenheit zurückgeführt werden. Möglicherweise stehen die Anstiege im Zusammenhang mit Abwehrreaktionen gegenüber biotischen Schaderregern (Abb. 17 bis 19).

Dass von dem Anstieg der phenolischen Inhaltsstoffe besonders stark geschädigte Buchen betroffen sind, zeigt die einzelbaumweise Darstellung. Der im Jahr 2021 besonders stark geschädigte Baum 2 (rote Linie) fiel im Vergleich zu den anderen untersuchten Buchen bereits 2014 mit höheren Gehalten auf. Bei dieser Buche nahmen die Gehalte auch in den Jahren 2016 und 2018 nicht mehr ab, wie dies bei den anderen Bäumen der Fall war (Abb. 20 und 22).

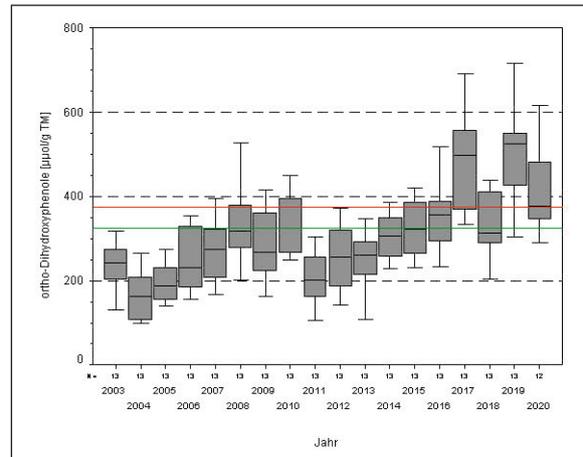


Abb. 19: Zeitreihe der Gehalte an ortho-Dihydroxyphenolen in Blättern der Buchen der Dauerbeobachtungsfläche Beerenbusch (grüne Linie = obere Grenze des Referenzbereiches, rote Linie = obere Grenze des Warnbereiches)

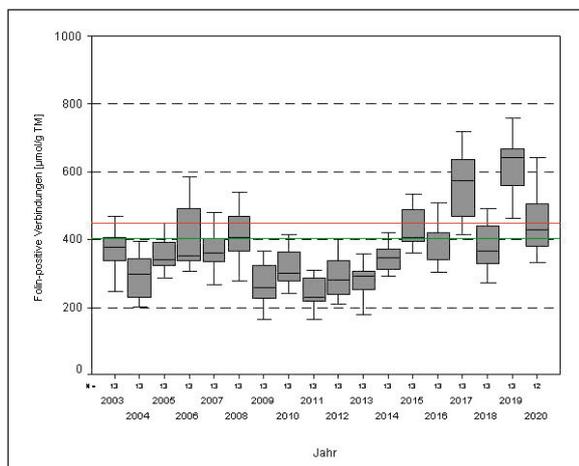


Abb. 17: Zeitreihe der Gehalte an Folin-positiven Verbindungen in Blättern der Buchen der Dauerbeobachtungsfläche Beerenbusch (grüne Linie = obere Grenze des Referenzbereiches, rote Linie = obere Grenze des Warnbereiches)

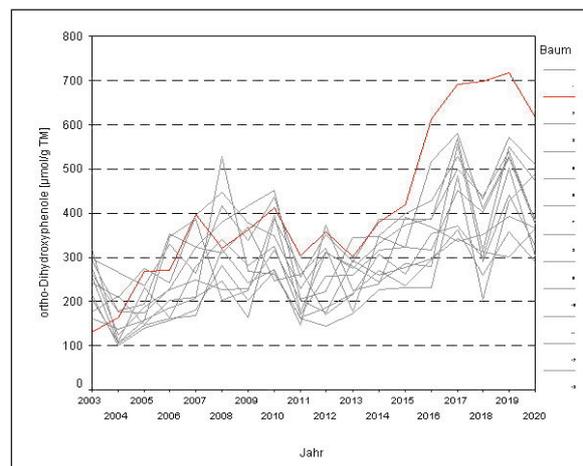


Abb. 20: Einzelbaumweise Darstellung der Zeitreihe der Gehalte an ortho-Dihydroxyphenolen in Blättern der Buchen der Dauerbeobachtungsfläche Beerenbusch (rote Linie zeigt den Baum 2, der im Jahre 2021 einen 90 %igen Blattverlust zeigte)

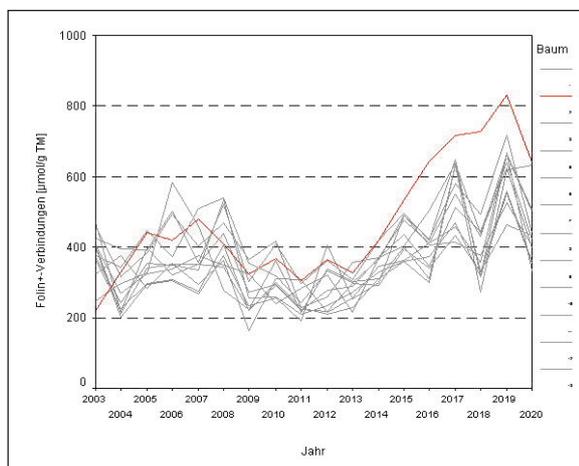


Abb. 18: Einzelbaumweise Darstellung der Zeitreihe der Gehalte an Folin-positiven Verbindungen in Blättern der Buchen der Dauerbeobachtungsfläche Beerenbusch (rote Linie zeigt den Baum 2, der im Jahre 2021 einen 90 %igen Blattverlust zeigte)

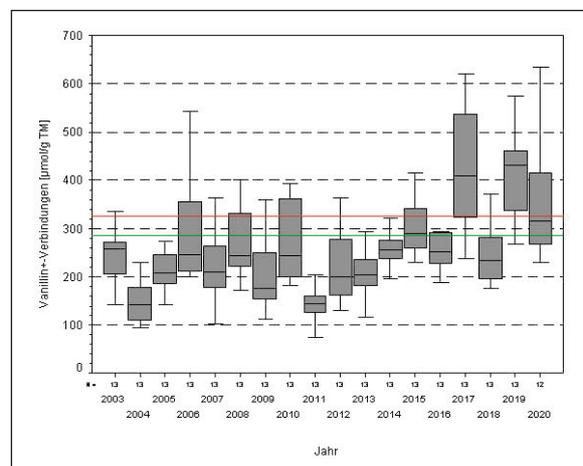


Abb. 21: Zeitreihe der Gehalte an Vanillin-positiven Verbindungen in Blättern der Buchen der Dauerbeobachtungsfläche Beerenbusch (grüne Linie = obere Grenze des Referenzbereiches, rote Linie = obere Grenze des Warnbereiches)

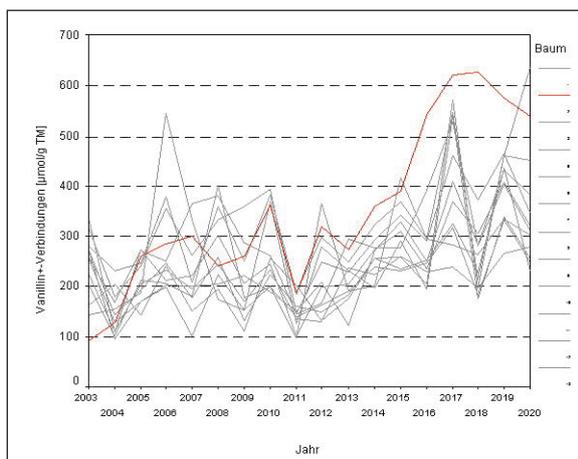


Abb. 22: Einzelbaumweise Darstellung der Zeitreihe der Gehalte an Vanillin-positiven Verbindungen in Blättern der Buchen der Dauerbeobachtungsfläche Beerenbusch (rote Linie zeigt den Baum 2, der im Jahre 2021 einen 90 %igen Blattverlust zeigte)

5 Diskussion und Fazit

Ein wichtiges Ziel des forstlichen Monitorings besteht darin, mit Hilfe von Frühindikatoren Vitalitätseinbußen (Belastungsrisiken) wesentlich zeitiger, d.h. in einer Phase zu erkennen, in der sich die Pflanze auf biochemisch-physiologischer Ebene mit äußeren Stressfaktoren auseinandersetzt.

Ausgelöst durch die großflächigen Schäden am Wald hat die Gehölzphysiologie in den letzten Jahrzehnten eine Reihe von Pflanzeninhaltsstoffen präsentiert, die mit Umweltveränderungen korrelieren und somit eine Indikatorfunktion besitzen können. Einige dieser «Kandidatenstoffe» wurden u.a. bei Rot-Buchen in Trockenstressversuchen getestet. Dabei bestätigte sich, wie auch bei anderen Baumarten, dass die Stressreaktionen einem dynamischen Phasenverlauf folgen (Abb. 1 und 2), der durch die Abfolge von Alarmphase, Widerstand- und Adaptationsphase, Erschöpfungsphase, Regenerationsphase oder Tod gekennzeichnet ist (SELYE 1959, LARCHER 1987; SCHUBERT 1991, TESCHE 1995). Das Kernproblem für einen außerhalb des „Stresssystems“ stehenden Betrachter besteht darin zu erkennen, in welcher Phase sich ein stressbelasteter Baum zu einem bestimmten Zeitpunkt befindet. Mit Hilfe von Biomarkern können diese Stressphasen besser differenziert werden.

Wie alle phänotypischen Merkmale unterliegen Blattinhaltsstoffe aber auch einer natürlichen Variabilität. Daher ist die „Normierung“ von biologischen Prozessen grundsätzlich kritisch. Andererseits gibt es eine Reihe von Befunden, wonach Stoffwechselprozesse einer relativ strengen Regulation auf genetischer und biochemischer Ebene unterliegen. In Anlehnung an die Erfahrungen der Humanmedizin können unter dem Vorbehalt zu definierender Grundsätze und Rahmenbedingungen sogenannte „Referenzbereiche“ für Biomarker definiert werden, die für „gesunde Zustände“ charakteristisch sind. Diese können als Bewertungsgrundlage für künftige

Beprobungen bzw. unbekannte Proben dienen. Mit der vorliegenden Arbeit wurde der Versuch unternommen, solche Referenzbereiche für die Buche zu definieren. Kritisch ist dabei die Auswahl der äußerlich sehr vitalen Bäume und ihre begrenzte Anzahl. Eine Überprüfung dieser Bereiche durch eine größere Anzahl von Baumindividuen auch aus anderen Regionen des norddeutschen Tieflandes (resp. aus einem noch größeren Verbreitungsgebiet) wäre daher wünschenswert.

Bei den Trockenstressversuchen unter Gewächshausbedingungen erwies sich die Rot-Buche als deutlich toleranter als die Trauben-Eiche. Die Unterschiede spiegeln sich sowohl in den Blattschäden, als auch bei den Mortalitätsraten und den Biomarkerreaktionen wider. Die Ergebnisse stimmen mit den Ergebnissen des Waldmonitorings und der Naturwaldforschung überein, stehen jedoch im Widerspruch zum forstpraktischen Erfahrungswissen (KÄTZEL et al. 2015). Interessant sind auch die Absterbeverläufe beider Laubbaumarten nach sechswöchigem Trockenstress. Während die Eichen unmittelbar in der Folge des akuten Wassermangels abstarben, starben nach der Überwinterungsperiode 2013/14 mehr als die Hälfte der Buchen der Trockenstressvariante ab, was auf die verminderte Akkumulation von Reservestoffe als Spätfolgen zurückgeführt wurde. Die beiden unterschiedlichen Stressreaktionen entsprechen weitgehend den beiden wichtigsten Hypothesen für trockenstressbedingte Baumschäden: „*hydraulic failure*“ und „*carbon starvation*“- Hypothese (Übersichten u. a. bei BRÉDA et al. 2006, McDOWELL 2011, KÄTZEL und LÖFFLER 2014). Während die „*hydraulic failure*“ von einem Zusammenbruch der Wasserleitung im Xylem ausgeht, fokussiert die „*carbon starvation*“- Hypothese auf den „Kohlenhydrathunger“, der sich insbesondere in den geringen Stärkegehalten der zerstreutporigen Buchen widerspiegelt. Die Buchen zeigen daher eine isohydrische Anpassung, die vordringlich auf die Erhaltung des Blattturgors u.a. durch eine zeitige Stomatakontrolle zielt, die mittelfristig zu einem Kohlenhydratmangel führt.

Als besondere Stressindikatoren bei der Rot-Buche erwiesen sich neben dem Abbau der Stärke die Gehalte an freien Aminosäuren und Prolin. Besondere Beachtung verdienen dabei die Befunde, dass die stärksten Stressreaktionen bei Buchen beobachtet wurden, die im Folgejahr abstarben und dass die Bäume durch Stress konditioniert werden können, d.h. dass die Stressreaktionen bei wiederholten Stress verzögert induziert werden. Besonders deutlich waren die zeitlich verschobenen Reaktionen im Prolingehalt zu beobachten. Während die Bäume der „Stressgruppe“ aus dem Vorjahr (TS 2013 + 2024) erst nach sechs Wochen einen geringen Anstieg des Prolingehaltes zeigten, reagierten die Buchen, die erstmals einem Trockenstress ausgesetzt waren (TS 2014), bereits nach vier Wochen mit einem deutlichen Prolinanstieg, der sich nach sechs Wochen vervielfachte. Vorkonditionierte Pflanzen erreichten die Widerstandsphase folglich später als erstmals belastete Pflanzen und die Stressreaktionen waren weniger intensiv.

Sowohl die Trockenstressversuche im Gewächshaus als auch die Ableitung von Referenzwerten waren die

Voraussetzung, um die Zeitreihen der Biomarker auf der Level 2-Fläche in Beerenbusch (Menz) seit 2003 auswerten zu können. Dabei werden einige bemerkenswerte Befunde deutlich. Von 2004 bis 2014 waren die untersuchten Buchen kaum Stressbelastungen ausgesetzt. Seit dem Trockensommer 2015 ändert sich der physiologische Zustand der meisten Buchen deutlich. Dabei sticht das Jahr 2018 mit dem enormen Anstieg der löslichen Aminosäuren, aber auch dem Anstieg der Osmolalität, des Prolingehaltes und dem Abfall des Stärkegehaltes besonders heraus. Nach diesem akuten Stress zeigte sich eine leichte Abschwächung der Reaktionen bei den Trockenstressindikatoren. Dass sich die Bäume aber auch weiterhin in einem physiologisch kritischen Zustand befinden, wird anhand der verminderten Blattflächen im Folgejahr, bei gleichzeitig geringeren Blattwassergehalten, dem Anstieg des Ascorbatgehaltes (als Indikator für oxidativen Stress) und der phenolischen Inhaltsstoffe deutlich.

Über die Ursachen des permanenten Anstiegs der phenolischen Inhaltsstoffe bereits seit 2012 und der Überschreitung der Referenzbereiche seit 2015 gibt es bisher keine eindeutigen Hinweise. Die Zunahme der phenolischen Inhaltsstoffe könnte u.a. mit einem erhöhten Befallsregerdruck, höherer UV-Strahlung, zeitiger einsetzender Blattalterung im Zusammenhang stehen.

Die sehr hohen Blattstärkegehalte des Jahres 2020, bereits oberhalb des Referenzbereiches, könnten einen Hinweis auf einen «Stärkebau» sein, der weiter beobachtet werden muss. Bei Begasungsexperimenten mit Ozon und mit Ozon/SO₂ war z. B. der Stärkegehalt in Fichtennadeln signifikant erhöht und gleichzeitig in den Wurzeln erniedrigt (KÜPPERS und KLUMPP, 1988). Ozon-Begasungen an Fichten (LUETHY-KRAUSE und LANDOLT, 1990; WILLENBRINK und SCHATTEN, 1993) und der Aleppo-Kiefer (ANTTONEN et al., 1998) bestätigten diesen sogenannten „Stärkebau“ unter Stressbedingungen.

Dass die biochemischen Trockenstressreaktionen der Altbuchen unter Freilandbedingungen z. B. im Jahr 2018 denen der Trockenstressexperimente mit 2jährigen getopften Buchen unter Gewächshausbedingungen entsprachen, zeigt, dass die physiologischen Stressreaktionen hoch konserviert sind, und dass auch Trockenstressexperimente unter artifiziellen Bedingungen ein wichtiger Baustein in der Risikobewertung von Stressfaktoren sein können.

Ebenso bestätigt die Einzelbetrachtung des Baumes 2, der 2021 die höchste Kronenverlichtung aufwies, dass sich eine verminderte Vitalität bereits Jahre vorher (2014) anhand biochemischer Blattinhaltsstoffe ankündigt. Im vorliegenden Fall traf dies insbesondere auf die phenolischen Inhaltsstoffe und die Kleinblättrigkeit zu. Die gleichzeitig visuell erfolgte Kroneneinschätzung zeigte erst im Jahre 2018 einen stärkeren Blattverlust im Vergleich zu den anderen Untersuchungsbäumen.

Insgesamt ist jedoch darauf hinzuweisen, dass auch biochemische Blattinhaltsstoffe nur einen partiellen Einblick in die komplexe Gehölzphysiologie bieten. Eine Gesamtschau des Baumes, die Kronenzustände, Wachstumsmerkmale, biotische Schädlermerkmale usw. im Zusammenhang betrachtet, ist unerlässlich. Die Level-2-Monitoringplots bieten hier eine wichtige Grundlage und Datenbasis.

Die vorliegenden Ergebnisse lassen aber auch den Schluss zu, dass die veränderten Blattinhaltsstoffe und Kronenzustände sich unmittelbar auf die Vitalität der Wurzeln und der Funktionsfähigkeit der Rhizosphäre auswirken könnten. Unterversorgungen der Wurzel, Wurzeldegenerationen und veränderte Interaktionen im Wurzelraum (z. B. Mykorrhizierung, Pathogene) wirken sich häufig erst verzögert auf die Baumvitalität aus. Diese Zusammenhänge zu erforschen, sind eine künftige Herausforderung.

Literatur

- ANTTONEN, S.; KITTILÄ, M.; KÄRENlampi, L. (1998): Impacts of ozone on Aleppo Pine needles: Visible symptoms, starch concentrations and stomatal responses. *Chemospheres* 36 (4-5): 663-668.
- BRÉDA, N.; HUC, R.; GRANIER, A.; DREYER, E. (2006): Temperate forest trees and stands under severe drought: a review of ecophysiological responses, adaptation processes and long-term consequences. *Annals of Forest Science* 63: 625-644.
- McDOWELL, N. (2011): Mechanisms linking drought, hydraulics, carbon metabolism, and vegetation mortality. *Plant Physiology* 155: 1051-1059.
- KÄTZEL, R. (2003): Ergebnisse und Erfahrungen zum Einsatz von Biomarkern auf Level II-Dauerbeobachtungsflächen in Berlin und Brandenburg seit 1995. *Tharandter Forstliche Jahrbücher, Beiheft 5*: 100-130.
- KÄTZEL, R.; ZANDER, M.; LÖFFLER, S. (2015): Wenn der Durst kommt – Eiche, Buche, Kiefer, Douglasie im Trockenstresstest. *Eberswalder Forstliche Schriftenreihe, Band 55*: 40-54.
- KÄTZEL, R.; LÖFFLER, S. (2014): Physiologische Indikatoren zur Bewertung von Trockenstress bei Bäumen. In: Generaldirektion der Stiftung Preussische Schlösser und Gärten Berlin-Brandenburg (Hrsg.): *Wasserhaushalt und Pflanzen - Historische Gärten im Klimawandel – Empfehlungen zur Bewahrung*: 152-157.
- KÄTZEL, R.; LÖFFLER, S. (2016): 20 Jahre Biomarker als Vitalitätsindikatoren im Forstlichen Umweltmonitoring - Ergebnisse und Erfahrungen. In: MLUL (Hrsg.): *30 Jahre forstliches Umweltmonitoring in Brandenburg. Eberswalder Forstliche Schriftenreihe, Bd. 63*: 174-189.
- KÜPPERS, K.; KLUMPP, G. (1988): Effects of Ozon, Sulfur Dioxide, and Nitrogen Dioxide on Gas Exchange and

Starch Economy in Norway Spruce (*Picea abies* [L.] Karst.). *Geo J.* 17 (2): 271-275.

KÖLLING, C.; ZIMMERMANN, L.; WALENTOWSKI, H. (2007): Klimawandel: Was geschieht mit Buche und Fichte? *AFZ-DerWald*, 11: 584-588.

LARCHER, W. (1987): Streß bei Pflanzen. *Naturwissenschaften* 74: 158-167.

LARCHER, W. (1990): Vitalitätsbestimmung. In: KREEB, K.-H.: *Methoden zur Pflanzenökologie und Bioindikation*. Fischer-Verlag Jena, 1990.

LUETHY-KRAUSE, B., LANDOLT, W. (1990): Effects of ozon on starch accumulation in Norway spruce (*Picea abies*). *Trees* 4: 107-110.

SCHUBERT, R. (1991): *Bioindikation in terrestrischen Ökosystemen*. G. Fischer Verlag Jena.

SELYE, H. (1957): *The stress of life*. McGraw-Hill Book Company Inc., New York.

TESCHE, M. (1995): Streß bei Pflanzen: Allgemeine und historische Aspekte. S. 420-426. In: HOCK, B., ELSTNER, E.F. (Hrsg.): *Schadwirkung auf Pflanzen. Lehrbuch der Pflanzentoxikologie*. 3. Aufl., 444 S., Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, Berlin, Oxford, 1995.

WILLENBRINK, J.; SCHATTEN, T. (1993): Die Assimilation von Kohlenstoff und der Assimilattransport in Coniferen unter dem Einfluß von Luftschadstoffen. Photosyntheseleistung und Assimilatverteilung in jungen Fichten (*Picea abies*) unter kontrollierter Ozon-Exposition. *Forschungsberichte zum Forschungsprogramm des Landes Nordrhein-Westfalen „Luftverunreinigungen und Waldschäden“*, Nr. 32.

ZIMMERMANN, R.-D. (1996): Begriffsdefinition zur Bioindikation. In: *Umweltwissenschaften und Schadstoff-Forschung. Zeitschrift für Umweltchemie und Ökotoxikologie* 8 (3): 169-171.

Zur physiologischen Differenzierung der Rot-Buche am Beispiel einer Fläche des „Internationalen Herkunftsversuches 1996/98“ im Fläming

Ralf Kätzel, Mirko Liesebach, Frank Becker, Sonja Löffler

Die Herkunftsgebietsverordnung für forstliches Forstvermehrungsgut (FoVHGv, vom 7. Oktober 1994 [BGBl. I. S. 3578]) weist für die Rot-Buche 26 Herkunftsgebiete innerhalb Deutschlands auf der Grundlage ökologischer Grundeinheiten und der vermuteten spezifischen Anpassung an die jeweiligen standörtlichen Bedingungen aus. Dies ist im Vergleich zu anderen Baumarten eine besonders hohe Anzahl und soll u.a. die Berücksichtigung einer größeren genetischen Variabilität innerhalb des Verbreitungsgebietes unterstreichen. Die Fähigkeit zur lokalen Anpassung, die in der Folge zu einer genetischen und phänotypischen Differenzierung zwischen den Beständen führt, gibt Hinweise über das Potenzial einer Baumart sich auch an künftige, veränderte Umweltbedingungen anpassen zu können (Anpassungsfähigkeit).

Inwieweit sich die einzelnen Herkünfte tatsächlich hinsichtlich ihrer genetischen Ausstattung und ihrer phänotypischen Merkmale unterscheiden, soll u.a. mit Hilfe von Herkunftsversuchen unter Freilandbedingungen untersucht werden. Herkunftsversuche, die ursprünglich zumeist mit waldbaulichen und ertragskundlichen Zielstellungen angelegt wurden, bilden heute eine wichtige Grundlage, um ökophysiologische Fragestellungen zur Anpassungsfähigkeit unterschiedlicher Herkünfte innerhalb ihres Verbreitungsgebietes untersuchen zu können (KÖNIG 2005).

Der „Internationale Herkunftsversuch 1996/98“ mit Rot-Buche

Zur Erfassung der phänotypischen Variation der Rot-Buche wurde in den 1980er Jahren begonnen, internationale Herkunftsversuche anzulegen (VON WÜHLISCH et al. 1998; LIESEBACH 2015). Zusammen umfassen die drei Serien der 1980er Jahre und die beiden der 1990er Jahre 65 Flächen mit 427 Herkünften. Die Anlage der Versuchsserien wurde vom Thünen-Institut für Forstgenetik in Großhansdorf koordiniert. Das Saatgut für die Versuche wurde unter einheitlichen Bedingungen in der Baumschule des Instituts in Großhansdorf ausgesät, die Pflanzen angezogen und an die Partner verschickt.

Die 5. Serie, der Internationalen Herkunftsversuch 1996/98 mit Rot-Buche, umfasst 26 Versuchsfelder

in 17 Ländern auf denen insgesamt 82 Bestandesnachkommenschaften (Herkünfte) verglichen werden. Das Saatgut für diesen Versuch wurde 1996 ausgesät. Im Frühjahr 1998 wurden die Flächen mit 2-jährigen Sämlingen als randomisierter Blockversuch mit drei Wiederholungen angelegt. In jeder Parzelle stehen 50 Bäume (5 Reihen mit je 10 Pflanzen) einer Herkunft im Verband 2 m x 1 m (LIESEBACH 2012, 2015). Eine dieser Versuchsfelder befindet sich im Fläming im Forstamt Nedlitz, Revier Golmenglän (heute Forstbetrieb Anhalt, Revier Hoher Fläming) an der Grenze zwischen Sachsen-Anhalt und Brandenburg. Auf der Versuchsfeldfläche werden 33 Herkünfte aus dem gesamten Verbreitungsgebiet der Rot-Buche geprüft. Für die vorliegende Untersuchung wurden im Jahr 2016 vom LFE 9 Herkünfte ausgewählt und jeweils 15 vorherrschende Buchen je Herkunft (je 5 Bäume aus 3 Parzellen) beprobt. Von den insgesamt ausgewählten 135 Buchen wurden am 17./18.08.2016 und am 14./15.08.2018 Blattproben aus der belichteten Oberkrone entnommen.

Das Blattmaterial wurde bei -80 °C eingefroren, anschließend vermahlen und gefriergetrocknet. Wie bei KÄTZEL und LÖFFLER (2016) beschrieben, wurden die Gehalte an Chlorophyllen a+b, Carotinoiden, Kohlenhydraten, Stärke, phenolischen Inhaltsstoffen, Aminosäuren, Ascorbinsäure und Proteinen analysiert und die Osmolalität des Blattpresssaftes bestimmt.

Die statistische Auswertung und die grafische Darstellung der Ergebnisse erfolgte mit dem Programmpaket SPSS (Fa. SPSS Inc. Chicago, USA) für Windows Version 25.0. Mittelwertunterschiede zwischen den einzelnen Herkünften wurden mit der einfachen (einfaktoriellen) Varianzanalyse (ANOVA, Duncan-Test) auf dem Signifikanzniveau von $\alpha = 0,05$ ermittelt. Nach Betrachtung der korrelativen Zusammenhänge aller Biomarker erfolgte eine Faktorenanalyse nach der Hauptkomponentenmethode (z-transformierte Werte, Varimax-Rotation), in der die korrelierenden Variablen auf drei voneinander unabhängige Variablen reduziert wurden. Zur Darstellung der biochemischen Muster wurde eine *Clusterung* nach dem Verfahren von Ward (quadratisch euklidische Distanzen zum Clustermittelwert) durchgeführt. Die so ermittelten *Cluster* unterschieden sich hinsichtlich ihrer Ausprägung in den zuvor extrahierten Faktoren. Mit Hilfe einer Varianz-

analyse (ANOVA, Tukey-HSD-Test, $\alpha = 0,05$) wurden diese Unterschiede statistisch verifiziert.

Versuchsfläche Golmenglin

Die etwa 1 ha große Versuchsfläche Golmenglin liegt in Sachsen-Anhalt ($51^{\circ} 59' N$, $12^{\circ} 19' O$) in 120 m über Seehöhe im Forstlichen Wuchsgebiet Hoher Fläming, Wuchsbezirk Nedlitzer Flämingrandplatte (Abb. 1). Es handelt sich um einen ebenen Waldstandort. Der Versuch wurde unter einem Schirm aus Kiefern des Vor-

bestandes etabliert. Die mittlere Jahresdurchschnittstemperatur betrug zum Zeitpunkt der Anlage $8,5^{\circ} C$ und in der Vegetationsperiode $16,2^{\circ} C$. Die Spanne zwischen kältestem (Januar) und wärmsten Monat (Juli) beträgt 18,7 Kelvin. An Niederschlag fallen etwa 702 mm im Mittel je Jahr, davon 297 mm in der Vegetationszeit (42 %).

Die pseudomaritim beeinflusste Grundmoräne besteht aus stark verwittertem lehmigen Geschiebesand. Beim Bodentyp handelt es sich um eine Nedlitzer Sandbraun-

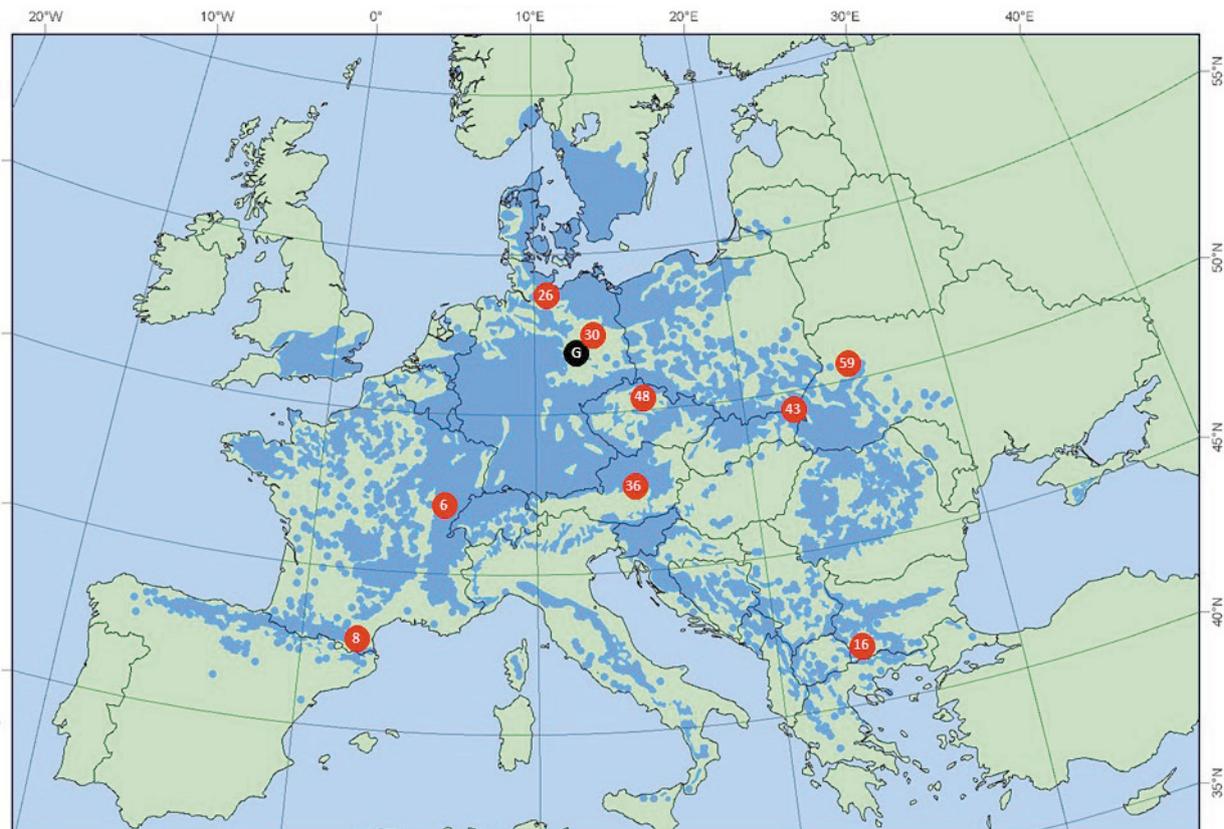


Abb. 1: Natürliches Verbreitungsgebiet der Rot-Buche und Lage der Einsammlungsorte der untersuchten Herkünfte (rot) sowie der Versuchsfläche Golmenglin (schwarz) (Karte: EUFORGEN 2008)

erde. Der Standort ist mäßig nährstoffversorgt und weist eine durchschnittliche Wasserversorgung auf.

Die neun ausgewählten Herkünfte

Für die vorliegende Untersuchung wurden neun Herkünfte ausgewählt, die von klimatisch sehr unterschiedlichen Standorten stammen (Abb. 1, Tab. 1, 2). Die Einsammlungsorte reichen im Norden von *Farchau* (Schleswig-Holstein, Hk-Nr. 26), einer Herkunft, die in Vergleichsprüfungen als Standard berücksichtigt werden sollte, bis in die Pyrenäen (Frankreich, Hk-Nr. 8) im Südwesten bzw. ins Pirin-Gebirge (Bulgarien, Hk-Nr. 16) im Südosten. Die Herkunft *Belzig* (Hk-Nr. 30) stammt aus der Nähe der Versuchsfläche und repräsentiert die örtliche Herkunft. Die Herkünfte stammen aus Höhen zwischen 55 und 1.450 m.

Das Temperaturspektrum reicht von einer mittleren Jahresdurchschnittstemperatur von $4,4^{\circ} C$ bis $12,1^{\circ} C$.

Der mittlere Jahresniederschlag variiert von 574 mm bis 1.632 zwischen den Einsammlungsorten.

Die Klimaangaben basieren auf für den Einsammlungsort- bzw. Prüfort interpolierten 30-jährigen Mitteln (1960-1990) des Deutschen Wetterdienstes. Betrachtet man den Ellenberg-Quotient (Tab. 2), so hat die Konkurrenzkraft der Herkunft *Pidkamin* (Ukraine) am Einsammlungsort bereits abgenommen.

Auch hinsichtlich der in 21 Jahren erbrachten Wachstumsleistung unterscheiden sich die ausgewählten Herkünfte (Tab. 3). Im Alter von 7 Jahren ist nur eine (*Plateaux*, FR) der neun ausgewählten Herkünfte unter dem Versuchsflächenmittel (82 % der gepflanzten Stammzahl) zu finden. Die Stammzahl der lebenden Bäume der neun Herkünfte variiert zwischen 97 % (*Pyrénées*, FR und *Pidkamin*, UA) und 58 % (*Plateaux*, FR). Bis zum Alter von 21 Jahren sinkt die Zahl der lebenden Buchen auf 48 % im Versuchsflächenmittel und beträgt

Tab. 1: Geografische Angaben zu den Einsammlungsorten der 9 Herkünfte

	Herkunft	Land (Bundesland)	Hk-Nr.	Geo. Länge [° O]	Geo. Breite [° N]	Höhe [m] (über N.N.)
1	FA Belzig , Obf. Wiesenburg, Rv. Setzsteig (122 81054 615 2)	DE (BB)	30	12° 25'	52° 03'	140
2	FA Farchau , Rv. Gredenberge, Abt. 72 a (011 81002 082 2)	DE (SH)	26	10° 40'	53° 39'	55
3	Pyrénées orientalis , FD des Corbieres occidentale (HC.4.19.002)	FR	8	2° 19'	42° 55'	670
4	Plateaux du Jura , FD de La Faye de Montsand (HC4.11.015)	FR	6	5° 50'	46° 48'	600
5	Gotze Delchev , Blagoevgrad, Loma	BG	16	23° 44'	41° 34'	1.450
6	Pidkamin , Lvivskij	UA	59	25° 23'	49° 57'	320
7	Jablonec , Gene Base (B-BK-106-21a-6-JN)	CZ	48	15° 14'	50° 48'	760
8	Eisenerz , Nostiz'sche Gutsverwaltung Geyeregg (I-5-9-14)	AT	36	14° 51'	47° 32'	1.100
9	FA Lutowiska, Jawornik , Abt. 92 a	PL	43	22° 49'	49° 15'	238

Tab. 2: Klimaangaben zu den Einsammlungsorten der 9 Herkünfte und zum Versuchsort

	Herkunft	Land	Hk-Nr.	Tm [°C]	Tveg [°C]	Nm [mm]	Nveg [mm]	[%]	Ai	Ki	QE
1	Belzig	DE	30	8,5	15,0	609	307	50	33	0,23	29,1
2	Farchau	DE	26	8,3	14,6	698	340	49	38	0,08	24,6
3	Pyrénées	FR	8	12,1	16,1	964	369	38	44	0,70	21,3
4	Plateaux	FR	6	8,9	14,9	1632	671	41	86	0,37	10,8
5	Gotze Delchev	BG	16	11,4	12,8	822	375	46	38	1,76	17,4
6	Pidkamin	UA	59	7,2	-	574	-	-	33	0,56	34,8
7	Jablonec	CZ	48	5,4	12,9	921	469	51	60	0,83	15,7
8	Eisenerz	AT	36	4,6	12,7	1519	789	52	104	0,72	9,3
9	Jawornik	PL	43	4,4	12,8	986	564	57	68	0,24	14,8
	Versuchsfläche			8,5	16,2	702	297	42	38	0,17	25,5

Ai= Ariditätsindex, Ki= Kontinentalitätsindex, QE= Ellenberg-Quotient

Tab. 3: Stammzahl im Alter 7 und 21 sowie mittlere Baumhöhe (Alter 7) und mittlerer BHD (Alter 21) der neun bzw. aller Herkünfte der Versuchsfläche

	Herkunft	Land (Bundesl)	HK-Nr.	Stammzahl Alter 7 N (%)	Stammzahl Alter 21 N (%)	Höhe Alter 7 [m] (%)	BHD Alter 21 [cm] (%)
1	Belzig	DE (BB)	30	138 (92 %)	60 (40 %)	1,27 (113 %)	6,5 (117 %)
2	Farchau	DE (SH)	26	139 (93 %)	83 (55 %)	1,38 (123 %)	5,4 (97 %)
3	Pyrénées	FR	8	146 (97 %)	108 (72 %)	1,49 (133 %)	5,7 (102 %)
4	Plateaux	FR	6	87 (58 %)	43 (29 %)	0,72 (64 %)	4,3 (77 %)
5	Gotze Delchev	BG	16	131 (87 %)	96 (64 %)	1,19 (106 %)	5,8 (105 %)
6	Pidkamin	UA	59	145 (97 %)	76 (51 %)	1,23 (110 %)	6,5 (117 %)
7	Jablonec	CZ	48	130 (87 %)	104 (69 %)	1,03 (92 %)	5,4 (97 %)
8	Eisenerz	AT	36	134 (89 %)	95 (63 %)	1,20 (107 %)	5,3 (95 %)
9	Jawornik	PL	43	133 (89 %)	95 (43 %)	1,18 (105 %)	5,5 (98 %)
	Versuchsfläche			(82 %)	(48 %)	1,12 m	5,55 cm

zwischen 72 % (*Pyrénées*, FR) und 29 % (*Plateaux*, FR). Bei drei Herkünften (*Belzig*, DE 40 %, *Plateaux*, FR 29 %, *Jawornik*, PL 43 %) liegt die Stammzahl unter dem Versuchsflächenmittel.

Die mittlere Höhenwuchsleistung beträgt im Alter von 7 Jahren 1,12 m und variiert von 64 % (*Plateaux*, FR) bis 133 % (*Pyrénées*, FR) zwischen den neun Herkünften. Im Durchmesserwachstum (BHD, Alter 21) erreichen die Buchen im Mittel 5,55 cm. Hier liegt die Variation

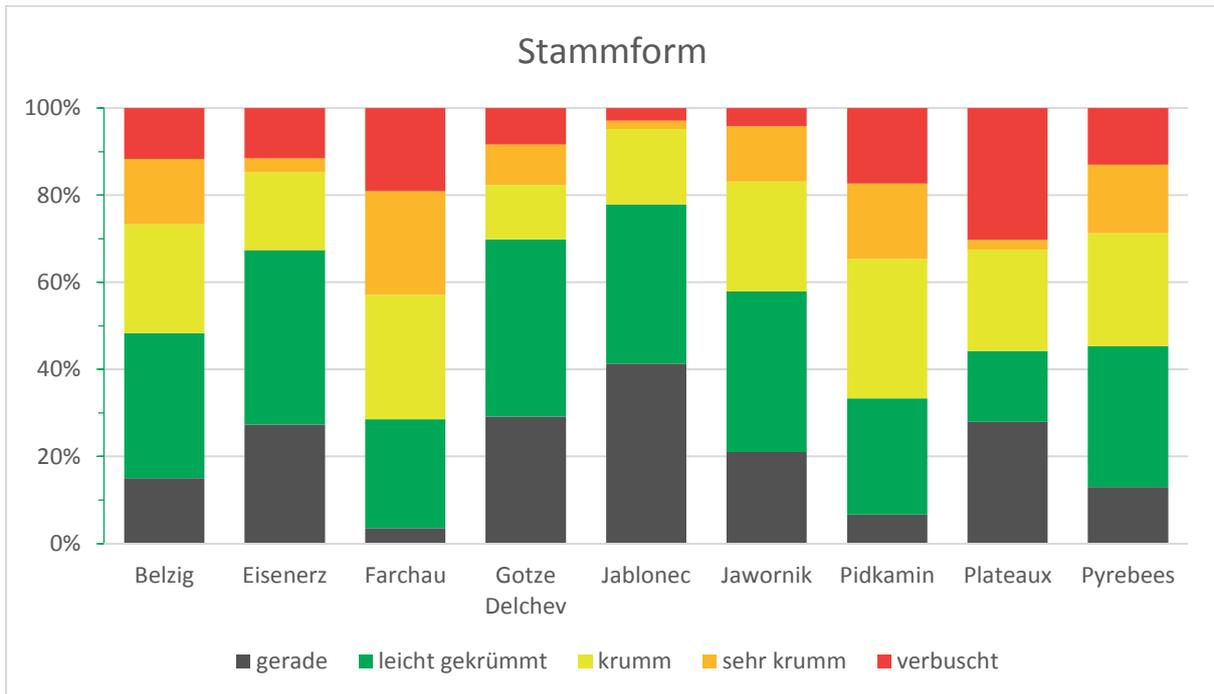


Abb. 2: Stammformen der neun Herkünfte

zwischen 77 % (*Plateaux*, FR) und 117 % (*Belzig*, DE und *Pidkamin*, UA).

In Abbildung 2 ist die Häufigkeit der Stammform (5 Stufen: gerade, leicht gekrümmt, krumm, sehr krumm, verbuscht) für die neun Herkünfte wiedergegeben. Bei drei Herkünften (*Jablonec*, CZ, *Golze Delchev*, BG und *Eisenerz*, AT) liegt der Anteil an geraden und nur leicht gekrümmten Bäumen über 60 %. Während zwei Herkünfte (*Farchau*, DE und *Pidkamin*, UA) durch einen Anteil an krummen, sehr krummen bzw. verbuschten Bäumen von über 60 % auffallen.

Vergleich der meteorologischen Bedingungen der Untersuchungsjahre 2016 und 2018

Die meteorologischen Bedingungen der beiden Untersuchungsjahre 2016 und 2018 unterschieden sich erheblich. In der Vegetationsperiode (01.04.-30.09.) 2016 und 2018 fielen 317 bzw. 187 mm Niederschlag

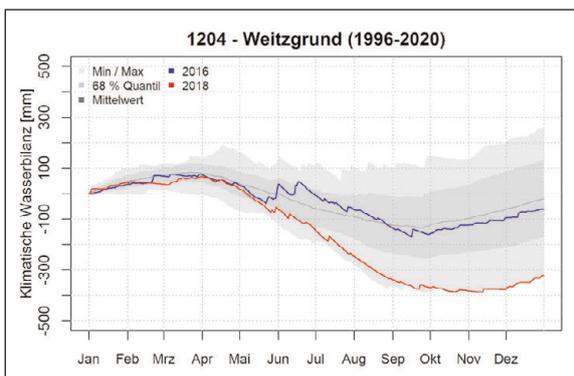


Abb. 3: Jahresverlauf der klimatischen Wasserbilanz der Jahre 2016 und 2018 auf der nahegelegenen Waldklimastation 1204 (Oberförsterei Belzig, Abb. HENTSCHEL, pers. Mitt.)

bei einer mittleren Tagestemperatur von 15,9 bzw. 17,5 °C. Besonders deutlich unterschieden sich die beiden Jahre bezüglich der klimatischen Wasserbilanz (Abb. 3), so dass für die physiologischen Untersuchungen die Ergebnisse des Jahres 2018 Reaktionen auf extreme Trockenheit abbilden, die in den Bezug zu dem durchschnittlich wasserversorgtem Jahr 2016 gestellt werden.

Aktuelle Untersuchungsziele

Mit der zunehmenden Gefährdung der Rot-Buche infolge des Klimawandels stellt sich die Frage, ob sich ggf. Herkünfte aus südlicheren und trockneren Regionen des Verbreitungsgebietes für einen künftigen Anbau in Brandenburg (resp. im nordostdeutschen Tiefland) besser eignen als heimische Herkünfte.

Hierzu sollte am Beispiel des 20-jährigen Herkunftsversuches im Jahr 2016 zunächst untersucht werden, inwieweit sich Buchen aus dem europäischen Verbreitungsgebiet auch unter optimalen Wuchsbedingungen phänotypisch hinsichtlich der Ausstattung mit stoffwechselphysiologisch relevanten Inhaltsstoffen auf einem mitteldeutschen Standort unterscheiden. Durch die extreme Trockenheit des Jahres 2018 bot sich die Möglichkeit, die Buchen zum zweiten Mal zu beproben und hinsichtlich ihrer Trockenstressreaktionen unter Freilandbedingungen zu bewerten.

Die Untersuchungen leisten einen Beitrag zur Beantwortung folgender Fragen:

1. Unterscheiden sich die Herkünfte anhand der biochemischen Ausstattung resp. Konstellation stressphysiologisch relevanter Blattinhaltsstoffe (Biomarkermuster)?

2. Welche Unterschiede resp. Gemeinsamkeiten bestehen zwischen den Herkünften hinsichtlich der Trockenstressanpassung im Untersuchungsjahr 2018?
3. Wie unterscheidet sich die phänotypische Plastizität der einzelnen Individuen innerhalb der Herkünfte?
4. Lassen sich nichtheimische Buchenherkünfte für den künftigen Anbau im norddeutschen Tiefland im Vergleich zur heimischen Herkunft aus Belgiz empfehlen bzw. ausschließen?

Ergebnisse

Osmolalität der Blätter

Schwankungen im Wasserhaushalt von Pflanzen lassen sich an der Osmolalität des Presssaftes von Blättern untersuchen. Die Osmolalität ist eine integrative Größe, die neben dem Wassergehalt in der Zelle auch ein Maß für die Konzentration osmotisch wirksamer Substanzen im Zellsaft darstellt. Für die Osmoregulation der Pflanzenzelle übernehmen Saccharide, anorganische Ionen (z. B. Kalium) und organische Säuren eine wichtige Funktion (JONES et al. 1977). Die Erniedrigung des osmotischen Potentials (d. h. der Anstieg der Osmolalität) bewirkt durch die aktive Akkumulation osmotisch wirksamer Substanzen die Konstanz des relativen Wassergehaltes (TYREE und JARVIS 1982).

Bei guter Wasserversorgung (Untersuchungsjahr 2016) lagen die Mittelwerte für die Osmolalität der Buchenblätter zwischen 0,62 osmol/kg (*Pidkamin*, UA) und 0,73 osmol/kg (*Eisenerz*, AT). Sowohl die Unterschiede zwischen den Mittelwerten der ukrainischen Herkunft *Pidkamin* und den anderen Herkünften als auch die hohen Mittelwerte der österreichischen und bulgarischen Herkunft *Eisenerz* und *Gotze Delchev* (MW=0,72 osmol/kg) waren signifikant.

Unter den Wassermangelbedingungen des Sommers 2018 stieg die Osmolalität hoch signifikant an und erreichte Mittelwerte zwischen 0,79 osmol/kg (*Pyrenées*, FR) und 0,89 osmol/kg (*Gotze Delchev*, BG). Auch bei der Brandenburger Herkunft stieg die Osmolalität auf den zweithöchsten Mittelwert des Gesamtkollektivs

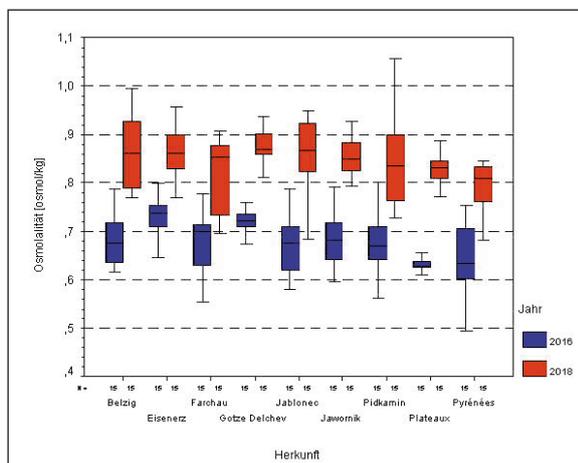


Abb. 4: Osmolalität der Buchenblätter in den Untersuchungsjahren 2016 und 2018 differenziert nach Herkünften

(0,87 osmol/kg). Der Signifikanztest differenziert alle Werte wiederum in drei Gruppen, wobei sich die geringeren Werte der beiden Herkünfte aus Frankreich, Deutschland (*Farchau*) und der Ukraine sowie der mittlere Wert der Herkunft aus Österreich von den hohen Werten der Herkünfte aus *Jablonec* (CZ), *Jawornik* (PL), *Belzig* (DE) und *Gotze Delchev* (BG) abhob (Abb. 4).

Gehalte an löslichen Kohlenhydraten

Im Untersuchungsjahr 2016 unterschieden sich die Blattgehalte an löslichen Kohlenhydraten zwischen den einzelnen Herkünften hoch signifikant mit den geringsten Gehalten bei den beiden französischen Herkünften (*Pyrenées*: 106,4 mg/g TM, *Plateaux*: 109,7 mg/g TM) bzw. bei den tschechischen Buchen (Hk-Nr. 48: 107,9 mg/g TM) und den hohen Gehalten der Buchen aus *Farchau* (DE: MW=121,5 mg/g TM) und *Jawornik* (PL: MW=117,6 mg/g TM). Die Buchen aus *Belzig* (DE) nehmen mit einem mittleren Gehalt von 114,7 mg/g TM eine mittlere Rangposition ein.

Infolge der Trockenheit im Jahr 2018 reicherten sich die Kohlenhydrate in den Blättern an und erreichten Mittelwerte zwischen 124,2 mg/g TM (*Jablonec*, CZ) und 130,1 mg/g TM (*Plateaux*, FR). Damit zeigten die französischen und tschechischen Buchen auch die stärksten Kohlenhydratzunahmen. Nahezu ebenso hohe Gehalte erreichten die Buchen aus *Belzig* (130,0 mg/g TM). Die Unterschiede in den Gehalten zwischen den neun Herkünften waren im Jahr 2018

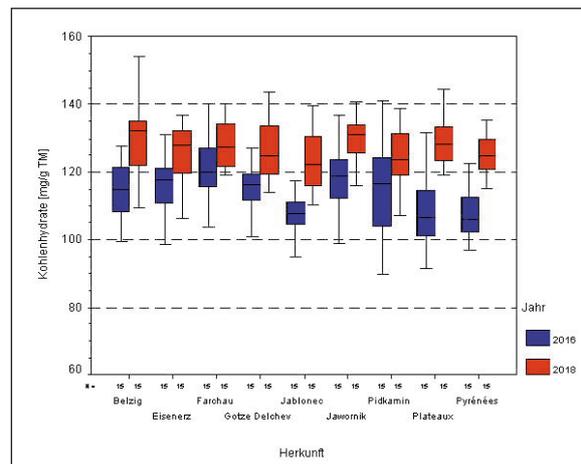


Abb. 5: Gehalte an löslichen Kohlenhydraten in den Buchenblättern in den Untersuchungsjahren 2016 und 2018 differenziert nach Herkünften

aufgrund der hohen Streuungen der Werte nicht signifikant (Abb. 5).

Gehalte an löslicher Stärke

Unter fortgeschrittenem Wassermangel ist der Abbau der löslichen Stärke ein charakteristischer Stressmarker (KÄTZEL et al. 2015). Aufgrund des hohen turnover unterliegen Stärkegehalte unter optimalen Wachstumsbedingungen generell einer hohen Variabilität.

Dies bestätigte sich auch im Untersuchungsjahr 2016. Die Buchenblätter der Herkünfte aus *Belzig* (DE: MW=27,95 mg/g TM), *Eisenerz* (AT: MW=25,15 mg/g TM) und *Jawornik* (PL: MW=22,17 mg/g TM) hatten die höchsten Gehalte. Dagegen waren z.B. die Stärkegehalte bei den ukrainischen Buchen aus *Pidkamin* (UA: MW=12,92 mg/g TM), *Jablonec* (CZ: MW=16,71 mg/g TM) und *Plateaux* (FR: MW=17,52 mg/g TM) signifikant geringer.

Unter den Wassermangelbedingungen der Vegetationsperiode von 2018 fielen die Stärkegehalte bei allen Herkünften deutlich ab. Die signifikant geringsten Gehalte enthielten die Blätter der Herkünfte aus *Pyrénées* (F, Hk-Nr. 8: MW=8,76 mg/g TM) und *Jablonec* (CZ, Hk-Nr. 48: MW=9,34 mg/g TM). In den Buchenblättern aus *Belzig* waren zwar die Stärkegehalte halbiert, blieben aber auf der 1. Rangposition mit den signifikant höchsten Gehalten von MW=14,26 mg/g TM. Nahezu ebenso hohe Gehalte enthielten die Buchen aus *Jawornik* (PL, Hk-Nr. 43: MW=13,27 mg/g TM) (Abb. 6)

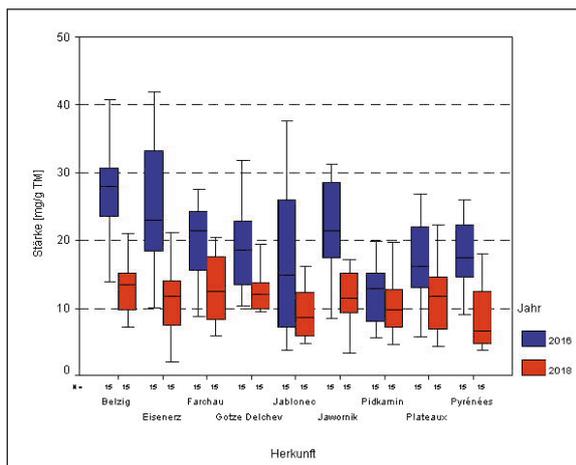


Abb. 6: Gehalte an löslicher Stärke in den Buchenblättern in den Untersuchungsjahren 2016 und 2018 differenziert nach Herkünften

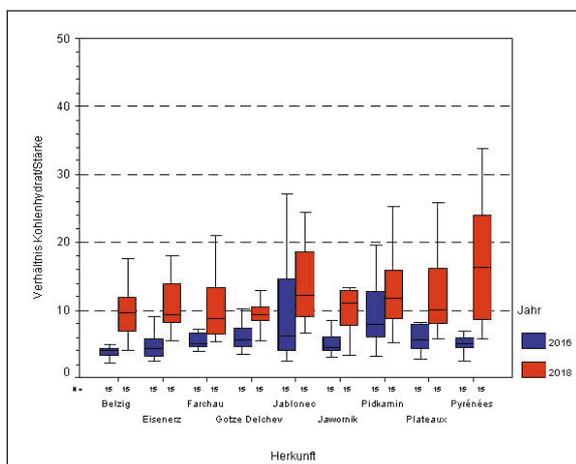


Abb. 7: Stöchiometrisches Verhältnis der Gehalte der löslichen Kohlenhydrate zu Stärke in den Buchenblättern in den Untersuchungsjahren 2016 und 2018 differenziert nach Herkünften

Davon abgeleitet stieg das Verhältnis von Kohlenhydrat- zu den Stärkegehalten der Blätter. Die Unterschiede zwischen den beiden Untersuchungsjahren fielen bei den Herkünften aus *Pyrénées*, *Jablonec* und *Jawornik* besonders groß aus. Dagegen waren die Werte für diesen Quotienten in beiden Jahren bei den heimischen Herkünften aus *Belzig* am geringsten innerhalb des Probenkollektivs (Abb. 7).

Gehalte an Ascorbinsäure

Unter den guten Wachstumsbedingungen des Jahres 2016 waren die Blattgehalte an Ascorbinsäure zwischen den Herkünften weitgehend ausgeglichen. Auffällig waren die signifikant höheren Gehalte der Herkünfte aus *Jablonec* (CZ: MW=4,39 mg/g TM) und *Farchau* (DE: MW=4,28 mg/g TM), während die Gehalte der Herkunft aus *Pyrénées* (FR: MW= 3,51 mg/g TM) am geringsten ausfielen.

Unter den Trockenstressbedingungen des Jahres 2018 stiegen die Ascorbatgehalte bei allen Herkünften an. Dabei fiel die Zunahme bei der Herkunft aus *Jablonec* am geringsten aus (CZ: MW=4,53 mg/g TM). Die signifikant höchsten Gehalte wurde in der deutschen Herkunft *Farchau* (MW=5,26 mg/g TM) nachgewiesen, während die höchste Zunahme von 2016

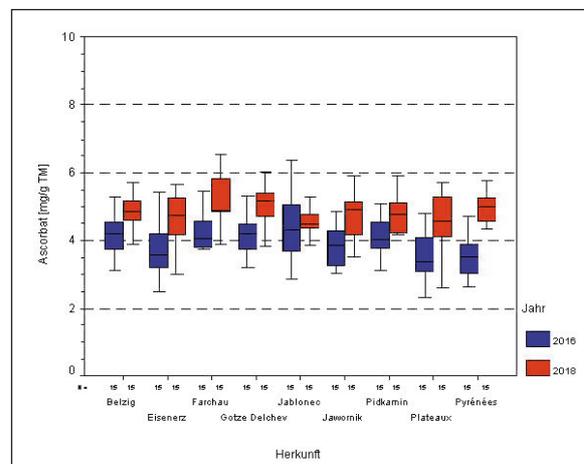


Abb. 8: Gehalte an Ascorbinsäure in den Buchenblättern in den Untersuchungsjahren 2016 und 2018 differenziert nach Herkünften

zu 2018 in der französischen Herkunft aus *Pyrénées* (MW=4,77 mg/g TM) beobachtet wurde. Die Buchen aus *Belzig* (DE) nehmen hier eine mittlere Rangposition ein (Abb. 8).

Gehalte an Gesamtchlorophyll (a+b)

Blattvergilbungen sind seit Beginn der Waldzustandsbeobachtung ein wichtiger Indikator für den Vitalitätszustand von Bäumen. Untersucht wurden die Gehalte der Chlorophylle a und b sowie der Carotinoide (Carotin und Xanthophylle).

Im Untersuchungsjahr 2016 schwankten die Mittelwerte der Chlorophyllgehalte zwischen 6,66 mg/g TM

(*Pidkamin*, UA) und den höchsten Gehalten in den beiden französischen Herkunftsorten *Plateaux* (MW=7,99 mg/g TM) sowie *Pyrénées* (MW=8,16 mg/g TM) und der österreichischen Herkunft *Eisenerz* (MW=8,34 mg/g TM) bei einer generell hohen Streuung der Werte.

Unter den Trockenbedingungen des Jahres 2018 nahmen die Chlorophyllgehalte generell ab, mit wiederum geringsten Werten bei den Buchenblättern der ukrainischen Herkunft *Pidkamin* (MW=6,66 mg/g TM). Die signifikant höchsten Chlorophyllgehalte enthielten die Blätter der Buchen der Herkunftsorte aus *Belzig* (DE: MW=7,45 mg/g TM), *Eisenerz* (AT: MW=7,36 mg/g TM) und *Pyrénées* (FR: MW=7,17 mg/g TM) (Abb. 9).

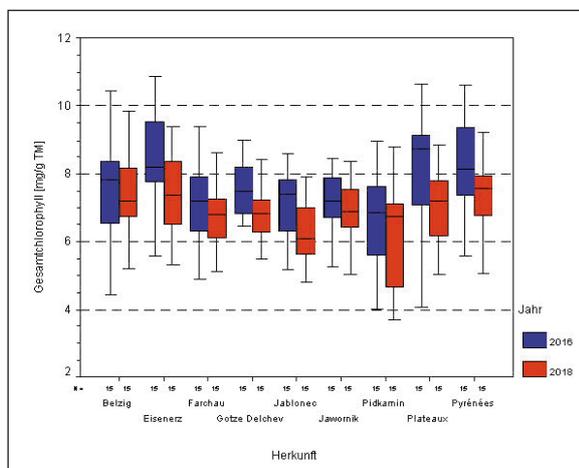


Abb. 9: Gehalte an Gesamtchlorophyll in den Buchenblättern in den Untersuchungsjahren 2016 und 2018 differenziert nach Herkunftsorten

Verhältnis der Chlorophyll-/Carotinoidgehalte

Chlorophyll wird nicht als isoliertes Molekül in den Plastiden akkumuliert, sondern im Verband von stöchiometrisch aufgebauten Holokomplexen, bestehend aus Chlorophyll, Carotinoiden und Strukturproteinen. Ein sicherer Schutz des Holokomplexes gegen Photooxydation ist dadurch gewährleistet, dass in jedem Chloroplasten neben Chlorophyllmolekülen auch ausreichende Carotinoidpartner bereitstehen (Übersicht bei MOHR und SCHOPFER 1992).

Das stöchiometrische Verhältnis zwischen den Pigmentkomponenten ist jedoch nicht konstant, sondern wird im Zuge von Anpassungsprozessen von äußeren Faktoren, wie z. B. dem Licht beeinflusst.

Auf die indikative Bedeutung von Pigmentverhältnissen haben in diesem Zusammenhang LICHTENTHALER und BUSCHMANN (1984) aufmerksam gemacht, wobei bei Schäden in den Chloroplasten das Chlorophyll:Carotinoid-Verhältnis abnimmt (OREN et al. 1993). So gilt der Quotient als ein Indikator für den bevorzugten Chlorophyllabbau unter Stressbedingungen.

Im Untersuchungsjahr 2016 waren die Chlorophyll:Carotinoid-Verhältnisse zwischen den Herkunftsorten weitgehend ausgeglichen. Trotz der guten Wachstumsbedingungen war der Wert bei der ukrainischen Herkunft

Pidkamin (UA: MW=6,28) signifikant vermindert. Auffällig waren ebenso die hohen Quotienten der beiden französischen Herkunftsorten *Plateaux* (MW=8,72) sowie *Pyrénées* (MW=8,38) und der österreichischen Herkunft *Eisenerz* (MW=9,06), die - wie bereits oben gezeigt - auf die Chlorophyllgehalte zurückzuführen sind.

Unter den Stressbedingungen des Jahres 2018 sanken die Quotienten bei allen Herkunftsorten auf Werte zwischen 4,41 (*Pidkamin*, UA) und 5,11 (*Belzig*, DE). Ebenfalls hohe Quotienten erreichten die Buchenblätter der österreichischen Herkunft *Eisenerz* (MW=5,05). Die Unterschiede zu den jeweils anderen Herkunftsorten waren signifikant (Abb. 10).

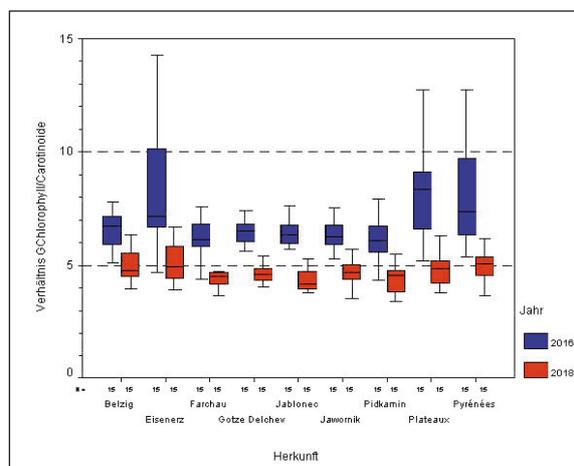


Abb. 10: Stöchiometrische Verhältnisse zwischen den Gehalten an Gesamtchlorophyll und Carotinoiden in den Buchenblättern in den Untersuchungsjahren 2016 und 2018 differenziert nach Herkunftsorten

Gehalte an freien Aminosäuren

Freie (ungebundene) Aminosäuren stellen innerhalb des pflanzlichen Primärstoffwechsels ein Verbindungsglied zwischen dem Kohlenhydrat- und dem Stickstoffmetabolismus dar. Sie liefern u. a. die Bausteine der Proteinsynthese, fungieren als Transportsubstanz, Stickstoffspeicher, beeinflussen den zellulären pH-Wert und das osmotische Potenzial (KÄTZEL und LÖFFLER 1995, SCHMEINK und WILD 1990).

In unbelasteten Blättern ist der Gehalt an freien Aminosäuren vergleichsweise gering, da der verfügbare Stickstoff an Proteine, Nucleinsäuren, Porphyrine etc. gebunden wird. So befinden sich die Gehalte an freien Aminosäuren unter den günstigen Wachstumsbedingungen des Jahres 2016 auf einem geringen Niveau. Die signifikant geringsten Gesamtgehalte haben die beiden französischen Herkunftsorte *Plateaux* (MW=4,68 µmol/mg TM) sowie *Pyrénées* (MW=6,09 µmol/mg TM). Die höchsten Gehalte wurden in der österreichischen Herkunft *Eisenerz* (MW=10,71 µmol/mg TM) nachgewiesen. Die Unterschiede zu den jeweils anderen Herkunftsorten waren signifikant.

Eine Zunahme an freien Aminosäuren unter Stressbedingungen ist u.a. auf den Abbau von Proteinen

zurückzuführen. Im Trockenjahr 2018 stiegen die Aminosäuregehalte bei allen Herkunftstypen signifikant an. Das Gesamtprobenkollektiv separierte sich in drei signifikant verschiedene Gruppen. Die beiden französischen Herkunftstypen *Plateaux* (MW=14,12 µmol/mg TM) und *Pyrénées* (MW=13,24 µmol/mg TM) stiegen auf ein vergleichsweise niedriges Niveau an. Die höchsten Gehalte und Zunahmen an freien Aminosäuren enthielten die Buchenblätter der Herkunft aus *Belzig* (DE: MW=23,60 µmol/g TM) und der österreichischen Herkunft *Eisenerz* (MW=21,00 µmol/mg TM) (Abb. 11).

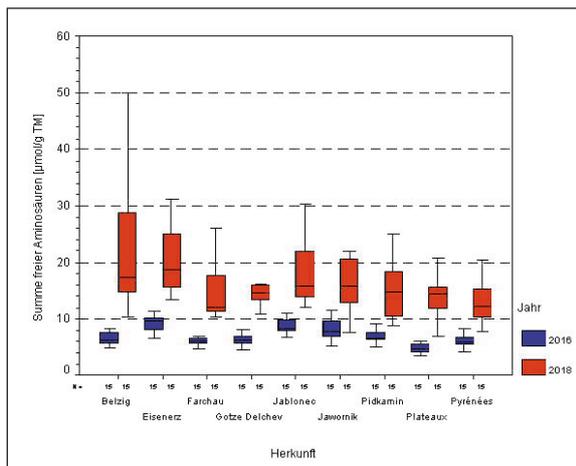


Abb. 11: Gehalte an freien Aminosäuren in den Buchenblättern in den Untersuchungsjahren 2016 und 2018 differenziert nach Herkunftstypen

Prozentualer Anteil an Prolin

Innerhalb der osmotisch wirksamen Substanzen nimmt die freie, ungebundene Aminosäure Prolin eine Sonderstellung ein, da sie bei einer Vielzahl von Organismen unter Stressbedingungen akkumuliert wird (Übersichten z. B. bei ASPINALL und PALEG 1981, STEWART 1981, TESCHE 1987). Ungebundenes Prolin, das zum größten Teil im Cytosol vorkommt, dient als Osmolytikum und verhindert über seine Wasserbindung die Dehydratation der Zelle (HANDA et al. 1986). In den Mitochondrien ist Prolin ein Aktivator des Tricarbonsäurezyklus und stabilisiert über die Interaktion mit Phosphorlipiden Membranstrukturen und Proteine (SMIRNOFF und CUBES 1989). Die Akkumulation der ungebundenen Aminosäure Prolin gilt als ubiquitärer Indikator für Stress, insbesondere für Trockenstress.

Hier dargestellt werden die prozentualen Prolinanteile (gemessen an dem Gesamtgehalt an löslicher Aminosäuren). Erwartungsgemäß waren die Prolingehalte unter den günstigen Wuchsbedingungen des Jahres 2016 gering. Parallel zu den Gesamtgehalten an freien Aminosäuren waren die Prolinanteile in den beiden französischen Herkunftstypen *Plateaux* (MW=2,29 %) sowie *Pyrénées* (MW=2,43 %) am signifikant geringsten und die der österreichischen Herkunft *Eisenerz* (MW=6,30 %) am höchsten.

Unter den Trockenstressbedingungen des Jahres stiegen die Prolingehalte teilweise um ein Mehrfaches an.

Aufgrund der hohen baumindividuellen Streuungen erreichten die Unterschiede zwischen den Herkunftstypen jedoch nicht das geforderte Signifikanzniveau. Die höchsten Mittelwerte der Prolingehalte wurde in den Herkunftstypen aus *Belzig* (DE: MW=14,51 %) und *Jablonec* (CZ: MW=14,39 %) gemessen. Aber auch die beiden französischen Herkunftstypen akkumulierten hohe Prolinanteile (*Plateaux*: MW=13,70 %; *Pyrénées*: MW=13,48 %). Die höchste Streuung bestand zwischen den Buchen innerhalb der ukrainischen Herkunft aus *Pidkamin* (Abb. 12).

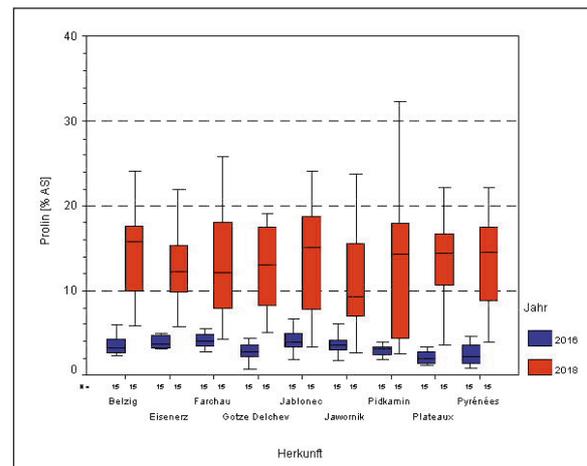


Abb. 12: Prozentuale Anteile der Aminosäure Prolin an den Gesamtgehalten an freien Aminosäuren in den Buchenblättern in den Untersuchungsjahren 2016 und 2018 differenziert nach Herkunftstypen

Blattwassergehalt

Ob die Anpassungsreaktionen während der Alarmphase der Stressreaktion erfolgreich waren, zeigt sich u. a. am Wassergehalt der Blätter. Den größten Anteil am Frischgewicht von Pflanzenteilen hat Wasser. Daher kommt dem absoluten und relativen Wassergehalt neben den beschriebenen Wasserstatusparametern in zweifacher Hinsicht eine indikative Bedeutung zu. Zum einen spiegelt der Blattwassergehalt unmittelbar die Versorgungsbilanz wider und zum anderen erklärende Veränderungen des Wassergehaltes abweichende Reaktionsmuster anderer stressorspezifischer Biomarker.

Bei guter Wasserversorgung im Jahr 2016 enthielten die Buchenblätter einen relativen Wassergehalt von 51,9 % (*Jawornik*, PL) bis 54,7 % (*Pyrénées*, FR). Die geringeren Mittelwerte der Herkunftstypen aus *Jawornik* (PL) und *Farchau* (DE) unterschieden sich signifikant von den höheren Blattwassergehalten aller anderen Herkunftstypen.

Im Trockenjahr 2018 sanken die Mittelwerte der Wassergehalte mit Ausnahme der polnischen Herkunft bei allen anderen Buchen leicht ab, mit Mittelwerten zwischen 52,7 % (*Farchau*, DE) und 54,7 % (*Pyrénées*, FR). Die geringen Unterschiede waren weder zwischen den Herkunftstypen noch zwischen den Untersuchungsjahren signifikant. Die Blätter der Buchen aus

Belzig enthielten mit einem Mittelwert von 54,0 % immer noch einen relativ hohen Wassergehalt (Abb. 13).

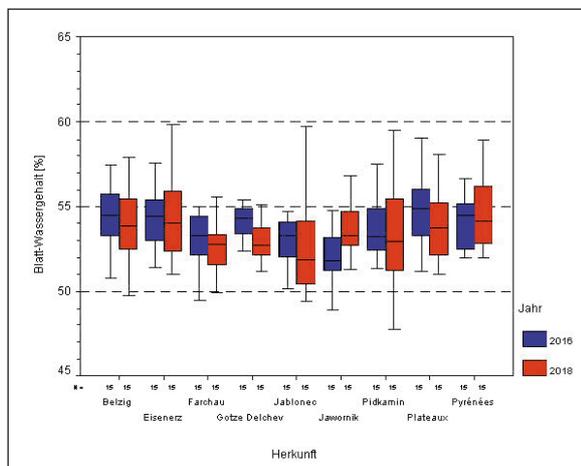


Abb. 13: Prozentualer Wassergehalt im Bezug zum Frischgewicht in den Buchenblättern in den Untersuchungsjahren 2016 und 2018 differenziert nach Herkünften

Gehalte an phenolischen Inhaltsstoffen

Die im Sekundärstoffwechsel gebildeten phenolischen Blattinhaltsstoffe haben vielfältige Funktionen im pflanzlichen Stoffwechsel (Abwehrsubstanzen gegenüber biotischen Schaderregern, Schutzstoffe gegenüber UV-Strahlung, Farbstoffe, biochemische Vorstufen für die Ligninsynthese u. v. m.). Räumliche, zeitliche und baumartenspezifische Unterschiede erlauben u. a. Hinweise auf Stressbelastungen und Abwehrreaktionen. Für die vorliegenden Untersuchungen wurden *Folin-positive Verbindungen* (als gesamtphenolische Inhaltsstoffe), *Vanillin-positive Verbindungen* und *Procyandine* (als kondensierte Phenole und deren Vorstufen) sowie *ortho-Dihydroxyphenole* analysiert.

Die Synthese dieser Substanzen unterliegt i. d. R. einer starken genetischen Kontrolle. Es ist daher nicht überraschend, dass sich das Gesamtkollektiv der Buchen in herkunftsspezifisch distinkt verschiedene Gruppen unterscheidet.

Folin-positive Verbindungen

Die geringsten Gehalte an folin-positiven Verbindungen enthielten im Jahr 2016 die Blätter der bulgarischen Herkunft aus *Gotze Delchev* (286,8 µmol/mg TM). Die höchsten Gehalte wurden in Blättern der deutschen Herkunft aus *Farchau* (MW=408,8 µmol/mg TM) nachgewiesen (Tab. 4).

Insgesamt lassen sich grob drei „Phenolgruppen“ unterscheiden:

- Gruppe 1: geringe Phenolgehalte: *Gotze Delchev* (BG), *Eisenerz* (AT), *Belzig* (DE)
- Gruppe 2: mittlere Phenolgehalte: *Pyrénées* (FR), *Pidkamin* (UA), *Plateaux* (FR)
- Gruppe 3: hohe Phenolgehalte: *Jablonec* (CZ), *Jawornik* (PL), *Farchau* (DE)

Unter den Trockenbedingungen des Jahres 2018 nehmen die Phenolgehalte bei allen Herkünften ab. Der Abfall ist insbesondere bei der Gruppe 3 am größten. Die Gruppenzugehörigkeiten bleiben jedoch mit Ausnahme der französischen Herkunft aus *Pyrénées*

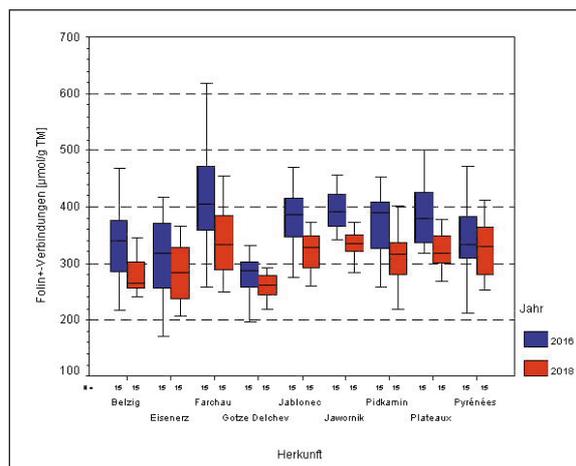


Abb. 14: Gehalte an Folin-positiven Verbindungen in den Buchenblättern in den Untersuchungsjahren 2016 und 2018 differenziert nach Herkünften

Tab. 4: Mittelwerte der Blattgehalte an folinpositiven Verbindungen differenziert nach Herkünften und Rangfolgen und statistisch signifikante Gruppenzugehörigkeit

Jahr	2016			2018		
	Mittelwert µmol/mg TM	Rang	Signifikanzgruppe	Mittelwert µmol/mg TM	Rang	Signifikanzgruppe
Belzig	335,7	7	a, b	276,9	8	a, b
Farchau	408,8	1	e	338,9	2	d
Pyrénées	351,9	6	b, c, d	325,7	3	d
Plateaux	380,3	4	c,d,e	319,8	5	c, d
Gotze Delchev	286,8	9	a	255,5	9	a
Pidkamin	369,9	5	c,d,e	312,2	6	b, c, d
Jablonec	385,0	3	c, d,e	320,5	4	c, d
Eisenerz	314,3	8	a, b	284,1	7	a, b, c
Jawornik	392,9	2	d, e	339,0	1	d

erhalten. Hier sinken die Gehalte an Folin-positiven Verbindungen nur gering, so dass die Rangposition innerhalb des Gesamtkollektivs relativ steigt (Abb. 14).

Ortho-Dihydroxyphenole

Als Summenparameter für die einfachen, niedermolekularen Phenole wurden die ortho-Dihydroxyphenole analysiert. Typische Vertreter der ortho-Dihydroxyphenole sind zum Beispiel Chlorogensäure, Caffeoesäure, Gallussäure und weitere zahlreiche Catecholderivate. Hierzu gehört auch das Guaiacol als Bestandteil des Buchenteers und verschiedener Pflanzenöle (Übersicht bei SUMERE 1989).

Im Gegensatz zu den Tanninen (s. u.) stehen die einfachen Phenole unmittelbar hinter dem Phenylalanin und Tyrosin am Anfang der Syntheseketten des Phenolstoffwechsels und sind daher eng mit dem Primärstoffwechsel über den Shikimat-Weg verknüpft. Funktionell sind die niedermolekularen Phenole, wie die hochmolekularen Tannine, u.a. Bestandteil der konstitutiven und induzierten Abwehr bei einer Vielzahl höherer Pflanzen. Sie besitzen antimikrobielle und fungizide Eigenschaften und werden z. B. im Fall von Pilzinfektionen in großen Mengen akkumuliert.

Auch bei den niedermolekularen ortho-Dihydroxyphenolen zeigt sich das gleiche Bild wie bei den Folin-positiven Verbindungen. Die Buchen aus Farchau (DE) haben in beiden Untersuchungsjahren mit Abstand die höchsten (2016: MW=368,4 µmol/mg TM) und die bulgarischen Buchen die geringsten Gehalte (2016: MW=247,2 µmol/mg TM). Die signifikant verschiedenen Phenolgruppen bleiben ebenfalls erhalten. Infolge der Trockenheit sanken die Werte bei allen Herkünften ab, wobei der Unterschied bei der Herkunft aus Pyrénées wiederum am geringsten ausfiel. Die insgesamt geringsten Gehalte an ortho-Dihydroxyphenolen wurden 2018 bei den Buchen aus Belgig (MW=193,9 µmol/mg TM) gemessen (Abb. 15).

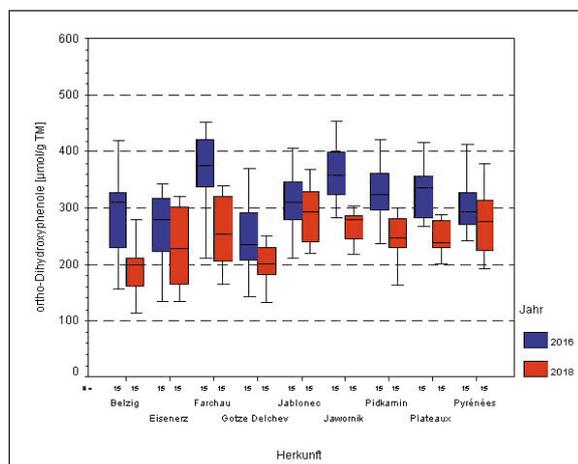


Abb. 15: Gehalte an ortho-Dihydroxyphenolen in den Buchenblättern in den Untersuchungsjahren 2016 und 2018 differenziert nach Herkünften

Vanillin-positive Verbindungen und Procyanidine

Als Summenparameter der kondensierten Tannine (Gerbstoffe) wurden Vanillin-positive Verbindungen und Procyanidine untersucht. Tannine sind im Pflanzenreich weitverbreitete wasserlösliche Polyphenole mit hohen Molekulargewichten von 500–20.000 U, die u.a. zur Proteinpräzipitation befähigt sind. Durch ihre Fähigkeit, irreversibel an Proteinen zu binden, kommt ihnen u.a. eine besondere Bedeutung bei der Abwehr von biotischen Schaderregern zu.

Unter den günstigen Wuchsbedingungen des Jahres 2016 untergliedert sich das Gesamtkollektiv der untersuchten Herkünfte hinsichtlich der Gehalte an Vanillin-positiven Verbindungen in drei signifikant verschiedene Gruppen:

- Gruppe 1: geringe Tanningehalten: *Gotze Delchev* (BG), *Eisenerz* (AT)
- Gruppe 2: mittlere Tanningehalte: *Pyrénées* (FR), *Pidkamin* (UA), *Plateaux* (FR), *Belzig* (DE), *Jablonec* (CZ)
- Gruppe 3: hohe Tanningehalte: *Jawornik* (PL), *Farchau* (DE)

Mit Ausnahme der Herkünfte aus Belgig (DE) und Jablonec (CZ), die der mittleren Gruppe zugeordnet wurden, stimmt die Gruppierung mit der Einteilung der Folin-positiven Verbindungen überein.

Bei den Procyanidinen zeigt sich die Differenzierung der Herkünfte noch deutlicher. Hier haben die Buchen aus Belgig die geringsten mittleren Gehalte (159,3 µmol/mg TM) und wurden der Gruppe 1 mit niederen Gehalten zugeordnet. Ebenso wird die tschechische Herkunft Jablonec mit den höchsten mittleren Gehalten von 241,8 µmol/mg TM der Gruppe 3 zugeordnet.

Unter den Trockenbedingungen des Jahres 2018 sanken die Gehalte an Vanillin-positiven Verbindungen einheitlich bei allen Herkünften ab. Die Abnahmen fielen wiederum bei den Buchen der Tanningruppe 3

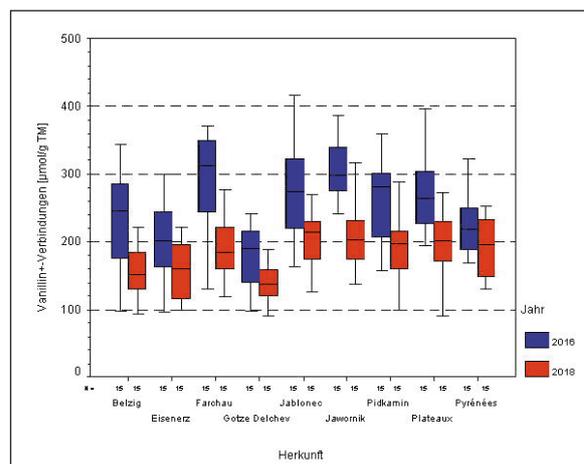


Abb. 16: Gehalte an Vanillin-positiven Verbindungen in den Buchenblättern in den Untersuchungsjahren 2016 und 2018 differenziert nach Herkünften

am höchsten aus. Hinsichtlich ihrer absoluten Gehalte spalten sich die Herkünfte in zwei distinkte verschiedene Gruppen auf. Die Buchen aus Belzig fallen mit niedrigen Gehalten in die Gruppe 1 zurück (MW=154,2 µmol/mg TM). Alle andere Herkünfte bilden eine einheitliche Gruppe mit relativ hohen Gehalten von MW=192,7 µmol/mg TM (*Pyrénées*, FR) bis zu MW=210,3 µmol/mg TM (*Jawornik*, PL) (Abb. 16).

Im Gegensatz zu den Vanillin-positiven Verbindungen nahm der Gehalt an Procyanidinen bei den beiden französischen Herkünften *Plateaux* (MW=141,6 µmol/mg TM) sowie *Pyrénées* (MW=273,3 µmol/mg TM) deutlich und bei der deutschen Herkunft aus *Farchau* (MW=257,1 µmol/mg TM) im Trockenjahr 2018 gegenüber 2016 leicht zu. Wiederum ergeben sich drei

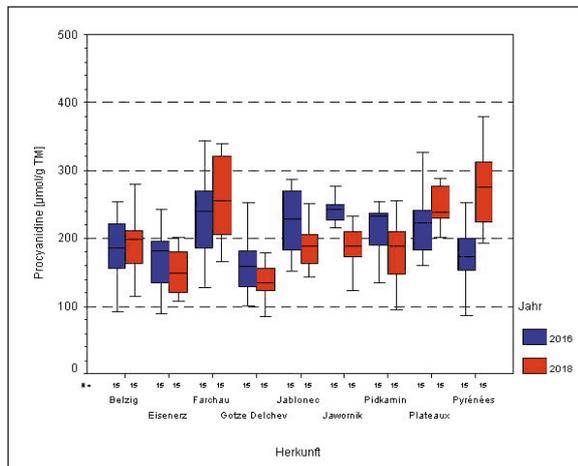


Abb. 17: Gehalte an Procyanidinen in den Buchenblättern in den Untersuchungsjahren 2016 und 2018 differenziert nach Herkünften

distinkte Gruppen, die sich von der o. g. Tannin-Gruppierung nur dadurch unterscheidet, dass die beiden französischen Herkünften gemeinsam mit den Buchen aus *Farchau* eine eigenständige Gruppe mit am höchsten Procyandingehalten bilden (Abb. 17).

Biochemische Muster der Blattinhaltsstoffe

Die Vorstellung der Einzelparameter belegt, dass die untersuchten Buchenherkünfte unter den Trockenstressbedingungen des Jahres 2018 einerseits meist die gleichen Anpassungs- resp. Stressreaktionen entsprechend der Stresskaskade bei Wassermangel zeigen, sich aber andererseits in der Intensität der Reaktionen signifikant unterscheiden. Ebenso besteht eine deutliche Differenzierung der Buchen hinsichtlich der Ausstattung mit phenolischen Inhaltsstoffen. Unterhalb der Herkunfts- resp. Populationsebene zeigten die einzelnen Buchen eine individuelle, spezifische Varianz in der Konstellation der Blattinhaltsstoffe. Deshalb sollten die Buchen zunächst unabhängig von ihrer Herkunft sogenannten *biochemischen Mustern* zugeordnet werden, die eine spezifische physiologischen Vitalitätsgruppe repräsentieren.

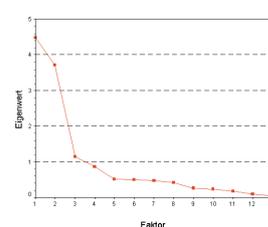
Da die untersuchten biochemischen Inhaltsstoffe auch einige interkorrelative Beziehungen zeigen, wurden mit Hilfe einer Faktorenanalyse die wechselseitig korrelierten Variablen auf wenige, voneinander unabhängige Variablengruppen (Faktoren) reduziert. Trotz der Parameterreduktion sollte der Informationsverlust möglichst geringgehalten werden. Durch die Hauptkomponentenanalyse wurde das Spektrum auf jene Biomarker eingegrenzt, die den größten Beitrag zur Beschreibung des physiologischen Zustandes leisten. Alle selektierten Faktoren müssen einer physiologischen Interpretation zugänglich sein und wurden in den weiteren Auswerteschritten wie eigenständige Parameter behandelt.

Unter Berücksichtigung des Kaiserkriteriums (Eigenwerte > 1) und Unterdrückung der Absolutwerte < 0,4 wurden aus den 13 Biomarkern der beiden Untersuchungsjahre drei Faktoren extrahiert, die 72 % der Gesamtvarianz erklären (Tab. 5).

Die Bezeichnung der einzelnen Faktoren entspricht in der Regel dem biochemischen Parameter, der mit

Tab. 5: Eigenwerte und erklärte Gesamtvarianz der extrahierten Faktoren mittels Screeplot

Faktor	Eigenwert	Erklärte Varianz [%]	Erklärte Gesamtvarianz [%]
1	4,48	34,5	34,5
2	3,73	28,7	63,2
3	1,14	8,8	72,0



Tab. 6: Bezeichnung der drei extrahierten Faktoren auf Grundlage der physiologischen Interpretation (in Klammern: erklärte Varianz der Einzelfaktoren) zusammen mit den in den Faktoren enthaltenen Biomarkern mit den größten Korrelationskoeffizienten

Faktor 1 (34,5 %)	Faktor 2 (28,7 %)	Faktor 3 (8,8 %)
Oxidativer Stress-Faktor	Phenol-Faktor	Wasser(-stress)-Faktor
Chlorophyll-Carotinoid-Verhältnis (-0,81) Ges. Chlorophyll (-0,80) Ges. Ascorbat (0,73) Kohlenhydrate (0,73) Blatt-Wassergehalt (-0,65)	Folin-pos. Verb. (0,93) o-Dihydroxyphenole (0,91) Procyanidine (0,81) Proteine (-0,59)	Stärke (-0,85) Σ löslicher AS (0,75) Prolin % (0,75) Freie Aminosäuren (0,75) Osmolalität (0,55)

höchster Faktorladung in den entsprechenden Faktor eingeht bzw. einem äußeren Einflussfaktor, der diese Parameterkonstellation ausgelöst hat (z. B. Trockenstress, oxidativer Stress) (Tab. 6).

Zuordnung der Einzelbäume in biochemische Clustergruppen

Unter Einbeziehung der drei Faktoren aus der Faktoranalyse wurde eine Clusteranalyse durchgeführt und sechs verschiedene Cluster identifiziert, denen sich alle Buchen der beiden Untersuchungsjahre einzeln zuordnen lassen (Tab. 7).

In 67 Fällen wurden die Buchen dem **Cluster 1** zugeordnet. Die Werte für den Faktor 1 als Indikator für oxidativen Stress sind in dieser Gruppe leicht erhöht. Diese Bäume zeichnen sich durch den signifikant geringsten Gehalt an phenolischen Inhaltsstoffen aus (Faktor 2). Bei diesen Bäumen traten keine Trockenstressreaktionen (Faktor 3) auf (Tab. 7; gelbgrüne Einfärbung in den Abb. 18 und 19).

Dem **Cluster 2** wurden 34 Fälle zugeordnet, die nur im Jahr 2016 auftraten und durch eine signifikant hohe Ausprägung des Faktors 2 (phenolische Inhaltsstoffe) charakterisiert sind. Die stressphysiologisch relevanten Faktoren 1 und 3 sind mit geringen Werten unauffällig (Tab. 7; blaue Einfärbung in den Abb. 18 und 19).

Dem **Cluster 3** wurden 49 Fälle zugeordnet, bei denen der Wert für den oxidativen Stress (Faktor 1) am

höchsten und für die Faktor 2 am zweithöchsten ist. Der Wert für den Faktor 3 ist ähnlich gering wie bei den Bäumen des Clusters 1 (Tab. 7; gelbe Einfärbung in den Abb. 18 und 19).

Nur 17 Fälle wurden dem **Cluster 4** zugeordnet. Es repräsentiert die Buchen mit den besten Vitalitätszuständen, die nur im Untersuchungsjahr 2016 vorgefunden wurden. Sie sind durch einen hohen Chlorophyllgehalt (geringer Wert für Faktor 1), einen mittleren Phenolgehalt (Faktor 2) und einen unauffälligen Wert für den trockenstressrelevanten Faktor 3, der auch dem des Clusters 2 entspricht, ausgestattet (Tab. 7; dunkelgrüne Einfärbung in den Abb. 18 und 19).

Dem **Cluster 5** wurden 33 Fälle mit der stärksten Trockenstressreaktion (Faktor 3) zugeordnet. Die Faktoren für den oxidativen Stress und die Ausstattung mit phenolischen Inhaltsstoffen nehmen mittlere bzw. geringere Werte ein (Tab. 7; rote Einfärbung in den Abb. 18 und 19).

Die 70 Fälle, die dem **Cluster 6** zugeordnet wurden, repräsentieren Buchen mit den stärksten Anzeichen für oxidativen Stress (z.B. überdurchschnittlich hohe Gehalte an Carotinoiden und Ascorbat, Faktor 1) und gleichzeitig den zweithöchsten Wert für den trockenstressanzeigenden Faktor 3. Der verminderte Phenolgehalt entspricht dem des Clusters 5 (Tab. 7; dunkelrote Einfärbung in den Abb. 18 und 19).

Tab. 7: Charakterisierung der verschiedenen Cluster hinsichtlich der ermittelten Faktorwerte sowie Zuordnung nach Signifikanzgruppen

	Faktor 1		
	Cluster	MW	Signifikanzgruppe
	1	0,14	c
	2	-0,60	b
	3	0,44	cd
	4	-2,30	a
	5	-0,70	b
6	0,74	d	
	Faktor 2		
	Cluster	MW	Signifikanzgruppe
	1	-0,92	a
	2	1,29	d
	3	0,84	c
	4	-0,10	b
	5	-0,50	ab
6	-0,07	b	
	Faktor 3		
	Cluster	MW	Signifikanzgruppe
	1	-0,84	a
	2	-0,09	b
	3	-0,69	a
	4	-0,26	b
	5	1,31	d
6	0,78	c	

Vergleicht man die beiden Untersuchungsjahre unabhängig von der Herkunft der Buchen, so zeigt sich, dass unter den optimalen Wuchsbedingungen des Jahres 2016 die Buchen den sechs Clustern resp. biochemischen Mustern mit unterschiedlichen Anteilen zugeordnet wurden. Der überwiegende Teil der Buchen differenziert sich in den Clustern 1, 2, 3 und 4. Nur sehr wenige Bäume wurden den stressanzeigenden Clustern 5 und 6 zugeordnet (Abb. 18, links).

Im Trockenjahr 2018 überwiegt dagegen der Anteil der Buchen, der ein stressphysiologisches Muster der Inhaltsstoffe aufweist (Cluster 5 und 6). Die Cluster 2 und 4, die sich u. a. durch hohe Chlorophyll- und Phenolgehalte auszeichnen, kommen nicht mehr vor. Nur wenige Buchen werden den Clustern 1 und 3 zugeordnet, die sich durch geringe und mittlere stressphysiologische Zustände auszeichnen (Abb. 18, rechts).

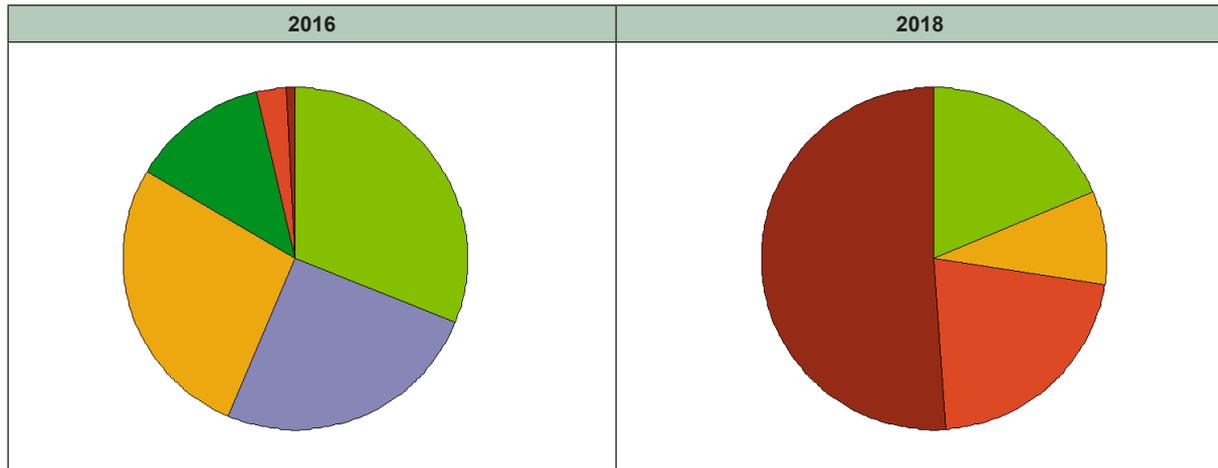


Abb. 18: Zuordnung aller untersuchten Buchen in die sechs ermittelten Cluster in Abhängigkeit der Untersuchungsjahre; Darstellung der Anzahl der Bäume pro Cluster als Häufigkeitskreisdiagramm (gelbgrün - Cluster 1, blau - Cluster 2, gelb - Cluster 3, dunkelgrün - Cluster 4, rot - Cluster 5, dunkelrot - Cluster 6)

Differenziert man die Clusterzuordnungen der Einzelbäume nach ihrer Herkunft, so wurden auf der Versuchsfläche im Fläming im Jahr 2016 die meisten Buchen der beiden französischen Herkünfte *Plateaux* und *Pyrénées*, gefolgt von den Bäumen der österreichischen Herkunft *Eisenerz* dem Cluster 4 (dunkelgrün) mit dem optimalen Biomarkermuster zugeordnet. Buchen mit einer ebenfalls günstigen Konstellation von Blatinhaltsstoffen und sehr geringen Phenolgehalten (Cluster 1, gelbgrün) gehören überwiegend zu den Herkünften *Gotze Delchev* (BG), *Belzig* (DE) und *Eisenerz* (AT) (Abb. 19).

Aufgrund der hohen Anzahl von Buchen mit hohen Phenolgehalten wurden dem Cluster 2 besonders viele Bäume der Herkünfte *Jablonec* (CZ), *Jawornik* (PL) und *Farchau* (DE) zugeordnet (Abb. 19).

Wie bei keiner anderen Herkunft zeigten sich im Untersuchungskollektiv der österreichischen Herkunft *Eisenerz* die größten Gegensätze in den biochemischen Mustern. Zum einen wurden die meisten Buchen den physiologisch günstigen Clustern 1 und 4 zugeordnet, zum anderen war hier auch der Anteil der Buchen mit den stressanzeigenden Clustern 5 und 6 am höchsten. Mit Zuordnungen zu sechs unterschiedlichen Clustern zeigte diese Herkunft die höchsten biochemischen Varianzen innerhalb des Untersuchungskollektivs (Abb. 19).

Unter den Trockenstressbedingungen des Jahres 2018 nahm die Vielfalt der biochemischen Muster deutlich ab und die Herkünfte zeigten ähnliche Anteile in den Verteilungen der stressanzeigenden Cluster 5 und 6. Der höchste Anteil mit Buchen des günstigen Clusters 1 wurde in der bulgarischen Herkunft *Gotze Delchev* nachgewiesen, während im Baumkollektiv der französischen Herkunft aus *Plateaux* keine einzige Buche stressarme biochemische Muster aufwies. Interessanterweise wurden aus der deutschen Herkunft *Farchau* mehr Bäume diesem relativ stressarmen Cluster geordnet wie der heimischen Herkunft aus *Belzig* (Abb. 19).

Im Gegensatz dazu wurden die Buchen der polnischen Herkunft *Jawornik* nur zwei Clustern (2 und 3) zugeordnet, die sich ausschließlich durch die unterschiedlich hohen Phenolgehalte unterschieden. Eine ähnliche günstige Konstellation wies die deutsche Herkunft aus *Farchau* auf, wo zusätzlich Buchen des Clusters 1 mit geringsten Phenolgehalten hinzukamen.

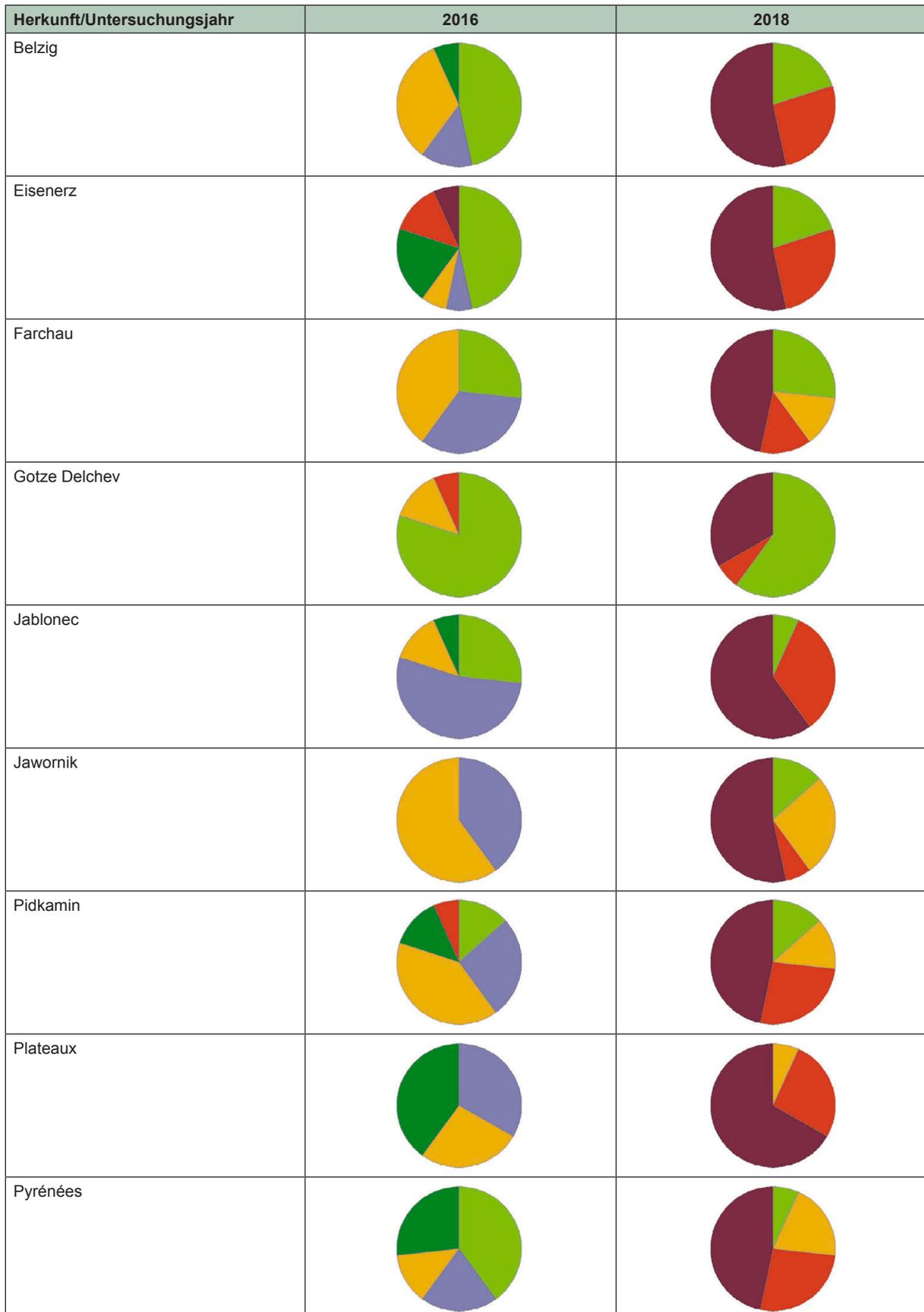


Abb. 19: Zuordnung aller untersuchten Buchen in die sechs ermittelten Cluster in Abhängigkeit der Untersuchungsjahre und Herkünfte; Darstellung der Anzahl der Bäume pro Cluster als Häufigkeitskreisdiagramm (gelbgrün - Cluster 1, blau – Cluster 2, gelb - Cluster 3, dunkelgrün – Cluster 4, rot – Cluster 5, dunkelrot – Cluster 6)

Diskussion und Fazit

Unter den Wuchsbedingungen am Standort Nedlitz entwickelten sich die Buchen aus neun verschiedenen europäischen Herkünften überwiegend optimal.

Während der 20-jährigen Standzeit der Buchen im Forstamt Nedlitz traten mehrfach Winterfröste, Spätfröste, Sommerhitze und Trockenheit auf, die die Bäume aus unterschiedlichen Ursprungsorten des europäischen Verbreitungsgebietes weitgehend ohne größere Ausfälle überlebten. Dies unterstreicht die große physiologische Plastizität der Baumart, zumindest in der Jugendphase.

Überdurchschnittlich hohe Verluste traten nur bei der französischen Herkunft *Plateaux* auf, die u. a. auch in der Wuchsleistung zurückfällt. Ein überdurchschnittliches Höhenwachstum zeigte sich bei der französischen Herkunft *Pyrénées* und bei den beiden deutschen Herkünften. Im Durchmesserwachstum überragt nach 21 Jahren die ukrainische Herkunft *Pidkamin* und die heimische Herkunft aus *Belzig*.

Innerhalb des Verbreitungsgebiets der Buche haben sich unterschiedliche physiologische Ökotypen entwickelt.

Neben der grundsätzlichen Anbaueignung unterschiedlicher Buchenherkünfte im norddeutschen Tiefland bestehen jedoch erhebliche, häufig signifikante Unterschiede bei einer Reihe phänotypischer Merkmale zwischen den einzelnen Herkünften. Die phänotypische Variabilität zwischen Buchenbeständen veranlasste bereits Krahl-Urban in den 1950 Jahren zur Anlage von Buchenherkunftsversuchen (KRAHL-URBAN 1953, 1958). Hier spiegelt sich die Langzeitanpassung (evolutionäre Anpassung) über mehrere Generationen an die jeweiligen Standortbedingungen wider. Unter günstigen Wuchsbedingungen des Jahres 2016 zeigten die Buchenherkünfte eine größere Differenzierung als unter Trockenstressbedingungen. Dies spiegelt sich insbesondere in der Ausstattung mit phenolischen Inhaltsstoffen wider. Hier wurden drei unterschiedliche Gruppierungen gefunden, die sich jedoch nicht in geografische Zonen abgrenzen lassen. Übereinstimmungen bestehen bei den beiden französischen Herkünften, die der Gruppe „mittlerer Phenolgehalte“ und bei der polnischen und tschechischen Herkunft, die der Gruppe „hoher Phenolgehalte“ zugeordnet wurden. Die Ursachen für die signifikant unterschiedlichen Phenolgruppen beider deutschen Herkünfte *Belzig* (Gruppe 1) und *Farchau* (Gruppe 3) sind derzeit nicht zu klären.

Die Trockenheit im Jahre 2018 löste unabhängig von der Herkunft Trockenstressreaktionen aus, die einer typischen Stresskaskade folgen und zu einer Vereinheitlichung durch Einengung der biochemischen Muster führte.

Alle untersuchten Buchen folgen bei Wassermangel einer klassischen Stresskaskade, die durch charakteristische Konzentrationsänderungen einer Reihe

von Inhaltsstoffen gekennzeichnet ist, und bereits bei anderen Baumarten beschrieben wurde (KÄTZEL und LÖFFLER 2014). Die physiologischen Reaktionen, die sowohl parallel als auch kaskadenartig auf mehreren genetischen und metabolischen Funktions- und Organisationsebenen ablaufen, sind zunächst darauf ausgerichtet, Stress zu vermeiden.

Am Beginn dieser Reaktionen steht die Schließung der Spaltöffnungen, wodurch sowohl ein weiterer Wasserverlust als auch der Gasaustausch vermindert wird. Dabei führt insbesondere die Anreicherung des Sauerstoffs und die Entstehung von *Radikalen Sauerstoffspezies* (ROS), durch Übertragung von freien Elektronen aus der Photosynthese auf den Sauerstoff, zu einer Anschaltung der antioxidativen Stressantwort, die u.a. an dem Anstieg der Gehalte an Carotinoiden und Ascorbinsäure sichtbar wird. Gleichzeitig werden bauminterne Wasserspeicher erschlossen (z. B. aus dem Stamm). Hierzu wird das osmotische Potenzial in den Zellen vermindert (Anstieg der Osmolalität), die Kohlenhydratgehalte nehmen zu und später steigt der Gehalt der freien Aminosäure Prolin.

Die erfolgreiche Osmoregulation der Blätter wird an den Blattwassergehalten deutlich, die trotz der Trockenheit kaum abfielen. Für die Osmoregulation der Pflanzenzelle übernehmen Saccharide, anorganische Ionen (z. B. Kalium) und organische Säuren eine wichtige Funktion. Eine Spaltung von Saccharose in Fruktose und Glukose führt mit geringem physiologischen Aufwand der Pflanze zu einer Verdopplung des osmotischen Druckes in der Pflanzenzelle (GORA 1995). Da die Phloembeladung (z. B. Transport von Kohlenhydraten von den Blättern in Stamm und Wurzel) gehemmt ist, stiegen u.a. die Gehalte an löslichen Kohlenhydraten an. Darüber hinaus beginnt der Abbau der Stärke und die Anreicherung der Aminosäure Prolin, die die Stabilisierungsphase einleiten soll (TESCHE 1987). Bei fortschreitender Stressbelastung beginnt der Abbau von Chlorophyllen bei einer gleichzeitigen Synthese von Carotinoiden und Ascorbinsäure, die weiteren oxidativen Stress verhindern sollen.

Diese überlebenswichtigen Anpassungs- und Stressreaktionen überlagern die phänotypische Vielfalt, die unter günstigeren Wuchsbedingungen zu beobachten war und führen damit zu einer Reduktion der Vielfalt biochemischer Muster.

Die heimische Herkunft aus *Belzig* ist nur gutes Mittelmaß und für die französische Herkunft *Plateaux* gibt es keine Empfehlung.

Im Rahmen des europäischen Forschungsnetzwerkes STREeSS (*Studying Tree Response to Extreme Events*) zeigte sich, dass junge Buchen aus trockeneren Herkunftsgebieten bei extremer Trockenheit eine höhere Toleranz aufwiesen (<http://streess-cost.eu>). Dabei bestand eine deutliche Altersabhängigkeit. Bei älteren Buchen traten Cavitationen (Lufteintritt in die Leitungsbahnen) deutlich häufiger auf als bei Jungpflanzen. SCHRAML und RENNENBERG (2002) berichten

ebenfalls, dass sich europäische Buchenprovenienzen aus trockneren Regionen besser an Wassermangel anpassen können als Herkünfte auf feuchten Habitaten. Dass sich diese Aussage auf der Herkunftsebene nicht verallgemeinern lässt, zeigt sowohl die hohe Sensitivität als auch der reduzierte Wachstumserfolg der französischen Herkunft *Plateaux*.

Die heimischen Buchen aus *Belzig* nehmen hinsichtlich ihrer Wuchsleistung vordere (BHD) und mittlere Ränge (Baumhöhe) ein. Die Trockenstressreaktion 2018 leiteten sie mit einem starken Anstieg der Osmolalität ein, wobei sowohl die Stärke-, Blattwasser- als auch die Chlorophyllgehalte noch immer auf einem vergleichsweise hohen Niveau verblieben. Angesichts dieser positiv zu bewertenden Anpassungsreaktionen überraschten die überdurchschnittlich hohen Gehalte an freien Aminosäuren und Prolin, die eine hohe Stressbelastung belegen. In der Gesamtschau der Biomarkermuster rangiert die heimische Herkunft mit einem relativ hohen Anteil an Buchen, die den Clustergruppen 5 und 6 zugeordnet wurden, auf dem Niveau der österreichischen Herkunft *Eisenerz* und hinter den Herkünften aus *Farchau* und *Gotze Delchev*.

In der parallelen Versuchsfläche am Standort Schädtebek bei Kiel dominierten zunächst die Herkünfte aus Brandenburg und Spanien. Nach der Trockenperiode 2003 fielen die Zuwächse der Herkünfte aus Brandenburg und Tschechien in den Folgejahren stark ab, während nun die Herkünfte aus dem Harz und Rumänien die höchsten Kreisflächenzuwächse aufwiesen. Die schlechter wachsenden Herkünfte hatten sich prophylaktisch mit verminderter Spaltöffnungsweite, folglich mit eingeschränkter Transpiration und geringerer Photosyntheserate, auf weitere Trockenstressereignisse eingestellt. Diese „Überlebensstrategie“ ist physiologisch bemerkenswert, da sie „Blattgenerationen“ betrifft, die den Trockensommer 2003 nie „erlebt“ hatten (KRIEBITZSCH et al. 2008, 2012). Dies könnte ein weiterer Hinweis dafür sein, dass sich diese Buchen stark isohydrisch verhalten und Trockenstressreaktionen baumintern über die Osmoregulation steuern.

Selektion von trockenstresstoleranten Individuen bzw. Beständen ist erfolversprechender als die Empfehlung von Herkunftsgebieten.

Bei der hier vorliegenden Auswertung wurden bewusst die Namen der Erntepopulationen in den einzelnen Ländern genannt, da aus den Ergebnissen der jeweils 15 untersuchten Bäume einer Population nicht auf Herkunftsgebiete (oder Herkunftsländer) geschlossen werden darf. Die Unterschiede zwischen den beiden französischen Herkünften belegen dies eindrucksvoll. Auf der Populationsebene muss sowohl der Wachstumserfolg als auch die Trockenstressanpassung der bulgarischen Herkunft *Gotze Delchev* gewürdigt werden und sollte weiter unter Beobachtung bleiben.

Nicht nur zwischen den Bestandesnachkommen (Herkünften) bestehen Unterschiede in den metabolischen Profilen, sondern auch zwischen den

Individuen innerhalb einer Herkunft. Die größten baumindividuellen biochemischen Unterschiede bestehen innerhalb der Herkunft *Eisenerz* und die größten Übereinstimmungen innerhalb der Herkunft *Jawornik*. Die Untersuchungsergebnisse zeigen enge Parallelen zu Ergebnissen aus einem Eichenherkunftsversuch in Brandenburg (KÄTZEL et al. 2019, 2020), im dem innerhalb einzelner Herkünfte sowohl Bäume mit einer erhöhten als auch mit einer verminderten Trocken- (und Spätfrost-) Toleranz vorkamen. Die Buchen zeigen insbesondere unter günstigen Wuchsbedingungen eine hohe physiologische Plastizität mit teilweise unterschiedlichen, individuellen biochemischen Mustern. Hier ergeben sich Selektionsmöglichkeiten von Einzelbäumen mit einer erhöhten Stresstoleranz zur Anlage von Samenplantagen, die derzeit erfolversprechender (leider auch zeitaufwendiger) zu sein scheint, als die Empfehlung von Herkünften auf der Grundlage von Herkunftsgebieten.

Möglicherweise erlangt die lokale Anpassung von Beständen/Populationen eine noch größere Bedeutung als die Differenzierung nach Herkunftsgebieten. Nach Untersuchungen mit 2-jährige Sämlingen zur Differenzierung der Spätfrosttoleranz zwischen Buchenherkünften aus Süddeutschland und West-Bulgarien erwiesen sich einzelne lokale Herkünfte ebenfalls sowohl als sensitiv als auch als tolerant (KREYLING et al. 2012).

Zum Schluss: eine kritische Betrachtung der Ergebnisse

Die vorgestellten Untersuchungen aus den meteorologischen gegensätzlichen Sommern 2016 und 2018 belegen die große phänotypische Plastizität der Buchen hinsichtlich ihrer Ausstattung mit biochemischen Blattinhaltsstoffen und ihrer Trockenstresstoleranz. Eine Verallgemeinerung der Ergebnisse ist jedoch nicht zu empfehlen, da

- nur 15 Buchen je Herkunft,
- nur das Trockenjahr 2018 (und nicht auch die Folgejahre 2019, 2020)
- und keine weiteren Stressreaktionen (z. B. Spätfrosttoleranz)

untersucht wurden.

Eine Weiterführung der Arbeiten ist erforderlich. Insbesondere die Spätfrosttoleranz ist vor dem Hintergrund zunehmend warmer Winter und eines früheren Blattaustriebbeginns ein wichtiges Kriterium für eine Anbauempfehlung. Bei einem Vergleich von nativen Buchenbeständen aus Spanien, Italien und Österreich zu Spätfrostschäden und deren Folgen auf das Baumwachstum zeigte sich, dass sich sowohl die Häufigkeit von Spätfrostereignissen als auch von Schäden in Südwesteuropa am stärksten ausbreiten (SANGÜESA-BARRERA et al. 2021). Wie bereits heute die o. g. Untersuchungen an verschiedenen Eichenherkünften (KÄTZEL et al. 2019, 2020) zeigen, wird dieses Selektionskriterium auch für das nordostdeutsche Tiefland

die Verwendung von Buchen vor allem aus dem südeuropäischen Verbreitungsgebiet einschränken. Hier sind weitere mehrjährige Untersuchungen, die multiple Stressreaktionen einschließen und sich verstärkt auf die Individual- und Populationsebene ausrichten, notwendig.

Literatur

- ASPINALL, D.; PALEG, L.G. (1981): Prolin accumulation: physiological aspects. In: PALEG, L.G.; ASPINALL, D. (eds.): The Physiology and Biochemistry of Drought Resistance in Plants. Academic Press, New York: 205–241.
- GORA, V. (1995): Physiologische Untersuchungen zur standort- und altersabhängigen Befallsdisposition von Kiefer-(*Pinus sylvestris*)-Beständen für nadelfressende Insekten. Dissertation am Inst. für Zoologie der Georg-August-Universität Göttingen.
- HANDA, S.; HANDA, A.K.; HASEGAWA, P.M.; BRESSAN, R.A. (1986): Prolin accumulation and the adaptation of cultured plant cells to water stress. *Plant Physiol.* 80: 935–945.
- JONES, M.M.; OSMOND, C.B.; TURNER, N.C. (1977): Accumulation of solutes in leaves of sorghum and sunflower in response to water deficits. *Aust. J. Plant Physiol.* 7: 193–205.
- KÄTZEL, R.; LÖFFLER, S. (1995): Untersuchungen zur Erholung von Kiefernbeständen im ehemaligen Stickstoffeintragsgebiet Lichterfelde/Britz. 2. Teil: Vitalität der Kiefern nach physiologischen und biochemischen Parametern. *Beiträge für Forstwirtschaft und Landschaftsökologie*, Berlin, 29 (2): 89–93.
- KÄTZEL, R.; LÖFFLER, S. (2014): Physiologische Indikatoren zur Bewertung von Trockenstress bei Bäumen. In: Generaldirektion der Stiftung Preußische Schlösser und Gärten Berlin-Brandenburg (Hrsg.): *Wasserhaushalt und Pflanzen - Historische Gärten im Klimawandel – Empfehlungen zur Bewahrung*: 152–157.
- KÄTZEL, R.; LÖFFLER, S. (2016): 20 Jahre Biomarker als Vitalitätsindikatoren im Forstlichen Umweltmonitoring - Ergebnisse und Erfahrungen. *Eberswalder Forstliche Schriftenreihe*, Band 63: 174–189.
- KÄTZEL, R.; ZANDER, M.; LÖFFLER, S. (2015): Wenn der Durst kommt – Eiche, Buche, Kiefer, Douglasie im Trockenstresstest. *Eberswalder Forstliche Schriftenreihe*, Band 55: 40–54.
- KÄTZEL, R.; LÖFFLER, S.; BECKER, F. (2020): Untersuchungen zur Klimaanpassung südosteuropäischer Herkünfte der Trauben-Eiche (*Q. petraea*) in Brandenburg - Eine erste Auswertung. *Thünen-Report* 76: 23–36.
- KÄTZEL, R.; BECKER, F.; KANTER, G.; HLAWATI, N.; LÖFFLER, S. (2019): Herkunftsversuche als Bewährungsprobe bei Witterungsextremen: Südosteuropäische Herkünfte der Trauben-Eiche (*Quercus petraea*) in Brandenburg - Eine erste Auswertung. *Eberswalder Forstliche Schriftenreihe*, Band 67: 81–98.
- KÖNIG, A.O. (2005): Provenance research: evaluating the spatial pattern of genetic variation. In: GEBUREK, T.; TUROK, J. (eds): *Conservation and management of forest genetic resources in Europe*. Zvolen. Arbora Publishers: 275–333.
- KRAHL-URBAN, J. (1953): Rassenfragen bei Eichen und Buchen. *AFZ Wald* 13: 478–480.
- KRAHL-URBAN, J. (1958): Vorläufige Ergebnisse der Buchenprovenienzversuche. *Allg. Forst Jagdzeitg.* 129: 242–251.
- KREYLING, J.; THIEL, D.; NAGY, L.; JENTSCH, A.; HUBER, G.; KONNERT, M.; BEIERKÜHNLEIN, C. (2012): Late frost sensitivity of juvenile *Fagus sylvatica* L. differs between southern Germany and Bulgaria and depends on preceding air temperature. *European Journal of Forest Research* 131: 717–725.
- KRIEBITZSCH, W.-U.; BECK, W.; SCHMITT, U.; VESTE, M. (2008): Bedeutung trockener Sommer für Wachstumsfaktoren von verschiedenen Herkünften der Buche. *AFZ Wald* (5): 246–248.
- KRIEBITZSCH, W.-U.; VESTE, M. (2012): Bedeutung trockener Sommer für die Photosynthese und Transpiration von verschiedenen Herkünften der Rot-Buche (*Fagus sylvatica* L.). *Landbauforsch* 62 (4): 193–210.
- LICHTENTHALER, H.K.; BUSCHMANN, C. (1984): Photooxidative changes in pigment composition and photosynthetic activity of air-polluted spruce needles (*Picea abies* L.). *Advances in Photosynthetic Research*, Vol IV (3): 245–250, M. Nijhof Publisher, The Hague 1984.
- LIESEBACH, M. (2012): Der Internationale Herkunftsversuch mit Rot-Buche von 1993/95 – Beschreibung der ausgewählten sechs Herkünfte und zwei Versuchsflächen. *Landbauforschung* 62 (4): 159–168.
- LIESEBACH, M. (2015): The international network of European beech trials – the base to study intra-specific variation. In LUKACIK, I.; SARVASOVA, I. (eds) *Dendroflora strednej Europy - vyuzitie poznatkov vo vyskume, vzdelavani a praxi: Zbornik bol vydany pri prilezitosti 50. vyrocia zalozenia Arboreta Borova hora*; Zvolen, 10.-11 jun 2015. Zvolen: Technicka Univerzita vo Zvolene: 169–187.
- MOHR, H.; SCHOPFER, P. (1992): *Pflanzenphysiologie*. 4. Auflage, Springer Verlag Berlin, Heidelberg, New York.
- OREN, R.; WERK, K.S.; BUCHMANN, N.; ZIMMERMANN, R. (1993): Chlorophyll-nutrient relationships identify nutritionally caused decline in *Picea abies* stands. *Can. J. For. Res.* 23: 1187–1195.

SANGÜESA-BARREDA, G.; DI FILIPPO, A.; PIOVESAN, G.; ROZAS, V.; FIORE, L.; GARCÍA-HIDALGO, M.; GARCÍA-CERVIGÓN, A.; MUÑOZ G., D.; BALIVA, M.; OLANO, J. (2021): Warmer springs have increased the frequency and extension of late-frost defoliations in southern European beech forests. *Science of the Total Environment* 775. DOI:10.1016/j.scitotenv.2021.145860.

SCHMEINK, B.; WILD, A. (1990): Studies on the Content of Free Amino Acids in Needles of undamaged and damaged Spruce Trees at a Natural Habitat. *J. Plant Physiol.* 136: 66–71.

SCHRAML, C.; RENNENBERG, H. (2002): Ökotypen der Rotbuche (*Fagus sylvatica* L.) zeigen unterschiedliche Reaktionen auf Trockenstress. *Forstwiss. Centralblatt* 121: 59-72.

SMINROFF, N.; CUBES, Q.J. (1989): Hydroxyl radical scavenging activity of compatible solutes. *Phytochemistry* 28: 1057–1060.

STEWART, C.R. (1981): Prolin Accumulation: Biochemical Aspects. In: PALEG, L.G.; ASPINALL, D. (eds.): *The Physiology and Biochemistry of Drought Resistance in Plants*. Academic Press, New York: 243–259.

VON SUMRE, C.F. (1989): Phenols and Phenolic Acids. In: HARBORNE, J. B.: *Methods in Plant Biochemistry: Plant Phenolics*. Academic Press London, San Diego: 20–32.

TESCHE, M. (1987): Prolin in Bäumen. I. Prolin in gesunden Bäumen. *Flora* 179: 335–343.

TYREE, M.T.; JARVIS, P.G. (1982): Water in tissues and cells. In: LANGE, O.L.; NOBEL, P.S.; OSMOND, C.B.;

ZIEGLER, H. (eds.): *Encyclopedia of plant physiology*. New series. Vol. 12B. *Physiological plant ecology II. Water relations and carbon assimilation*. Springer-Verlag, Berlin: 36–77.

VON WÜHLISCH, G. (2008): EUFOREGEN Technical Guidelines for genetic conservation and use for European beech (*Fagus sylvatica*). *Biodiversity International*, Rome, Italy. 6 S.

VON WÜHLISCH, G.; LIESEBACH, M.; MUHS, H.-J.; STEPHAN, B.R. (1998): A network of international beech provenance trials. In TUROK, J.; KREMER, A.; DE VRIES, S.G.M. (eds.): *First EUFOREGEN Meeting on Social Broadleaves*, 23.-15. October 1997, Bordeaux. IPPGRI, France: 164-172

Der genetische Fußabdruck der Verjüngungsphase – Einblicke in die Geschichte zweier alter Buchenbestände in Brandenburg

Pascal Eusemann, Ralf Kätzel, Frank Becker, Heike Liesebach

Die Buche nimmt etwa 3,3 Prozent der Waldfläche in Brandenburg ein (MLUK BRANDENBURG 2015, 2017). Bezogen auf den Oberstand ist die Art hier in vergleichsweise alten Beständen vertreten: ungefähr die Hälfte der Buchenwälder ist 100 Jahre und älter, insgesamt etwa ein Viertel sogar älter als 140 Jahre (MLUK BRANDENBURG 2017). Für solche alten Bestände sind Aufzeichnungen darüber, ob sie ursprünglich auf Naturverjüngung oder Pflanzung zurückgehen, häufig nicht mehr vorhanden. Dasselbe gilt für verlässliche Informationen darüber, woher das Vermehrungsgut im Falle einer Kunstverjüngung ursprünglich stammte.

Dabei ist die Entstehungsgeschichte einzelner Bestände nicht nur von akademischem Interesse, denn sie entscheidet maßgeblich über die genetische Zusammensetzung und Vielfalt sowohl des Altbestandes als auch der dort entstehenden Naturverjüngung und des dort produzierten Saatguts. Somit hat sie entscheidenden Einfluss auf die Angepasstheit und Anpassungsfähigkeit eines Bestandes an lokale standörtliche Bedingungen. Beobachtungen zur Vitalität oder Qualität können dabei unter Umständen nur vor dem geschichtlichen Hintergrund eines Bestandes präzise eingeordnet und interpretiert werden.

Genetische Analysen erlauben uns, die Verjüngungsphase von Beständen auch noch nach vielen Jahrzehnten zu rekonstruieren. Im Rahmen des nationalen Verbundprojektes zum Genetischen Monitoring (*GenMon*) war es möglich, eine Methode hierfür zu entwickeln und zu testen. Das Ziel des Projekts *GenMon* war die Einrichtung eines forstgenetischen Monitoringsystems für Buche und Fichte zur Bewertung der Anpassungsfähigkeit dieser Baumarten gegenüber Umweltveränderungen. Hierzu wurden deutschlandweit zwölf Buchen- und zehn Fichtenbestände ausgewählt und dort Monitoringflächen erstmalig eingerichtet oder bestehende Flächen für das genetische Monitoring genutzt.

Die meisten der ausgewählten Bestände sind sehr gut dokumentiert und teilweise auch die geschichtlichen Hintergründe der Flächen bekannt. So finden sich Bestände, die nachweislich seit mehreren Jahrhunderten

kontinuierlich im Schirmschlag verjüngt werden. In anderen Fällen gehen die aktuellen Bestände nachweislich auf Pflanzung zurück. Für alle Bestände ist darüber hinaus das Alter bekannt. Hieraus ergab sich die Möglichkeit, die genetischen Strukturen in Wäldern mit bekanntem Alter und bekannter Verjüngungsgeschichte zu analysieren und zu prüfen, wie stark die genetischen Strukturen aus der Verjüngungsphase in Beständen von mehr als 100 Jahren noch vorhanden sind.

Die Erkenntnisse aus Beständen mit bekannter Verjüngungsgeschichte können genutzt werden, um die Verjüngungsphase in Beständen zu rekonstruieren, für die solche Informationen nicht mehr vorliegen. Im *GenMon*-Projekt wurden auch zwei Monitoringbestände der Buche in Brandenburg eingerichtet. In einem Fall ist die geschichtliche Entwicklung der Fläche vergleichsweise gut dokumentiert. Für die andere Fläche fehlen konkrete, belastbare Dokumente. In diesem Beitrag soll die Verjüngungsphase dieser zwei Bestände rekonstruiert und die sich hieraus ergebenden Konsequenzen für die genetische Vielfalt aufgezeigt werden, die sich bis in die nächste Generation hinein auswirken können.

Rekonstruktion der Geschichte alter Bestände mit genetischen Methoden

Jedes Verjüngungsereignis hinterlässt eine genetische Signatur, die grundsätzlich das gesamte Lebensalter eines Bestandes hindurch nachweisbar bleibt. In Dauerwaldstrukturen und im Schirmschlagbetrieb findet die Verjüngung vorwiegend in der Nähe der Elternbäume statt. Hierdurch entstehen Strukturen, in denen verwandte Bäume überwiegend räumlich gruppiert stehen.

Bei der Produktion von forstlichem Vermehrungsgut wird das Saatgut aller in einem Saatgutbestand beernteten Bäume im Zuge der Ernte, Aufarbeitung und Anzucht vermischt. Die anschließende Saat oder Pflanzung produziert daher räumlich-genetische Muster, bei denen verwandte und unverwandte Pflanzen zufällig über die gesamte Verjüngungsfläche verteilt stehen.

Diese genetischen Ausgangsstrukturen können durch menschliche Eingriffe und natürliche Prozesse der Waldentwicklung im Laufe der Zeit verändert werden. Durchforstungen können durch die Entnahme von Bäumen bestehende Familienstrukturen abschwächen. Umgekehrt produziert natürliche Verjüngung, auch sporadische, in künstlich begründeten Beständen Familienstrukturen, die zum Zeitpunkt der Bestandsbegründung noch nicht vorhanden waren. In beiden Fällen besteht die Möglichkeit, dass die genetische Signatur der Verjüngungsphase mit dem Alter eines Bestandes schwächer wird. Dennoch zeigte sich, dass sich die genetische Signatur der Verjüngungsphase auch in Beständen mit einem Alter von 100 und mehr Jahren noch eindeutig nachweisen lässt.

Die Rekonstruktion dieses „genetischen Fußabdrucks“ der Verjüngungsphase basiert auf der Analyse (1.) von räumlich-genetischen Strukturen, (2.) der Verwandtschaftsbeziehungen zwischen den Bäumen und (3.) der Anzahl unabhängiger Fortpflanzungsgemeinschaften, auf die der Bestand zurückgeht.

Die Analyse der räumlich-genetischen Strukturen zeigt auf, ob die Bäume eines Bestandes in Familiengruppen beisammenstehen oder zufällig verteilt sind. Hierzu wird die genetische Ähnlichkeit und der räumliche Abstand zwischen allen Bäumen berechnet und grafisch aufgetragen (Abb. 1). Auf der x-Achse ist die räumliche

Entfernung in Distanzklassen, auf der y-Achse die genetische Ähnlichkeit in Form des genetischen Korrelationskoeffizienten r aufgetragen. Positive Werte für r sagen aus, dass die Bäume in der betreffenden Distanzklasse sich genetisch ähnlicher als im bestandsweiten Mittel sind. Negative Werte weisen umgekehrt auf eine geringere Ähnlichkeit als im Durchschnitt hin. Abbildung 1 zeigt oben ein Beispiel für räumlich-genetische Strukturen, wie sie in naturverjüngten Beständen zu finden sind: Positive Werte im Nahbereich zeigen die räumliche Gruppierung verwandter Bäume an. Negative Werte in höheren Distanzklassen weisen darauf hin, dass verwandte Bäume tatsächlich überwiegend kleinräumig gruppiert auftreten und entfernt voneinander wachsende Bäume sich genetisch weniger stark ähneln als im bestandsweiten Mittel. Die untere Teilabbildung zeigt die räumlich-genetischen Strukturen in einem gepflanzten Bestand: Hier bewegt sich die genetische Ähnlichkeit zwischen den Bäumen über alle Distanzklassen hinweg um den bestandsweiten Mittelwert. Die Konstruktion von Standardfehlern und 95%-Konfidenzintervallen ermöglicht es, die statistische Signifikanz der gemessenen Werte zu testen (HARDY & VEKEMANS 2002; PEAKALL & SMOUSE 2006, 2012).

Die Verwandtschaftsbeziehungen zwischen den Bäumen eines Bestandes können mit denselben statistischen Verfahren bestimmt werden, die für Eltern-

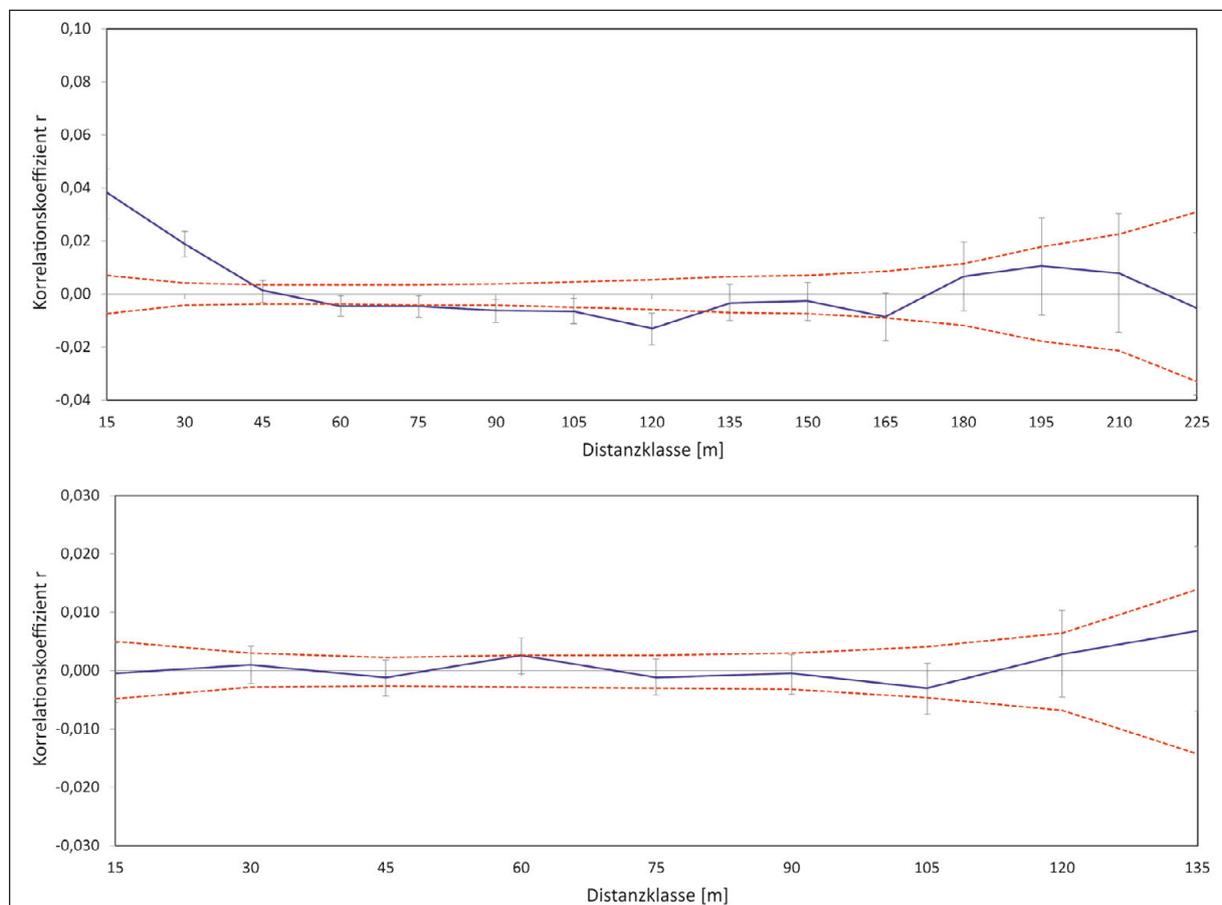


Abb. 1: Beispieldarstellung positiver (oben) und zufälliger (unten) räumlich-genetischer Strukturen.

schaftsanalysen eingesetzt werden (JONES & WANG 2010, WANG 2004, WANG & SANTURE 2009). Diese Methoden ermöglichen es, Bäume im 1. und 2. Verwandtschaftsgrad zu identifizieren. In gepflanzten oder im Schirmschlag natürlich verjüngten Beständen handelt es sich hierbei um Voll- und Halbgeschwister, sofern der Bestand nicht zwischenzeitlich begonnen hat, sich natürlich zu verjüngen. Aber auch in mehrschichtigen Wäldern mit überlappenden Generationen kann die Methode angewendet werden. Hier umfasst die Gruppe im 1. Verwandtschaftsgrad Vollgeschwister und Bäume im „Eltern-Kind“-Verhältnis. Die Gruppe im 2. Verwandtschaftsgrad umfasst Halbgeschwister sowie „Großeltern-Enkel“- und „Onkel/Tante-Neffe/Nichte“-Verhältnis. Eine weitere Auflösung dieser Verwandtschaftsverhältnisse setzt beispielsweise Kenntnis individueller Altersdaten voraus. Dennoch ist auch in Beständen mit mehreren Generationen sichergestellt, dass mit dieser Methode lediglich Familien sehr nahe verwandter Individuen identifiziert werden. Die Familienstrukturen lassen sich in Stammverteilungsplänen visualisieren und ergänzen so die Analyse der räumlich-genetischen Strukturen.

Die Anzahl der unabhängigen Fortpflanzungsgemeinschaften wird durch dieselben Verfahren der Verwandtschaftsanalyse ermittelt (JONES & WANG 2010). In zusammenhängenden Beständen einhäusiger und polygamer Baumarten wie der Buche repräsentieren sowohl der Altbaumbestand als auch die Nachkommen ein komplexes genetisches Mosaik aus verwandten Individuen in verschiedenen Verwandtschaftsgraden und unverwandten Individuen. Innerhalb dieses Mosaiks lassen sich in naturverjüngten Beständen in der Regel alle Bäume auf eine einzige Fortpflanzungsgemeinschaft zurückführen. Abbildung 2 illustriert, wie in einem solchen Bestand auch unverwandte Individuen in dieselbe Fortpflanzungsgemeinschaft eingebunden sind. Die Individuen NK2 und NK4 teilen keine Eltern, sind aber durch die Halbgeschwisterbeziehungen zu NK3 miteinander verbunden. Auf dieselbe Weise können auch NK1 und NK5 über mehrere Halbgeschwisterbeziehungen miteinander in Verbindung gesetzt werden. Letztlich gehen alle Individuen der Generation NK auf dieselbe Elternpopulation zurück.

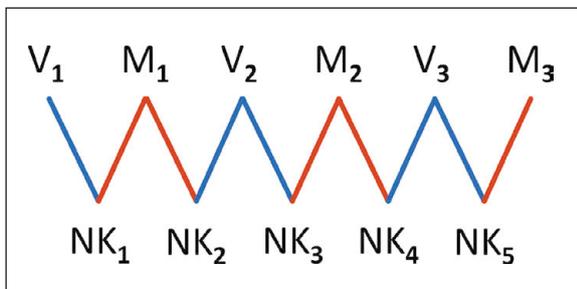


Abb. 2: Beispielstammbaum in dem alle Nachkommen durch Halbgeschwisterverbindungen auf dieselbe Fortpflanzungsgemeinschaft zurückgeführt werden können.

Auch in künstlich begründeten Beständen können alle Bäume auf eine einzige Fortpflanzungsgemeinschaft zurückgehen, wenn das verwendete Saatgut in einem einzigen Erntebestand und von nicht zu weit voneinander entfernt stehenden Bäumen gewonnen wurde. Wenn die Distanz zwischen den beernteten Bäumen groß ist, können die in geschlossenen Beständen vergleichsweise geringen Ausbreitungsdistanzen von Pollen und Samen (FUSSI et al. 2021) allerdings dazu führen, dass keine durchgehende Verbindung zwischen sämtlichen Nachkommen gefunden werden kann. So entstehen mehrere, voneinander getrennte Fortpflanzungsgemeinschaften. Dasselbe gilt, wenn für die Verjüngung Saatgut aus verschiedenen Quellen verwendet wurde. Da es in Bezug auf die Anzahl der Fortpflanzungsgemeinschaften keinen zwingenden Unterschied zwischen natürlich und künstlich verjüngten Beständen gibt, hat dieses Kriterium eher unterstützenden Wert und dient dazu, die Plausibilität der Rekonstruktion auf Grundlage der räumlich-genetischen Distanz und der Familienstrukturen zu stützen.

Die GenMon-Monitoringbestände „Menz“ und „Grumsin“

Im Rahmen des Projekts GenMon wurden für die Baumart Buche zwei Monitoringflächen in Brandenburg eingerichtet, vermessen und für genetische Analysen beprobt.

Die Fläche „Menz“ befindet sich im Norden Brandenburgs in unmittelbarer Grenznähe zu Mecklenburg. Die Monitoringfläche ist Teil eines großen zusammenhängenden Buchenbestands und grenzt an ein Naturwaldreservat und schließt die Level2-Fläche des Forstlichen Umweltmonitorings 1206 ein. Der Bestand zeigte bereits bei Isoenzym-Untersuchungen in früheren Projekten eine deutliche Differenzierung von anderen westlichen Herkünften. Das Alter des Bestandes lag zum Zeitpunkt der GenMon-Einrichtung 2016 bei 126 Jahren. Die Verteilung der Brusthöhendurchmesser (BHD) reichte zu diesem Zeitpunkt von 10,7 cm bis 91,0 cm (Abb. 3). Die Monitoringfläche umfasst 275 Altbäume.

Bei der GenMon-Fläche „Grumsin“ handelt es sich ebenfalls um einen reinen Buchenbestand. Die Monitoringfläche liegt im Naturschutzgebiet und gleichnamigen UNESCO Weltnaturerbe „Grumsin“. Die ausgedehnten Buchenwälder im Nordosten Brandenburgs zeigen Mosaikstrukturen aller Waldgenerationen von der Verjüngungs- bis zur Zerfallsphase, werden nicht mehr bewirtschaftet und ermöglichen so die Beobachtung natürlicher Selektions- und Anpassungsprozesse im subkontinental geprägten trockenen Tieflandklima. Das Alter des Bestandes lag bei der Einrichtung im Jahr 2016 bei 175 Jahren. Die Monitoringfläche umfasst 251 Bäume. Die BHD-Verteilung reichte zum Zeitpunkt der GenMon-Einrichtung von 15,6 cm bis 94,9 cm (Abb. 3).

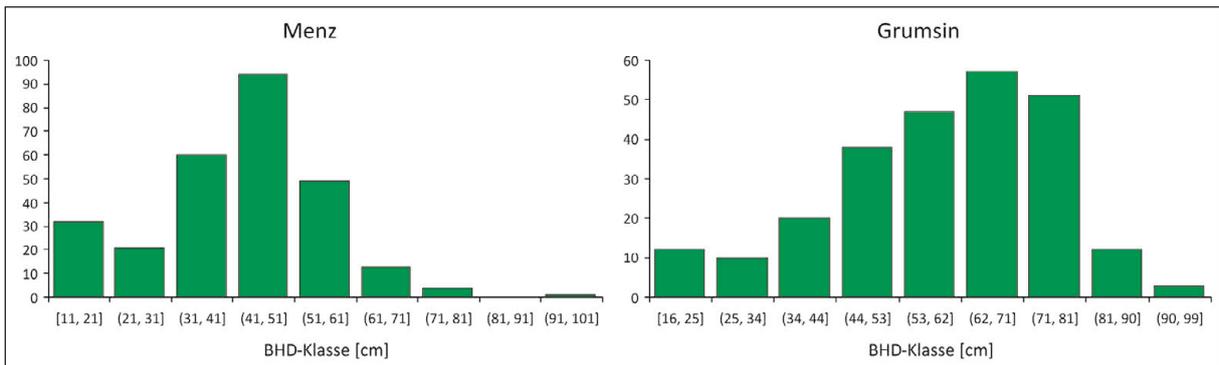


Abb. 3: BHD-Verteilung in den zwei Monitoringbeständen Menz (links) und Grumsin (rechts)

Historische Quellenlage zu den Versuchsflächen „Menz“ und „Grumsin“

Versuchsfläche „Menz“

Für die Versuchsfläche „Menz“ ist die Quellenlage gut. Der Zustand und die Entwicklung der Waldflächen in der Oberförsterei Menz, in der sich die Fläche befindet, lassen sich bis ins 18. Jahrhundert zurückverfolgen (Taxations-Revisionswerk der Oberförsterei Menz von 1874 und Vermessungs- und Abschätzungswerke der Oberförsterei Menz von 1892).

Vor dem Jahr 1750 war die Abnutzung des „alten Holzes“ kaum nennenswert, da es an Transportmöglichkeiten zum Abtransport des starken Holzes fehlte. In einem Bericht aus dem Jahre 1739 von dem dama-

ligen Revierverwalter KUMMER wird hervorgehoben, „daß massenhaft Lagerholz (Totholz, die Verf.) den Wald für das Vieh der Unterthanen ganz unzugänglich machte.“

Erst unter Friedrich dem Großen änderte sich dies schlagartig, als eine Verbindung zwischen dem Stechlin-, Nehmitz-, Roofen- und Wentowsee hergestellt und an die Havel angeschlossen wurde. Um die Kosten für die Wasserstraße zu refinanzieren und um die Wälder rund um Potsdam und Berlin zu schonen, wurde in den Menzer Wald übermäßig eingegriffen. Oberforstmeister v. SCHÖNFELD berichtete am 30. Mai 1786 das „Revier sei von allem alten Holze entblößt.“ Infolge der einsetzenden Verjüngung wurde ein Jahrhundert später von gleichaltrigen ca. 100jährigen Beständen auf einer Fläche von 2.187 ha berichtet.



Abb. 4.: Lage der beiden GenMon-Dauerbeobachtungsflächen im Land Brandenburg

In der 5.249 ha großen Königlichen Oberförsterei Menz dominierten Ende des 19. Jahrhunderts 4007 ha Kieferbestände, die von 675 ha Buchen und 530 ha Eichen begleitet wurden. Nur „in den Reviertheilen östlich und nördlich des Großen Stechlin- und Nehmitzsees traten Eichen und Buchen als dominierende Holzart auf, während die letztere Holzart außerdem als Unterholz meist die Begleiterin von der Kiefer auf besseren Standorten bildet.“ „Um das reichlich vorhandene Buchenunterholz freizustellen, wurden die Kiefern Ende des 18. und zu Beginn des 19. Jahrhunderts herausgehauen, um einen reinen Buchenbestand zu erziehen.“

Das Vermessungs- und Abschätzungswerk der Königlichen Oberförsterei Menz vom 1. Oktober 1892 berichtet von bis zu 100 Jahre alten Buchenbeständen, die aus Stockausschlag hervorgegangen seien: „Die schlechtwüchsigen Buchen sind aus Stockausschlag und unter dem Maule des Weideviehs erwachsen.“ Die betroffene Abteilung „Jagen 76“ wird 1892 als 50-60 jähriges Kiefernstangenholz mit stark verbissenen Eichen nach *Eichenlichtschlag von 1882* und angrenzenden einzelnen älteren, schlechtwüchsigen Buchen sowie vereinzelt 40-60 jährigen Buchen (im SO wenig Buchenunterwuchs) beschrieben. Die Buchen der heutigen Versuchsfläche sind mit hoher Wahrscheinlichkeit die Nachkommen dieser wenigen Buchenüberhälter.

Bereits ab 1853 wird die Begünstigung des Laubholzes als „leitendes Prinzip der Betriebsregulierung gesehen.“ Zur Erziehung gemischter Bestände wurden Schirm- und Besamungsschläge geführt. Ab 1893 wurde als Wirtschaftsziel Kiefern-Laubholzmischbestände „unter thunlichster Erhaltung der Buche als Füllbestand“ angestrebt. Der Umtrieb der Buche sollte nach 120 Jahren erfolgen. Um den Aufschlag der Buchen (und Eichen) zu fördern, sollte der Bestockungsgrad auf 0,7-0,8 um „die stärksten und schwersten Buchen“ herum gesenkt werden. Bei nicht gelungenen Kulturen sollte mit Eichensaat und -pflanzungen nachgebessert werden. Künstliche Verjüngungen von Buchen wurden in den Quellen nicht erwähnt und offenbar auch nicht angestrebt.

Versuchsfläche „Grumsin“

Für die Versuchsfläche „Grumsin“ fällt die historische Quellenlage leider sehr dürftig aus. Lediglich bei PAGEL (1970) finden sich einige Angaben, die aber relativ allgemein bleiben und sich auf den gesamten Grumsin beziehen. Aussagen zur Situation auf der Ebene einzelner Abteilungen finden sich nicht und lassen sich auch nicht rückschließen.

Für das gesamte Grumsiner Gebiet wird die Buche seit jeher als bestandsbildende Baumart genannt. Als Beimischung kamen Trauben-Eiche, Hainbuche und Winter-Linde vor. Im ausgehenden 18. Jahrhundert soll ein beträchtlicher Teil der Bestände ein Alter von 150-200 Jahren gehabt haben. PAGEL rechnet damit, dass seit dem 16. Jahrhundert keine nennenswerten Verände-

rungen in den Bestockungsverhältnissen aufgetreten seien. Hinsichtlich der Verjüngung der Bestände gibt er an, sie seien „durchweg aus Naturverjüngung hervorgegangen“ (PAGEL 1970).

Genetische Strukturen, Verwandtschaftsverhältnisse und Rekonstruktion der Verjüngungsphase auf den Versuchsflächen „Menz“ und „Grumsin“

Die Analyse der beiden Monitoringbestände mit den oben beschriebenen Verfahren liefert zwei bemerkenswerte, stark kontrastierende Verjüngungssituationen.

Versuchsfläche „Menz“

Die Versuchsfläche „Menz“ zeigt eine ungewöhnlich stark ausgeprägte und signifikante positive räumlich-genetische Struktur im Bereich bis etwa 45 m (Abb. 5). Ab etwa 45 m ist sie negativ und bleibt bis etwa 135 m signifikant negativ. In der letzten Distanzklasse ist keine signifikante Struktur mehr zu erkennen. Dies hängt damit zusammen, dass diese Distanzklasse nur noch wenige Bäume enthält und mit dieser geringen Stichprobe eine statistische Signifikanz nur noch schwer nachzuweisen ist. Derselbe Effekt zeigt sich an der Spreizung des 95%-Konfidenzintervalls in höheren Distanzklassen.

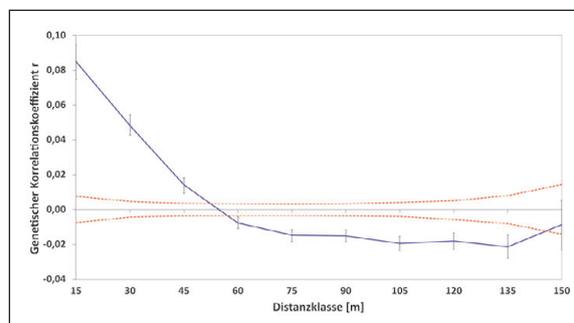


Abb. 5: Räumlich-genetische Struktur im Bestand „Menz“

Schon diese Beobachtung weist auf eine außergewöhnlich starke räumliche Gruppierung verwandter Bäume bei nur geringer räumlicher Überlappung verwandter Gruppen hin. Der Befund wird durch die Analyse der Verwandtschaftsbeziehungen bestätigt (Abb. 6). Die Struktur des Bestands wird durch eine kleine Zahl individuenstarker Familien geprägt. Zehn Familien stellen 78 Prozent aller Bäume auf der Fläche. Diese stehen wie erwartet räumlich eng gruppiert. Die verschiedenen Familien überlappen sich dabei nur wenig. Sämtliche Bäume des Bestands gehen auf eine einzige Fortpflanzungsgemeinschaft zurück.

Die beobachteten Strukturen weisen eindeutig auf einen naturverjüngten Bestand hin. Die Verteilung der Familiengruppen deckt sich mit dem für 1892 angegebenen Zustand, der als Kiefernstangenwald mit nur vereinzelt Buchen angegeben wird. Die in Abb. 6 deutlich erkennbaren zehn Großfamilien gehen dabei mit großer Wahrscheinlichkeit direkt auf diese wenigen Buchenüberhälter zurück. Hierauf deuten die gleich-

mäßige Verteilung, die geringe Überlappung der Familien und das Alter des heutigen Baumbestands von 130 Jahren hin.

Die auch in Abb. 6 sichtbaren deutlichen Unterschiede im Brusthöhendurchmesser und die bimodale BHD-Verteilung (Abb. 3) mit einem kleinen aber deutlichen Peak in der kleinsten BHD-Klasse legen nahe, dass ein Teil des Baumbestands bereits aus rezenter Naturverjüngung stammt. Der Großteil des Baumbestands repräsentiert dennoch das ursprüngliche Verjüngungsereignis (Abb. 3). Somit visualisiert Abb. 6 noch heute den Samenschatten der vor etwa 130 Jahren durchgeführten Verjüngung dieses Buchenbestands.

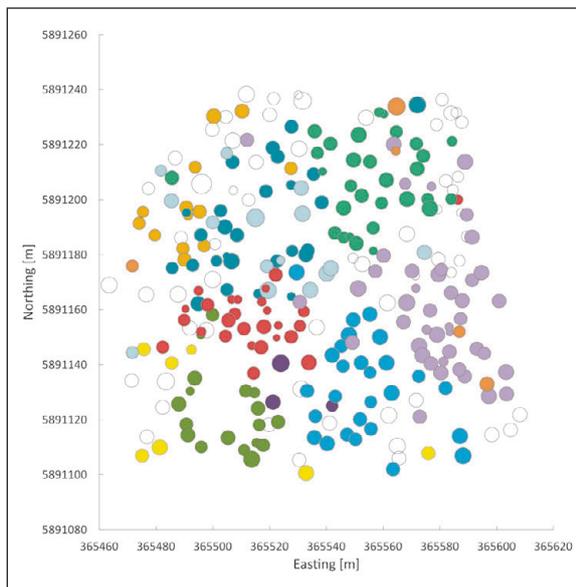


Abb. 6: Familiengruppen im Bestand „Menz“. Kreise einer Farbe stellen Mitglieder einer Familie dar. Ungefüllte Kreise stellen Bäume in Familien mit weniger als fünf Mitgliedern dar. Der Kreisdurchmesser symbolisiert den Brusthöhendurchmesser des dargestellten Baumes.

Versuchsfläche „Grumsin“

Die Versuchsfläche „Grumsin“ stellt ein faszinierendes Gegenbeispiel zur Naturverjüngung im Bestand „Menz“ dar. In diesem Bestand ist fast keine räumlich-genetische Struktur nachweisbar. Lediglich im Bereich bis 30 m zeigt sich hier ein minimaler positiver Zusammenhang zwischen genetischer Ähnlichkeit und räumlicher Distanz. Darüber hinaus ist keinerlei räumlich-genetische Struktur mehr nachzuweisen (Abb. 7).

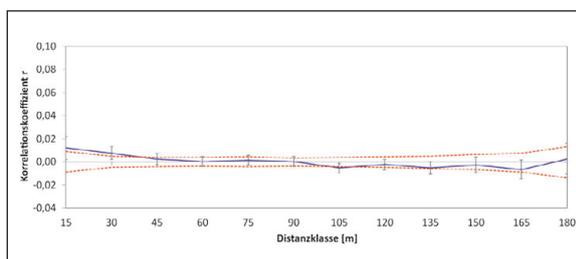


Abb. 7: Räumlich-genetische Struktur im Bestand „Grumsin“

Dieses Ergebnis belegt eine nahezu vollständig zufällige Verteilung verwandter Bäume auf der Fläche des Monitoringbestands. Dieser Befund bestätigt sich durch die Analyse der Verwandtschaftsstrukturen (Abb. 8). Hier ist auch optisch im Stammverteilungsplan die überwiegend zufällige Verteilung der Familien zu erkennen. Gleichzeitig zeigt sich, dass die Struktur des Bestands nicht durch wenige große Familien geprägt ist, sondern durch eine Vielzahl kleiner Familien. Insgesamt finden sich im gesamten, 251 Bäume umfassenden Bestand nur 19 Familien mit fünf oder mehr Mitgliedern. Mit insgesamt 134 Bäumen stellen diese 19 Familien nur etwas mehr als die Hälfte aller Bäume im Bestand. Zusätzlich konnten im Bestand „Grumsin“ 13 voneinander unabhängige Fortpflanzungsgemeinschaften identifiziert werden. Auch deren Mitglieder verteilen sich zufällig über die gesamte Fläche des Bestands. Die identifizierten Fortpflanzungsgemeinschaften unterscheiden sich dabei deutlich in ihrer Größe und umfassen jeweils 9 bis 58 Bäume.

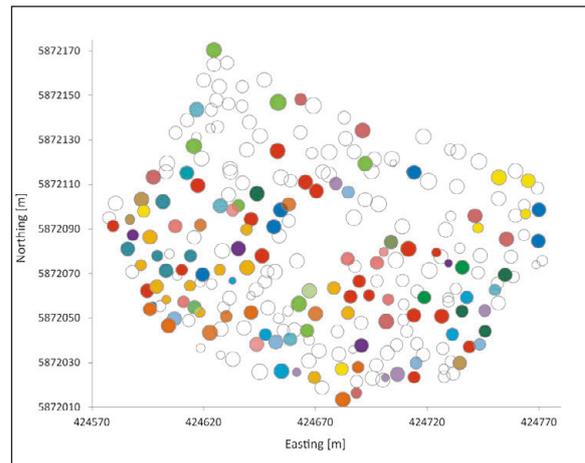


Abb. 8: Familiengruppen im Bestand „Grumsin“. Kreise einer Farbe stellen Mitglieder einer Familie dar. Ungefüllte Kreise stellen Bäume in Familien mit weniger als fünf Mitgliedern dar. Der Kreisdurchmesser symbolisiert den Brusthöhendurchmesser des dargestellten Baumes.

Diese Ergebnisse weisen auf eine ursprünglich künstliche Verjüngung hin, die zwischenzeitlich durch rezenterer Naturverjüngungsereignisse ergänzt wurde. Hier belegt die genetische Analyse, dass die Geschichte der Buchenwälder im Grumsin komplexer ist, als bislang angenommen wurde. Zumindest lokal wurde neben der natürlichen Verjüngung unzweifelhaft auch künstliche Verjüngung durchgeführt. Dabei geben die genetischen Daten keinen Aufschluss darüber, ob es sich hier um eine künstliche Verjüngung im Zuge der regulären Bewirtschaftung gehandelt hat oder beispielsweise um die einmalige Aufforstung einer ehemaligen Freifläche.

Die relativ große Zahl von Fortpflanzungsgemeinschaften und die teils nur geringe Zahl an Bäumen innerhalb einzelner Fortpflanzungsgemeinschaften lassen die Vermutung zu, dass das zur Bestandsbegründung verwendete Vermehrungsgut auf einen einzigen Erntebestand zurückgeht. Die fehlenden

Verbindungen zwischen einzelnen Fortpflanzungsgemeinschaften können hierbei bereits im Rahmen der Saatguternte entstanden sein (FUSSI et al. 2021) oder sich durch forstliche Nutzung und natürliche Mortalität im weiteren Verlauf der Bestandsentwicklung ausgebildet haben.

Im Grumsin ist die Buche seit jeher die bestandsbildende Baumart (PAGEL 1970). Es scheint daher wahrscheinlich, dass für eine solche Kunstverjüngung lokales Saatgut verwendet wurde. Der Nachweis einer ursprünglich künstlichen Bestandsbegründung gibt daher keinen Anlass, an der Autochthonie des Bestands zu zweifeln. Eine präzisere Einschätzung dieser Frage ist mit genetischen Methoden möglich, setzt aber einen überregionalen Referenzdatensatz von möglichst vielen Buchenbeständen voraus. Ein solcher Datensatz liegt derzeit für Deutschland noch nicht vor, wird aber voraussichtlich in wenigen Jahren verfügbar sein. Auf dieser Grundlage werden wir Fragen nach der Autochthonie einzelner Bestände künftig mit größerer Bestimmtheit beantworten können, als es uns derzeit möglich ist.

Die minimale positive räumlich-genetische Struktur im Nahbereich geht auch in diesem Bestand vermutlich auf zwischenzeitlich sporadisch erfolgte Naturverjüngung zurück. Wie im Bestand „Menz“ weist auch hier die BHD-Verteilung eine bimodale Form mit einem kleinen Peak in der untersten BHD-Klasse auf, der einen geringen Anteil rezenter Naturverjüngung nahelegt (Abb. 3). Dieser Effekt ist auch in der BHD-Verteilung innerhalb der identifizierten Familien und in Abb. 8 zu erkennen. Wie im Bestand „Menz“ geht auf zwischenzeitlich erfolgte Naturverjüngung nur ein Bruchteil des derzeitigen Altbaubestands zurück, der Großteil stellt auch hier das ursprüngliche Verjüngungsereignis dar. Wie dort visualisiert also Abb. 8 noch heute die ursprüngliche, vor 180 Jahren erfolgte Verjüngung dieses Bestandes.

Der Kontrast in der Verjüngungsmethode zeigt anschaulich, wie groß der Einfluss der Verjüngung auf die genetische Vielfalt bis ins hohe Alter eines Be-

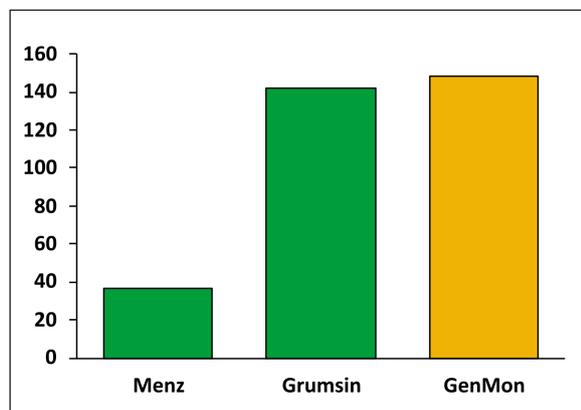


Abb. 9: Effektive Populationsgröße der beiden Bestände. Zum Vergleich dargestellt ist die mittlere effektive Populationsgröße aller zwölf Buchenbestände, die im GenMon-Projekt untersucht wurden.

stands ist (Abb. 9). Dargestellt wird die genetische Vielfalt hier anhand der effektiven Populationsgröße, die ein Bild darüber vermittelt, wie viele Individuen zur Begründung eines Bestands beigetragen haben. Zum Vergleich wird der Mittelwert der effektiven Populationsgröße für alle Buchenbestände im Projekt *GenMon* gezeigt.

Der Bestand „Menz“ geht offenbar auf einige wenige Buchenüberhälter auf einer ansonsten mit Kiefer bestockten Fläche zurück. Die Konsequenz hieraus zeigt sich heute noch in der sehr geringen genetischen Vielfalt. Der Bestand weist die geringste effektive Populationsgröße aller untersuchten Bestände auf. Dies ist unmittelbar erklärbar durch die lediglich zehn Samenbäume, auf die zusammen fast 80 % des gesamten aktuellen Baumbestands zurückgehen.

Der künstlich verjüngte Bestand „Grumsin“ hingegen weist eine deutlich höhere effektive Populationsgröße auf und liegt im Bereich der anderen untersuchten Buchenbestände. Auch dieses Ergebnis ist leicht erklärbar. Bei der Gewinnung von Buchensaatgut werden Bucheckern von zahlreichen unterschiedlichen Elternbäumen gesammelt, selbst wenn das Saatgut gezielt unter ausgewählten Bäumen gesammelt wird (EUSEMANN et al. 2017, EUSEMANN et al. 2019, LIESEBACH et al. 2019). Hierdurch wird ein Großteil der im Elternbestand vorhandenen genetischen Vielfalt erfasst, auch wenn nur eine begrenzte Zahl von Zielbäumen beerntet wird. Dieser Effekt kann sich sogar noch verstärken, wenn Saatgut verschiedener Quellen gemischt wurde.

Weitere im Rahmen von *GenMon* untersucht Buchenbestände wurden langjährig kleinräumig natürlich verjüngt. Diese Bestände sortieren sich zwischen den zwei hier vorgestellten Extremen ein (FUSSI et al. 2021).

Diese Beobachtungen lassen Rückschlüsse auf die genetisch nachhaltige Bewirtschaftung von Buchenbeständen zu. Allerdings darf aus den nachgewiesenen Mustern nicht voreilig auf eine allgemeine Überlegenheit der künstlichen gegenüber der natürlichen Verjüngung geschlossen werden. Neben der hier dargestellten genetischen Vielfalt muss auch die lokale Anpassung berücksichtigt werden. Naturverjüngte Bestände stellen in diesem Zusammenhang immer den aktuellen Stand eines dauerhaften Anpassungsprozesses an die jeweiligen standörtlichen Bedingungen dar. Künstlich verjüngte Bestände müssen diese Anpassungsleistung im Anschluss an ihre Begründung erst noch erbringen.

Bei Kunstverjüngung sollte der Fokus daher auf einer möglichst hohen genetischen Diversität des verwendeten Saatguts liegen. Eine initial hohe genetische Diversität ist für die künstliche Verjüngung besonders wichtig, weil sie die Selektion standortangepasster Pflanzen erleichtert und die Voraussetzungen für eine weitergehende Anpassung in Folgegenerationen schafft. In den folgenden Generationen kann dabei

diese hohe Ausgangsdiversität erhalten bleiben oder abnehmen (Fussi et al. 2021).

In naturverjüngenden Beständen, insbesondere wenn sich diese bereits seit mehreren Generationen natürlich verjüngen, haben derartige Selektions- und Anpassungsprozesse bereits stattgefunden. Hier sollte daher ein Fokus auf dem Erhalt der vorhandenen genetischen Strukturen liegen. Dies kann durch komplexe, kleinräumige Verjüngung bei Einzelstammnutzung oder durch Einbeziehung einer möglichst hohen Zahl an Samenbäumen in sonstigen Verjüngungsverfahren umgesetzt werden. Eine drastische Reduktion der Samenbäume wie sie der Bestand „Menz“ illustriert, stellt immer einen erheblichen genetischen Einschnitt dar, dessen Auswirkungen in Folgegenerationen nur durch den Eintrag von Pollen und Bucheckern von außerhalb des betroffenen Bestandes mehr oder weniger ausgeglichen werden können.

Anhand der zwei vorgestellten Bestände zeigt sich beeindruckend, wie ausgeprägt der genetische Fußabdruck ist, den die Verjüngung eines Bestandes hinterlässt. Gleichzeitig sehen wir, dass jede Entscheidung zur konkreten Umsetzung der Verjüngung die gesamte Lebensdauer eines Bestands hindurch Bestand haben wird und etwaige Fehler frühestens mit der Folgegeneration ausgeglichen werden können. Hiermit unterstreichen unsere Beobachtungen noch einmal, welche Bedeutung der sorgsamsten Planung und Durchführung der Verjüngungsphase zukommt. Dies gilt umso mehr, als heute auch die Anpassungsfähigkeit der neuen Waldgeneration an ein sich änderndes Klima von zentraler Bedeutung ist. In diesem Zusammenhang haben, sorgfältige Planung und Durchführung vorausgesetzt, sowohl natürliche als auch künstliche Verjüngung weiterhin ihren Platz beim Aufbau angepasster, genetisch vielfältiger und klimastabiler Buchenwälder.

Literatur

- EUSEMANN P., PREUSS A., LIESEBACH M., LIESEBACH H. (2019) Genetische Diversität im Vermehrungsgut der Rotbuche. *AFZ Wald* 74: 35-37.
- EUSEMANN P., PREUSS A., LIESEBACH M., LIESEBACH H. (2017) Optimierte Saatgutqualität durch einzelbaumweise Beerntung - eine Untersuchung an Buche (*Fagus sylvatica* L.). *Forstarchiv* 88: 17-23.
- FUSSI B. et al. (2021): GenMon – Einrichtung eines genetischen Monitorings für Buche und Fichte in Deutschland zur Bewertung der genetischen Anpassungsfähigkeit der Baumarten gegenüber Umweltveränderungen. <https://www.fnr.de/index.php?id=11150&fkz=22WC409210>
- HARDY O. J. & VEKEMANS X. (2002). SPAGeDi: A versatile computer program to analyse spatial genetic structure at the individual or population levels. *Molecular Ecology Notes* 2: 618–620.
- JONES O. & WANG J. (2010). COLONY: A program for parentage and sibship inference from multilocus genotype data. *Molecular Ecology Resources* 10: 551–555.
- LIESEBACH H., PREUSS A., LIESEBACH M., DÖBBELER H., EUSEMANN P. (2019) Bereitstellung von genetisch hochwertigem Vermehrungsgut. *AFZ Wald* 74: 38-40.
- MLUK BRANDENBURG (2015): Wälder Brandenburgs - Ergebnisse der ersten landesweiten Waldinventur.
- MLUK BRANDENBURG (2017): Waldbaurichtlinie für das Land Brandenburg – Buche.
- PAGEL H.-U. (1970): Vegetation, Standort und Ertrag von Buchenwäldern der südlichen Uckermark. *Archiv für Forstwesen* 19: 43-76.
- PEAKALL R. & SMOUSE P. E. (2006). GENALEX 6: Genetic Analysis in Excel. Population genetic software for teaching and research. *Molecular Ecology Notes* 6: 288–295.
- PEAKALL R. & SMOUSE P. E. (2012). GenAIEx 6.5: Genetic analysis in Excel. Population genetic software for teaching and research—an update. *Bioinformatics* 28: 2537–2539.
- Taxations-Revisionswerk der Oberförsterei Menz 1874 darin „Spezielle Beschreibung, Ertragsberechnung und Betriebsplan für die Hochwaldungen der königlichen Oberförsterei Menz, Wirtschaftsjahre 1874-1893); Brandenburgisches Landeshauptarchiv Potsdam, Rep. 2A Regierung Potsdam III Forsten Nr. 12731, Oberförsterei Menz
- Vermessungs- und Abschätzungswerke der königlichen Oberförsterei Menz vom 1. October 1892
- WANG J. (2004). Sibship reconstruction from genetic data with typing errors. *Genetics* 166: 1963–1979.
- WANG J. & SANTURE A. W. (2009). Parentage and sibship inference from multilocus genotype data under polygamy. *Genetics* 181: 1579–1594.

Natürliche Regeneration von Buchenwäldern in der Buchenmischwald-Klimaregion Brandenburgs - am Beispiel des Melzower Buchennaturwalds

Olaf Ruffer

1. Einleitung

Im nordostdeutschen Tiefland ist die Baumart Rot-Buche in unterschiedlichen Vergesellschaftungsformen am Waldaufbau beteiligt. Während in Küstennähe die Rot-Buche aufgrund ihres dortigen Standorts-, Wuchs- und damit Konkurrenzoptimums zur Ausbildung von Reinbeständen neigt, kommt es im Landesinneren auf einem von Nordwest nach Südost verlaufenden Gradienten bei abnehmenden Niederschlägen und zunehmender Wärme zu verringertem Wachstum sowie zu Ausfällen im natürlichen Verjüngungsgeschehen der Rot-Buche. Diese klimatisch bedingte verringerte Konkurrenzkraft der Rot-Buche führte in der Großklimaregion β der forstlichen Klimastufe *mäßig trocken* zur Ausbildung *echter Buchen(laub)mischwälder* (HOFMANN & POMMER 2004, 1211f.). Die natürliche Entstehung solcher Buchenmischwälder konnte in dem Brandenburger Schutzgebiet Melzower Buchennaturwald (NSG Fauler Ort) in den letzten 70 Jahren beobachtet werden und wird nachfolgend skizziert:

2. Kurzcharakteristik von Naturraum, Standort, Böden, Klima, PNV und Forstgeschichte

Der *Melzower Buchennaturwald*, hervorgegangen aus dem ehemaligen Waldschutzgebiet *Fauler Ort*, liegt etwa 100 km nordöstlich der Bundeshauptstadt Berlin. Er umfasst die Abteilung 2 des *Suckower Forsts*. Standortökologisch liegt das Untersuchungsgebiet im Forstlichen Wuchsgebiet (Makrochore) Ostmecklenburg-Nordbrandenburger Jungmoränenland [07], im Wuchsbezirk (Mesochore) Angermünder-Strasburger Grund-(wellen-)moräne (KOPP & SCHWANECKE 1994, 12 ff.). Der Naturwald befindet sich auf Endmoränenbildungen der Gerswalder Rückzugsstaffel, nördlich der Pommerschen Haupteisrandlage. *Standorts- und bodenkundlich* kann der jungpleistozäne Endmoränenstandort des Melzower Buchennaturwaldes hinsichtlich seiner Stammeigenschaften (Trophie und Wasserhaushalt) als ein Stauchmoränenkomplex beschrieben werden.

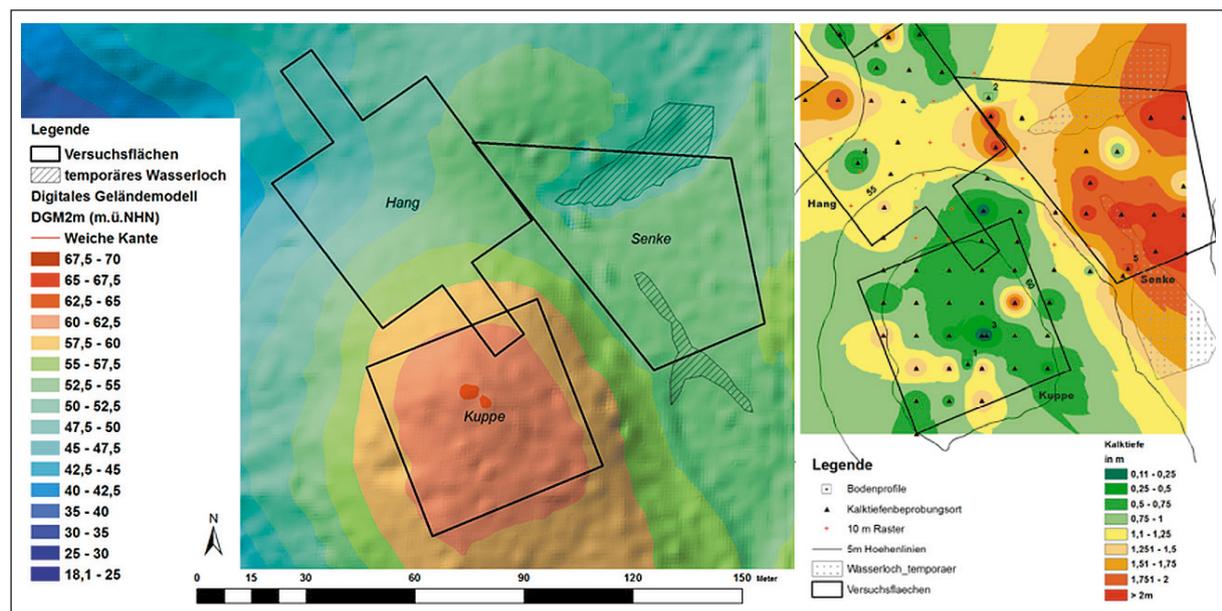


Abb. 1: (links) Mikorelief der Untersuchungsflächen mit eingezeichneter Lage der Versuchsflächen *Kuppe*, *Senke* und *Hang* unter Verwendung des DGM 2 m, Höhenbezug DHHN 1992 (Datenquelle: Landesbetrieb Geobasis Brandenburg 2012)

(rechts) - Per Bohrstockprobe ermittelte und mittels Inverser Distanz Wichtung modellierter Kalktiefen der Flächen

Diesem kleinflächigen (reliefbedingten) Wechsel von Bodenvergesellschaftungen kräftiger bis reicher Tieflehm-Fahlerden, Lehm-Rendzinen, Bändersandbraunerden und kräftigen Sand-Braunerden ist durch die Anlage von drei hinsichtlich der Exposition sich unterscheidenden Versuchsflächen entsprochen worden (Abb.1).

Die drei Versuchsflächen haben kompakte Flächengrößen ($\geq 2500\text{m}^2$) und befinden sich auf einer *Kuppe*, einem davor befindlichen *Nordwest-Hang* und einer östlich angrenzenden wechselfeuchten *Senke*. Alle drei Flächen unterscheiden sich kleinklimatisch und standorts-bodenkundlich auf kleinstem Raum. Auf der *Kuppe* und dem *Hang* konnten Rendzinen, Tieflehm-Fahlerden und Bändersand-Braunerden mit unterschiedlichen Kalktiefen und in der *Senke* (kalkhaltige) Staugley-Fahlerden und tiefentkalkte Gley-Fahlerden festgestellt werden (Abb. 1).

Das **Makroklima** im Untersuchungsraum ist als ein Übergangsklima zwischen dem südlich und östlich sich anschließenden deutlich kontinental beeinflussten „Südmärkischen Klima“ – Klimastufe trocken – und dem stärker maritim nördlich und (nord)westlich beeinflussten „Mecklenburger Klima“ – Klimastufe feucht – zu charakterisieren. Kennzeichnend hierfür ist ein mittlerer Jahresniederschlag von **540 mm bis 600 mm** bei einer ökoklimatischen (defizitären) Wasserbilanz von **-170 bis -70 mm/a** (KOPP & SCHWANECKE 1994, 86 ff.).

Das **Mesoklima** innerhalb des für den Naturwald zutreffenden Wuchsbezirks Angermünder-Strasburger Grund-(wellen-) moräne zeigt schon deutlich den klimatischen Übergangscharakter. Nach WOLFF ET AL. (2003) kann das regionale Klima für den Zeitraum 1961 bis 1990 mit Jahresniederschlägen von **554 mm/a** als niederschlagsarm und einer Differenz zwischen der mittleren Januar- und Julitemperatur von **18,52 °C** und einem thermohygrischen Index von 11,07 als *mäßig subkontinental* eingeschätzt werden (ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG 2016, 282 f.). Das **Klima der Untersuchungsfläche** wurde durch SCAMONI (1957) für die 50-jährige Periode von 1881 bis 1930 sowie von WOLFF & RIEK (2005) für den Zeitraum 1951 bis 2003 untersucht. Für beide Zeiträume konnte ein durchschnittlicher Jahresniederschlag **unter 540 mm** festgestellt werden. Im Unterschied zur ersten Klimaperiode stieg in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts die mittlere Januartemperatur (ursprünglich $-1,1\text{ °C}$ bis $-1,0\text{ °C}$) auf $-0,7\text{ °C}$ Celsius und ebenso die Durchschnittstemperatur in den drei Sommermonaten um 0,4 Grad an. Gleichzeitig ist ein geringfügiger Rückgang der durchschnittlichen Sommer-Niederschlagswerte (von 187 mm auf 181 mm) festzustellen. Die Anzahl der Sommertage ($T_{\text{Max}} > 25\text{ °C}$) nahm tendenziell um 5 Tage zu. Die von SCAMONI 1957 beobachtete mittlere Temperaturschwankung im Jahresverlauf ($18,7\text{ °C}$ bis $18,9\text{ °C}$) blieb annähernd konstant. Aufgrund dieser skizzierten Standorts Ausstattung wird das **natürliche Vegetationspotential** auf anhydromorphen Standorten im Wuchsbezirk *Angermünder-Strasburger Grund-(wellen-)moräne* durch

den Binkelkraut-Buchenwald auf den kalkhaltigen, frischeren Standorten, den Perigras-Buchenwald auf den lehmigen Standorten, den Binkelkraut-Winterlinden-Buchenwald auf den kalkhaltigen und trockeneren sowie den Hainrispengras-Hainbuchen-Buchenwald auf den lehmigen und im Mikrorelief höher gelegenen und/ oder trockeneren Standortsbereichen gebildet (HOFMANN & POMMER 2004, 1211 ff.).

Forstgeschichtlich kann festgestellt werden, dass zu Beginn des 19. Jahrhunderts auf der Untersuchungsfläche ein von der Trauben-Eiche dominierter Waldbestand stockte. Im Jahre 1822 ist der Waldbestand als ein alter Eichen-Buchenmischbestand mit eingesprengten Aspen und Linden beschrieben worden (BESCHREIBUNG UND BETRIEBSBESTIMMUNG VOM FORSTREVIER GRAMZOW 1822). Etwa 41 fm/ha Trauben-Eiche wurden genutzt. Dieser eichendominierte Waldbestand entwickelte sich bis Mitte des 19. Jahrhunderts zu einem Eichen-Buchen-Mischbestand und zu Beginn des 20. Jahrhunderts in einen buchendominierten Mischbestand: Um 1848 hatte die Buche im Grundflächenverhältnis mit der Trauben-Eiche gleichgezogen. 50- bis 70-jährige Rot-Buchen dominierten mit eingewachsenen älteren und alten (bis 200 Jahre) Stämmen. „*Junge und alte Eichen sowie Hainbuchen, einzelne Rüster, Ahorne, Aspen, in feuchten Lagen auch Erlen*“, finden sich eingesprengt (ABSCHÄTZUNGSWERK DER OBERFÖRSTEREI. GRAMZOW-LÖCKNITZ 1849). 1922 wird der Bestand als Buche, älter als 180 Jahre, „*Samenschlag*“, durch *Windwurf und Windbruch lückig, überaltert, vom Nordwesten her verjüngt*“, beschrieben (BETRIEBSWERK DER OBERFÖRSTEREI GRAMZOW 1922). Eingemischte Holzarten waren Trauben-Eiche (älter als 180 Jahre), Ahorn



Abb. 2: Hallenstadium im Faulen Ort am Unteren Weg Ende der 1930er Jahre (Schoenichen 1938, Tafel 19)

(180 Jahre), Hainbuche (100 Jahre), Linde (älter als 180 Jahre). Der Vorrat im Oberstand wurde von der Rot-Buche (280 fm/ha) dominiert. Im Jahre 1923, unmittelbar nach der letzten Forsteinrichtung, erfolgte die Unterschutzstellung des Faulen Ortes als Naturdenkmal nach dem preußischen Polizei- und Ordnungsrecht. Im Jahre 1938 ist diese Unterschutzstellung mit der Ausweisung des Faulen Ortes als Totalreservat innerhalb des gleichnamigen Naturschutzgebietes nach dem Reichsnaturschutzgesetz vom 26. Juni 1935 voll-

zogen worden. Der Waldbestand wurde im Schutzgegenstand als 250-jähriger Buchenbestand mit 400-jährigen Einzelexemplaren der Rot-Buche bezeichnet (HUECK 1941).

Das Naturschutzgesetz der DDR bestätigte die Unterschutzstellung des NSG *Fauler Ort*. Mit der Verordnung über die Festsetzung von Naturschutzgebieten und einem Landschaftsschutzgebiet von zentraler Bedeutung mit der Gesamtbezeichnung „Biosphärenreservat

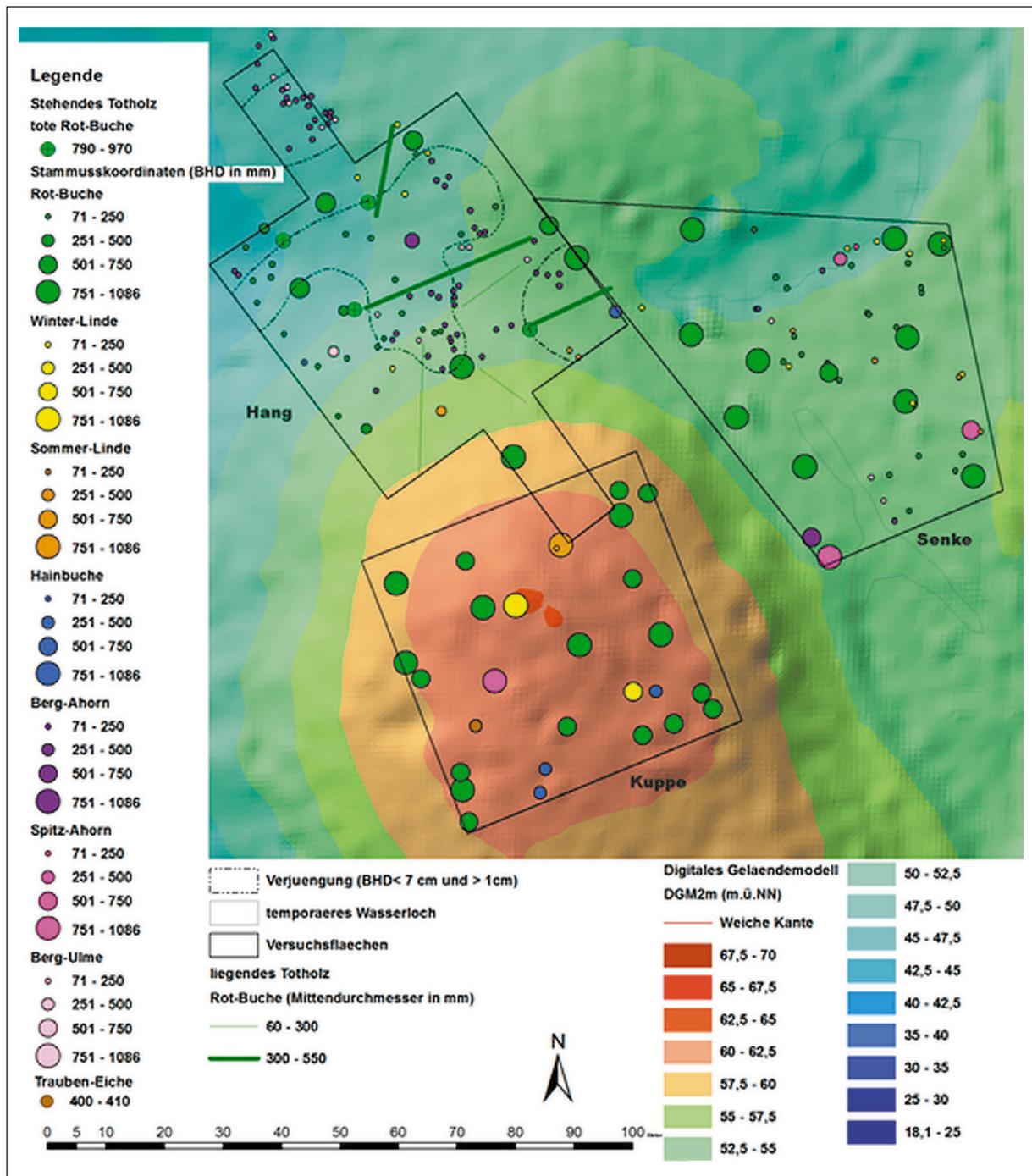


Abb. 3: Stammverteilungspläne der Erstinventuren aus dem Jahre 1958 (verändert nach Holzkamm 1959, 37 ff.), Kuppe (unten) und Senke (rechts) und dem Jahre 1968 (verändert nach Mansik 1971, 73) des Hangs (oben links). Mit baumartenspezifischer farblicher und zugleich durchmesserabhängiger Kreisflächengrößen-Darstellung, hinterlegt mit den farblich skaliert wiedergegebenen Höhenstufen des Amtlichen DGM 2 m.

Schorfheide-Chorin“ erfolgte zusammen mit einer Vergrößerung des Naturschutzgebietes am 12. September 1990 die Überführung in bundesdeutsches Recht gemäß Artikel 3 Nr. 30, Buchstabe g des Einigungsvertrages vom 18. September 1990.

3. Darstellung der Ausgangsbestockung

HOLZKAMM (1959) legte im Jahre 1958 im Rahmen einer Diplomarbeit zwei standörtlich und vegetationskundlich in sich homogene Versuchsflächen an, eine quadratische Fläche mit den Außenmaßen von 50 m x 50 m (2500 m²) in Kuppenlage, nachfolgend *Kuppe* genannt, und eine zweite rechteckige, mit einer Flächengröße von ca. 2800 m² in einer östlich davon befindlichen Senke, im Folgenden als *Senke* bezeichnet. MANSIK (1971) richtete zehn Jahre später mit der Wahl einer 50 m x 50 m großen Kernfläche, die in der Mitte von einem 100 m x 10 m großen Transekt geschnitten wurde, eine weitere Untersuchungsfläche im Faulen Ort auf einem mäßig geneigten *Hang* an (Abb. 1).

30 Jahre nach der Aufgabe der forstlichen Bewirtschaftung ist die von *Holz-kamm* im Jahre 1958 angelegte und bestandesstrukturell erfasste Fläche auf der *Kuppe* als Altbaum-Hallenstadium anzusprechen (Tab.1, Abb. 3, 4, 5). Auf allen drei Flächen wird zum Zeitpunkt der Erstinventur der Oberstand von der Baumart Rot-Buche beherrscht (dunkelgrün gefärbter Kreis in der Abb. 3). Die Buchenalthölzer sind gleichmäßig in den drei Untersuchungsflächen verteilt. Bestockungsunterschiede zwischen den drei Flächen gibt es in den Dimensionen des von der Rot-Buche beherrschten Oberstandes, was sich in den differenzierten Durch-

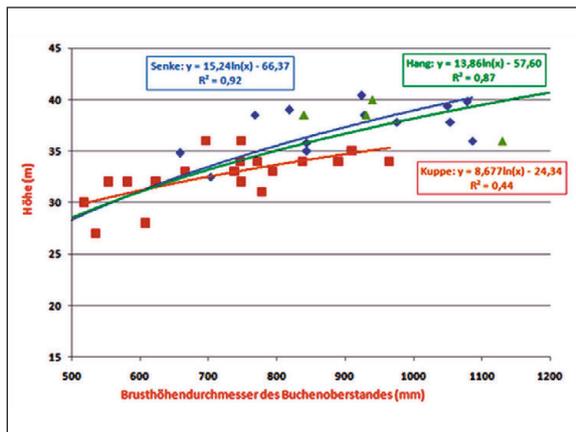


Abb. 4: Gegenüberstellung der Durchmesser-Höhen-Beziehungen der durch Rot-Buchen gebildeten Oberstände der Flächen Kuppe, Hang und Senke zum Zeitpunkt der Erstinventur

Tab. 1: Ausgewählte holzmesskundliche Werte (Erstinventur)

Fläche	Durchmesser des DG (Grundflächenmittelstamm) des Buchenoberstandes	Höhe über dem DG des Buchenoberstandes	Variationsbreite der Höhen des Oberstandes	Vorrat je ha in m ³ Derbholz
<i>Hang</i>	101,9 cm	39 m	36,0–42,0 m	348
<i>Senke</i>	91,3 cm	37,8 m	32,5–40,4 m	705
<i>Kuppe</i>	73,2 cm	32,5 m	28,0–36,0 m	742

messern und Höhen der Grundflächenmittelstämme des Buchenoberstandes widerspiegelt (Tab. 1 und Abb. 4). Auf der *Kuppe* sind neben den 19 Altbuchen (dunkelgrüne Kreise, Stärkeklassen 5 bis 9) mit einer Trauben-Eiche (hellbrauner Kreis), einem Spitz-Ahorn (hellroter Kreis), drei Hainbuchen (dunkelblauer Kreis) sowie je zwei Sommer-Linden (dunkelgelber Kreis) und zwei Winter-Linden (hellgelber Kreis) mit fünf Mischbaumarten die im Vergleich der drei Flächen höchste Artenanzahl im Altbestand vorhanden. Baumartennaturverjüngung fehlt (Abb. 3).

In der *Senke* stockten im Jahre 1958 neben den 13 Altbuchen (dunkelgrüne Kreise, Stärkeklassen 6–10) vier Mischbaumarten im Oberstand; zwei Exemplare des Spitz-Ahorns (hellroter Kreis), ein Berg-Ahorn (violetter Kreis), sowie je eine starke Sommer-Linde (dunkelgelber Kreis) und eine Hainbuche (blauer Kreis), unter denen sich durch Naturverjüngung 24 junge Rot-Buchen (dunkelgrüner Kreis), sieben Winter-Linden (hellgelber Kreis), fünf Sommer-Linden (dunkelgelber Kreis) und drei Exemplare des Berg-Ahorns etabliert haben (Abb. 3). Der Bestockungsaufbau kann als zweischichtiger buchendominierter Bestand beschrieben werden (HOLZKAMM 1959, 27). Mit je einer Sommer-Linde (dunkelgelber Punkt) und Hainbuche (dunkelblauer Punkt), vier Berg-Ulmen (blassrosa Punkt) sowie sieben Exemplaren des Berg-Ahorns (violetter Punkt) haben sich in der von fünf Rot-Buchen (dunkelgrüne Punkte der Stärkeklassen 7–12) beherrschten Fläche *Hang* ebenfalls vier Mischbaumarten im Zwischen- und Oberstand etabliert (3, oben links).

Unter ihnen haben sich bereits 1968 flächig im Mittel- und Unterhang auf etwa 40 % der 50 m x 50 m Kernfläche die Mischbaumarten Berg-Ahorn, Berg-Ulme und Winter-Linde sowie die Rot-Buche im Unterstand verjüngt und sind mit den stärksten Exemplaren in die Wuchsklasse schwaches Stangenholz eingewachsen. Ein stammzahlreicher Verjüngungshorst mit einem Brusthöhendurchmesser kleiner 1 cm ist hangaufwärts im Südosten der Fläche vorhanden.

Die Baumhöhen und die Baumdurchmesser des auf der *Kuppe* überwiegend aus Rot-Buchen gebildeten Oberstandes bleiben mit etwa 4–6 m im Höhenwachstum und mit 20 cm bis 30 cm im Durchmesserzuwachs deutlich hinter den in der *Senke* und am *Hang* gemessenen Werten zurück. Bestockungsunterschiede sind auch hinsichtlich der Vorräte und der Bestandes-schichtung vorhanden (Tab. 1).

4. Visualisierung des Zerfalls des Oberstandes und des Entstehens einer neuen Waldgeneration anhand einer normalisierten Digitalen Oberflächenmodell-Zeitreihe (1970, 1990, 2012 bis 2018)

Zum Verständnis des zeitlichen Ablaufs des Zusammenbruchs der alten, in den Erstinventuren der drei Untersuchungsflächen erfassten Baumgeneration wurden historische Luftbilder georeferenziert und entzerrt. Aus diesen wurden normalisierte digitale Oberflächenmodelle gerechnet. Aus dieser Luftbildzeitreihe 1960-1970-1973-1978-1991-2012 ergibt sich folgendes Gesamtbild: Zwischen dem 6. September 1960 (ältestes vorliegendes Luftbild in sehr schlechter Qualität) und dem 16. Juni 1970 entstanden durch den Zusammenbruch weniger alter Rot-Buchen im Zentrum der 50 m x 50 m Repräsentationsfläche des *Hangs* erste große Lücken, im Kronendach, die nicht mehr geschlossen werden konnten. Sie kennzeichnen als diagnostisches Merkmal, sogenannte *Stöckerlücken*, den Beginn des Disintegrations- und Formierungsstadiums (JENSEN ET AL. 2003). Das Kronendach des Waldbestandes auf der *Kuppe* ist sowohl 1960 als auch 1970 geschlossen. Das Vegetationshöhenmodell von 1970 als dreidimensionale Abbildung beschreibt diesen Waldzustand sehr anschaulich (Abb. 5).

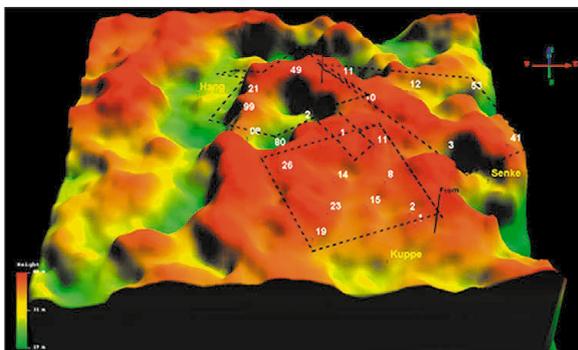


Abb. 5: Dreidimensionales Vegetationshöhenmodell (Pixelauflösung 1,6 m) im Jahre 1970, dargestellt mittels QT Reader mit den räumlichen Umrissen der drei Untersuchungsflächen und markanten Baumnummern, errechnet aus den Luftbildern 139 und 140 des Luftbildfilms C 154266-70 vom 16.6.1970 (Luftbildquelle: Bundesarchiv Berlin). In Rottönen wiedergegeben sind Baumhöhen zwischen 35 m und 41 m

Die Berechnung und Visualisierung des dreidimensionalen Vegetationshöhenmodells für den Waldzustand im Jahr 1991 (Abb. 6) eröffnet mit dem Höhenwert als dritter Dimension und dessen räumlichen Bezug und Ausdehnung (Flächengröße) die Möglichkeit, trotz nicht vorhandener terrestrischer Versuchsflächen-daten in der vergleichenden Betrachtung mit dem 21 Jahre früheren (Abb. 5) und 21 Jahre späteren Vegetationshöhenmodell (Abb. 7) die zeitliche Abfolge der Bestandenerneuerung in den drei Untersuchungsflächen räumlich zu rekonstruieren:

1. Mit dem Fokus auf den Oberstand (orange-rote Farbwahl mit Baumhöhen um die 35 m bis 40 m) erfolgte zwischen 1970 und 1991 der Zusammenbruch großer Teile des Altbestandes.

2. In den 1990er Jahren war der Unter- bis Mittelhang der Fläche *Hang*, in der sich 1968 die von *Mansik* kartierten Verjüngungsgruppen des Berg-Ahorns befanden, mit Bestandeshöhen um die 20 m am weitesten vorangeschritten in der Entwicklung der neuen Waldgeneration. Auf der *Kuppe* und auf jenen Teilen des Südteils des *Hangs*, die in die *Kuppe* hineinragen, haben sich Dicken (Bestandeshöhe etwa 7 m) ausgebildet (Abb. 6).
3. Zwischen 1991 und 2012 vollzog sich in der *Senke*, auf der *Kuppe* und dem *Hang* ein Sprung in die nächst höhere Wuchsklasse, d. h. das Dickenstadium auf der *Kuppe* und dem Südteil des *Hangs* wuchs in das Stangenholzstadium und aus den Stangenholzbeständen in der *Senke* und dem Mittelhangbereich der Fläche *Hang* entwickelten sich junge Baumhölzer.
4. Der Restvorrat an Überhältern der alten Baumgeneration verringerte sich kontinuierlich weiter.
5. Auffallend ist der ausgeprägte kleinflächige Charakter des Zerfalls und Verjüngungsfortschritts.

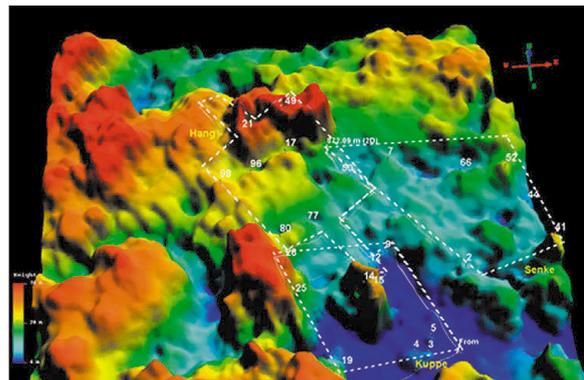


Abb. 6: Dreidimensionales Vegetationshöhenmodell (Baumhöhe über Grund, Pixelauflösung 1,0 m) im Jahre 1991, dargestellt im dem Visualisierungsprogramm QT Reader mit den räumlichen Umrissen der drei Untersuchungsflächen und markanten Baumnummern, errechnet aus den Luftbildern 230 und 231 des Luftbildfilms F 164 - 910 vom 28.07.1991 (Luftbildquelle: Landesbetrieb Geobasis Brandenburg). In Rottönen sind Baumhöhen um die 36 m wiedergegeben.

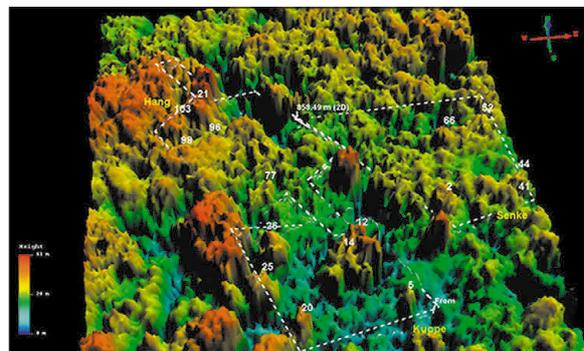


Abb. 7: Dreidimensionale Darstellung des Vegetationshöhenmodells 2012 (Pixelauflösung 1,0 m) der Untersuchungsflächen Hang, Senke und Kuppe mit Einzeichnung der Baumnummern markanter Einzelbäume, dargestellt mit dem Visualisierungsprogramm QT Reader (Datenquelle: Laserdaten Landesbetrieb Geobasis Brandenburg, 2012).

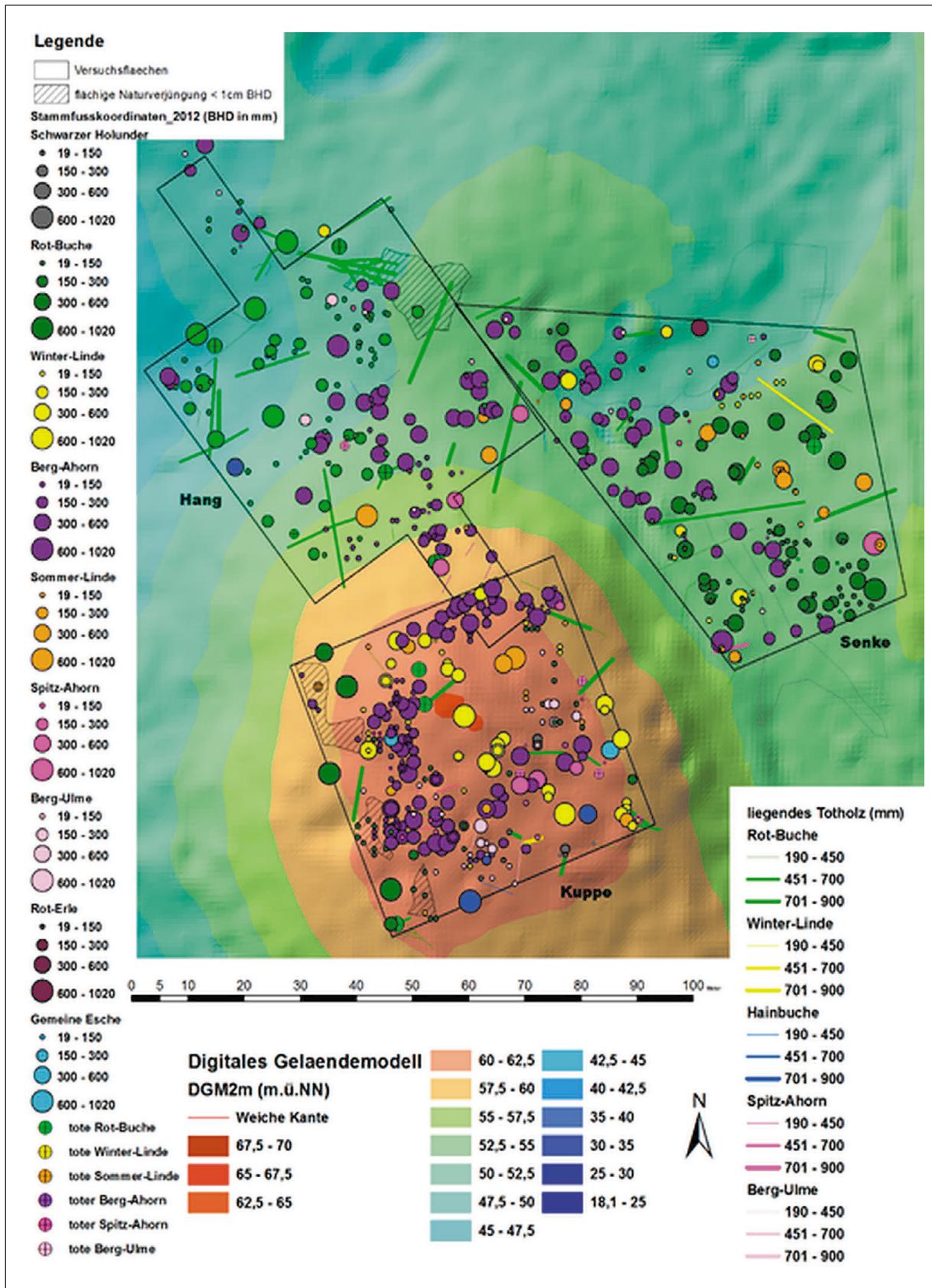


Abb. 8: Stammverteilungsplan der Wiederholungsinventuren im Jahre 2012 – Kuppe (unten), Senke (rechts) und Hang (oben links) mit Darstellung des Amtlichen DGM 2 m. Angabe der Durchmesserklassen (der jeweiligen Baumart) in mm

5. Beobachtete natürliche Verjüngungsmuster der neuen Waldgeneration sowie im Ergebnis herausgebildete standortsspezifische Waldökosysteme

54 Jahre nach der Erstinventur konnten diese Flächen einer Wiederholungsinventur unterzogen werden. Der Bestand hat sich bis zum Jahre 2012 weitestgehend erneuert, aus den ehemals buchendominierten Waldbeständen zum Zeitpunkt der Erstinventur ist ein kleinflächiger, überwiegend trupp- bis gruppenweiser¹ Wechsel von Rot-Buchen (dunkelgrüne Kreise), Winter-Linden (hellgelbe Kreise), Sommer-Linden (dunkelgelbe Kreise) und Exemplaren des Berg-Ahorns (violette Kreise) entstanden. Einzelne Exemplare der Hainbuche (dunkelblaue Kreise), des Spitz-Ahorns (hellrote Kreise), der Gemeinen Esche (türkisfarbene Kreise), der Berg-Ulme (hellrosa Kreis) und Rot-Erle (brauner Kreis) sind beigemischt (Abb. 8).

Die Entstehung der neuen Waldgeneration kann wie folgt zusammengefasst werden: Der *Berg-Ahorn* hatte eine Initialfunktion inne. Ihm folgten zeitlich versetzt die Hauptbaumarten Rot-Buche, Winter- und Sommer-Linde sowie die Hainbuche, die sich neben und unter ihm kleinflächig verjüngten (Abb.8). Dabei ist festzustellen, dass sich die Hauptbaumarten kleinflächig bevorzugt an expositionsbedingt unterschiedlichen Standorten etablierten. Die *Rot-Buche* bevorzugte den Mittel- bis Unter-*Hang*, während sie auf der *Kuppe* nur den West- und Nordostbereich besiedelte. Das beobachtete Wachstum der Rot-Buche wurde insbesondere durch den flächenspezifisch differenzierten Wärme- und Feuchtigkeitshaushalt beeinflusst.² Dies kommt (neben ihrer fehlenden Etablierung auf den trockensten und wärmsten Standorten) in ihrem flächenspezifisch unterschiedlichen Höhenwachstumsverlauf im Jahre 2012 zum Ausdruck (Abb. 9).

Das Höhenwachstum der Rot-Buche auf der *Kuppe* und dem Ober-*Hang* verläuft im Vergleich zur *Senke* sowie dem Unter- und Mittel-*Hang*, deren Wachstumskurven etwa gleichauf verlaufen, deutlich gebremst (Abb. 9). Vor allem das verzögerte Höhenwachstum der Rot-Buche bewirkte, dass die Mischbaumarten Winter-Linde, Sommer-Linde neben und unter dem vorverjüngten Berg-Ahorn mit dem Wachstum der Rot-Buche auf der *Kuppe* und den oberen Teilen der Fläche *Hang* mithalten können (Abb. 10).

1 truppweise (bis 0,03 ha, 9,77 m Radius); gruppenweise (bis 0,1 ha, 17,84 m Radius); horstweise (ab 0,11 ha bis maximal 0,3 ha, ab 17,84 m Radius; BRA 2000)

2 Anhand der flächigen Vegetationskartierung und der Analyse der *dekadischen Feuchte-* und *Wärmezeiger* der soziologischen Artengruppen (HOFMANN & POMMER 2013), der Zeigerwerte für *Temperatur* und *Feuchte* (ELLENBERG 2000) sowie der baumartenspezifischen *Klimaarealanalyse* (OBERDORFER 1990) konnte die *Abnahme* der Temperatur und *Zunahme* von Kühle und Bodenfrische von der *Kuppe* über den Ober-*Hang* bis zum Unter-*Hang* sowie die *kleinklimatische Sondersituation* durch Kombination von Wärme und zeitweilig erhöhter Grundfeuchte in der *Senke* nachgewiesen werden (RÜFFER 2019, 75ff.).

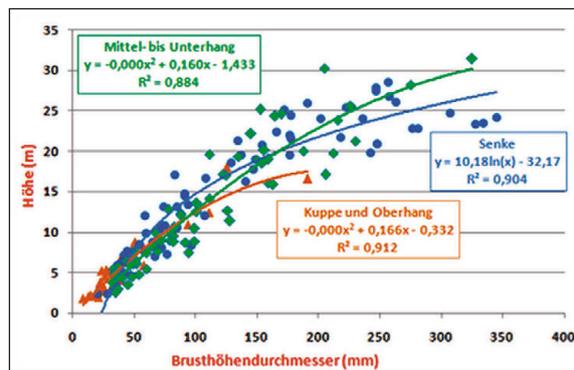


Abb. 9: Flächenspezifische (standortsspezifische) Durchmesser-Höhenbeziehungen der Rot-Buche

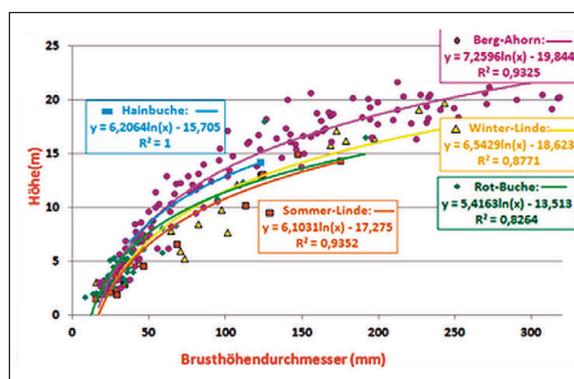


Abb. 10: Durchmesser-Höhen-Beziehung der Baumarten der Verjüngung der Flächen Kuppe und Ober-Hang

Die *Winter-Linde* konnte 2012 auf den höchsten Geländeerhebungen der *Kuppe* sowie wechselfeuchten Standräumen der *Senke* beobachtet werden, während die *Sommer-Linde* sich nur auf der *Kuppe* und erhöhten Bereichen der *Senke* etablierte, der Mittel- bis Unterhang wurde gemieden. Das Zentrum als auch die südlichen Bereiche der *Kuppe* war ihr bevorzugter Verjüngungsraum.

Das vergleichsweise schon in der Abb. 9 erkennbare konkurrenzstärkere Höhenwachstum der Rot-Buche im Unter- bis Mittel-*Hang* bewirkte ein in der Verjüngung realisiertes Überwachsen der hier vorhandenen Mischbaumarten Berg-Ahorn und Berg-Ulme und führ-

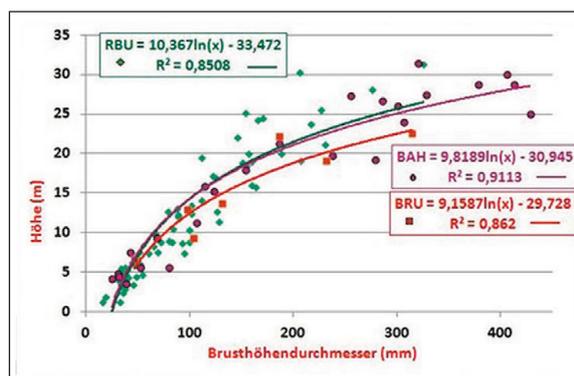


Abb. 11: Durchmesser-Höhen-Beziehung der Baumarten der Verjüngung im Unter- bis Mittel-Hang (RBU = Rot-Buche; BAH = Berg-Ahorn; BRU = Berg-Ulme)

te zur Ausbildung eines nur hier von der Rot-Buche dominierten Kalkbuchenwaldes (Abb. 11).

Auch in der durch periodischen Grundwassereinfluss stehenden *Senke* weist die Rot-Buche auf den ihr zusagenden, höher gelegenen, Standorten einen im Vergleich zur Sommer- und Winter-Linde steileren Höhenwachstumsverlauf auf (Abb. 12). Den Höhenvorsprung gegenüber den beiden Lindenarten kann die Rot-Buche jedoch nur auf den kleinflächig vorhandenen höchsten Standorten realisieren, was den an vergleichsweise höhere Grundwasserstände angepassten Mischbaumarten Berg-Ahorn, Gemeine Esche und vor allem Winter-Linde Ausbreitungschancen eröffnet.

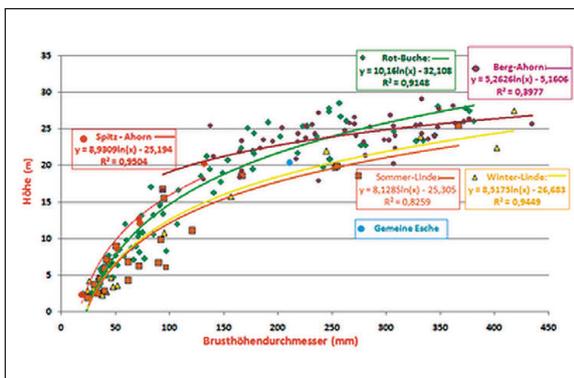


Abb. 12: Durchmesser-Höhen-Beziehung der Baumarten der Verjüngung in der *Senke*

Drei unterschiedliche Waldökosysteme, der *Bingelkraut-Winterlinden-Buchenwald* auf der *Kuppe* und dem *Ober-Hang*, der *Bingelkraut-Buchenwald* auf dem *Nordwest-Mittel-bis Unter-Hang* sowie der *Eschen-Buchenwald* in der *Senke* entstanden (HOFMANN & POMMER 2013).

Der anfangs ausgesprochen kleinflächige Zerfalls- und Verjüngungsfortschritt auf den Kalkstandorten des Melzower Buchennaturwaldes und das allmähliche Zusammenwachsen zu immer größeren und hinsichtlich der Bestandeshöhe homogenen Einheiten ist aus der vergleichenden Betrachtung der aus den Oberflächenmodellen der Jahre 1970, 1991, 2012 und 2018 klassifizierten Bestandeshöhen erkennbar (Abb. 13).

Die Waldbestände haben sich auf allen drei Flächen bis zum Jahre 2018 vom Altbaum-Hallenstadium durch ein Durchlaufen des Disintegrations- und Formierungsstadiums, des Jungwuchs- oder Dickungsstadiums zum Jungbaum- oder Stangenholzstadium und teilweise bis zum beginnenden Baumholz-Hallenstadium weiterentwickelt. Am weitesten fortgeschritten in der Waldentwicklung ist der vergleichsweise homogene Bestand in der *Senke* und im *Unter-Hang* mit dem stattgefundenen Einwachsen der Hauptteile der neuen Waldgeneration in das beginnende Baum-Hallenstadium. Aufgrund dieser beobachteten Höhenentwicklung ist zu erwarten, dass es um das Jahr 2030 zu einer flächigen Ausbildung des Hallenwaldstadiums kommt. Die während der Erstinventur 1958 bzw. 1968 festgestellten Vorräte an starken Baumhölzern haben sich bis zum Jahre 2012 reduziert (Tab. 2).

Die Rekonstruktion der Altholz – und Totholz mengen der drei Flächen lässt die Dynamik des Zeretzungsprozesses erkennen. Sie zeigt, dass der Vorrat an Stark- und Totholz in den kommenden zwei Dekaden stark zurückgehen wird.

Tab. 2: Starkholz- und Totholzvorräte sowie die daraus berechnete Zersetzungsgeschwindigkeit

	<i>Kuppe</i>	<i>Hang</i>	<i>Senke</i>
Vorrat Derbholz Erstinventur 1958/68 (Vfm/ha)	733	386	704
Vorrat Derbholz Wiederholungsinventur 2012 (Vfm/ha)	250	66,4	70,6
liegendes Totholz 2012 (m³/ha)	32,8	70,1	75,5
Stehendes Totholz 2012 (fm/ha)	37	88,1	29,8
Totholzmineralisierung im Zeitraum (m³/ha)	483	256	528
Mineralisierung je Jahrzehnt (1972-2012)	121 m³	64 m³	132 m³

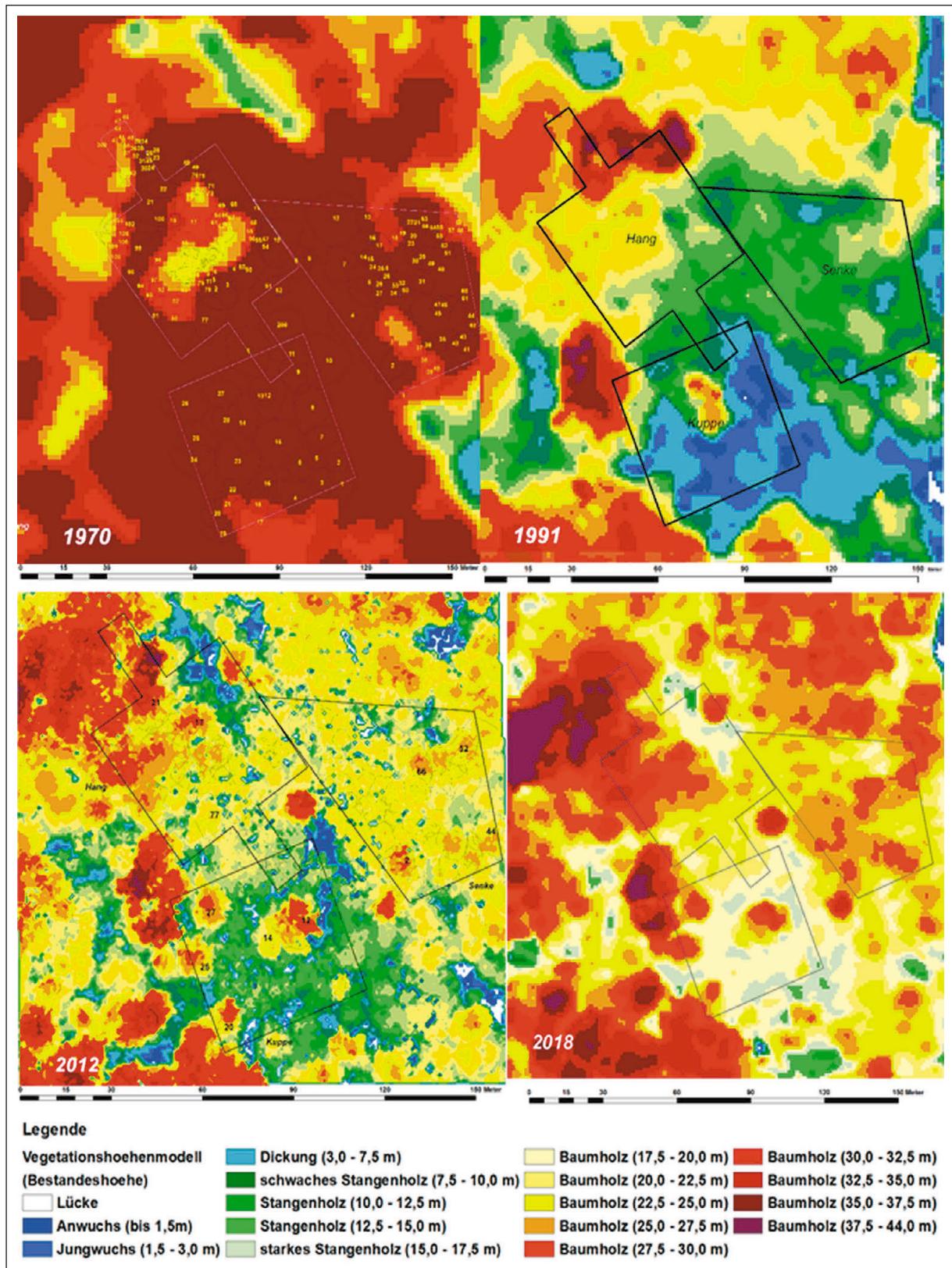


Abb.13: Aus Stereoluftbildpaaren (1970 und 1991 (oben links und rechts) sowie bildbasierten digitalen Oberflächenmodell (2018 - unten rechts)) und Laserdaten (2012 - unten links) klassifizierte Baumhöhenklassen

6 Waldbauliche Schlussfolgerungen

Waldbaulich lässt sich aus den Beobachtungen für Tiefland-Buchenwälder folgendes schlussfolgern: Planare Buchenwälder unterscheiden sich in der Baumartenzusammensetzung. Ursache hierfür bildet die mit der Entfernung zur Küste zunehmende defizitäre ökoklimatische Wasserbilanz, die mit einer abnehmenden Konkurrenzskraft der Rot-Buche einhergeht. In der Buchenmischwald-Klimaregion Nordostdeutschlands, die sich über weite Teile Nordbrandenburgs erstreckt (HOFMANN & POMMER 2004, 1211 ff.), lässt sich dies durch die gezielte, die Geländeausformung ausnutzende, kleinflächige Einbringung seltener, „trockentoleranter“ Laubbaumarten (z. B. Sommer-Linde, Elsbeere, Feld-Ahorn, Flatter-Ulme, Stiel-Eiche) als auch fremdländischer Laub- und Nadelbaumarten (z.B. Rot-Eiche, Douglasie und Küsten-Tanne) auf Kuppen, Plateaus und Südhängen ausnutzen, die der Rot-Buche weniger zusagen. Nord- und Westhänge sollten weiterhin der Rot-Buche bzw. der Pionierbaumart Berg-Ahorn vorbehalten bleiben. Baumartenreine kleinflächige Anfangs-Verjüngungen konnten beobachtet werden, die allmählich zu größeren und hinsichtlich der Bestandeshöhe homogenen Einheiten zusammenwachsen. Ein auf mehrere Jahrzehnte angelegter Femelschlagbetrieb, der mit kleinen über die Fläche verteilten Gruppenhieben beginnt, die sukzessive, bevorzugt in Nord-Süd-Richtung, erweitert und bis zum flächigen Zusammenwachsen ergänzt werden, dürfte am ehesten den Naturabläufen entsprechen. Naturschutzfachlich wertvolle Strukturen, wie Stark- und Totholz, lassen sich deshalb nicht bestandesweise, sondern nur regional erhalten. Ihre beobachtete Dynamik lassen eine waldentwicklungsphasenabhängige Bewertung der „guten fachlichen Praxis“ und keine starren „Normvorräte“ notwendig erscheinen.

Literatur:

ABSCHÄTZUNGSWERK DER OBERFÖRSTEREI GRAMZOW-LÖCKNITZ (1849) im Abschätzungswerk von der Oberförsterei Gramzow inclus Loecknitz de 1851 (Erstes Wirtschaftsjahr 1849) Brandenburgisches Landeshauptarchiv Potsdam Rep. 2 A III F Nr. 7415

ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG (2016): Forstliche Standortaufnahme. Arbeitskreis Standortkartierung in der Arbeitsgemeinschaft Forsteinrichtung. IHW-Verlag Eching bei München. 7. Auflage

BESCHREIBUNG UND BETRIEBSBESTIMMUNG VOM FORSTREVIER GRAMZOW (1822–1841): Titel des Bandes: Beschreibung und Betriebs-Bestimmung vom Forstrevier Gramzow. Inspektion Neustadt E/W, Regierungs-Bezirk Potsdam. Brandenburgisches Landeshauptarchiv Potsdam Rep. 2 A III F Nr. 7410

BETRIEBSWERK DER OBERFÖRSTEREI GRAMZOW VOM 1.X.1922–1933. Betriebsplan aus Rep. 2A Regierung Potsdam III Forsten Nr. 7427

BRA (2000): Betriebsregelungsanweisung Landeswald im Land Brandenburg, Landesforstanstalt Eberswalde, S. 24

ELLENBERG, H. (2001): Zeigerwerte von Pflanzen in Mitteleuropa. Goltze Verlag Göttingen

HOFMANN, G.; POMMER, U. (2004): Das natürliche Waldbild Brandenburgs. AFZ/Der Wald 22/2004: 1211–1215

HOFMANN, G.; POMMER, U. (2013): Die Waldvegetation Nordostdeutschlands. Eberswalder Forstliche Schriftenreihe Bd. 54. Eberswalde/ Potsdam

HOLZKAMM, D. (1959): Waldwachstumskundliche Untersuchungen an naturnahen Waldaufbauformen des Melico-Fagetum im Waldschutzgebiet „Fauler Ort“ bei Gramzow/ Uckermark. Diplomarbeit HUB/ Eberswalde

HUECK, K. (1941): Der „Fauler Ort“ in der Staatsforst Gramzow. Brandenb. Jahrbücher 14

JENSSEN, M.; HOFMANN, G.; RÜTZ, A.; STÖCKER, G. (2003) Ergebnisse waldkundlicher Selbstorganisationsforschung im NSG Serrahn mit Bedeutung für eine naturnahe Waldbewirtschaftung. Natur und Naturschutz in Mecklenburg-Vorpommern 38: 43–51, Greifswald

KOPP, D.; SCHWANECKE, W. (1994): Standortlich-naturräumliche Grundlagen ökologiegerechter Forstwirtschaft. Deutscher Landwirtschaftsverlag Berlin GmbH

MANSIK, K.-H. (1971): Struktur und jahreszeitliche Entwicklung in Waldgesellschaften des nordbrandenburgischen und südmecklenburgischen Buchengebietes. Promotionsarbeit, ILN Halle (Saale)

OSBERDORFER, E. (1990): Pflanzensoziologische Exkursionsflora. Sechste, überarbeitete und ergänzte Auflage. Ulmer Verlag

RÜFFER, O. (2019): Standortsspezifische Entwicklung von Buchenwaldgesellschaften im nordostdeutschen Tiefland, dargestellt am Beispiel des Melzower Buchennaturwaldes. Dissertation HUB, 215 S. <http://edoc.hu-berlin.de/18452/20374>

SCAMONI, A. (1957): Vegetationsstudien im Waldschutzgebiet „Fauler Ort“ und in den angrenzenden Waldungen. Sonderdruck aus Feddes Repertorium. Beiheft 137, S. 55–109

SCHOENICHEN, W. (1937): Urdeutschland 2. Band, Deutschlands Naturschutzgebiete in Wort und Bild. Verlag J. Neumann Neudamm Tafel 19. Aufnahme M. Jaedicke, Berlin

WOLFF, B.; ERHARD, M.; HOLZHAUSEN, M.; KUHLOW, T. (2003): Das Klima in den Forstlichen Wuchsgebieten Deutschlands. Mitteilungen der Bundesanstalt für Forst- und Holzwirtschaft, Hamburg

WOLFF, B.; RIEK, W. (2005): Modellierung von Klimakennwerten für Monitoringpunkte in Wäldern Brandenburgs. Auftragsarbeit der Landesforstanstalt Eberswalde. Wald+Boden Umweltconsult GmbH (WBU)

Prognose zur Entwicklung der Rot-Buche unter veränderten Wasserhaushaltsbedingungen

Winfried Riek, Alexander Russ, Daniel Ziche, Rainer Hentschel, Andrea Brini

1 Einführung

Zeitreihen der Wasserhaushaltsmodellierung von exemplarischen forstlichen Dauerbeobachtungsflächen sowie für die Gesamtwaldfläche regionalisierte Wasserhaushaltskennwerte stellen Grundlagen dar, um baumarten- und standortsdifferenziert das räumlich-zeitliche Ausmaß von Wassermangel im Land Brandenburg abzuschätzen. Sowohl der Einsatz statistischer Trendanalysen, als auch die Verwendung szenarischer Klimadaten in der Wasserhaushaltsmodellierung, sind darüber hinaus fundierte Ansätze zur prognostischen Risikobewertung im Klimawandel. Hierzu liegen Ergebnisse aus der jahrelangen Forschungskooperation von LFE und HNEE vor (z. B. RIEK & RUSS 2019, RUSS et al. 2019, ZICHE et al. 2021). Aufbauend auf den brandenburgischen Daten der bundesweiten Bodenzustandserhebung im Wald (BZE) und Befunden des Level-II-Beobachtungsprogramms sowie digitalen Geländemodellen und forstlichen Standortskarten stand die Ableitung von Kennwerten zum Wasser- und Nährstoffhaushalt für die Punkte eines brandenburgweiten 100x100-m-Stützstellennetzes im Fokus dieser Untersuchungen. Mit Hilfe von Klimaszenarien und Trendanalysen wurden für ca. 1,1 Mio. Rasterpunkte Empfehlungen zur Baumartenwahl und zur Minimierung der durch den Klimawandel ausgelösten Anbaurisiken abgeleitet (RIEK et al. 2020). Im Zentrum des vorliegenden Beitrags, der eine Übersicht der bisherigen Arbeiten darstellt, stehen ausgewählte Befunde mit speziellem Blick auf die Baumart Rotbuche. Zudem werden aktualisierte Zeitreihen von Klimadaten (Zeitraum 1961-2020) erstmalig in die Betrachtungen einbezogen und hinsichtlich der Veränderung des Wasserhaushalts der Waldstandorte deskriptiv-statistisch ausgewertet.

2 Material und Methoden

Die bei der Regionalisierung von Bodeneigenschaften eingesetzten Methoden und die Ansätze zur Ableitung von Baumartenempfehlungen sind bei RIEK & RUSS (2016, 2019) beschrieben. Grundlagen der Regionalisierungsmodelle bilden BZE-Inventurdaten, Informationen aus der forstlichen Standortskarte sowie zusätzliche Geodaten und digitale Höhenmodelle. Insbesondere die der forstlichen Standortskarte im Maßstab 1:10.000 zu entnehmenden bodenphysikalischen Eigenschaften, die sich aus der forstlichen Befundeinheit – namentlich der Bodenform als zentralem Element der Stammstandortsform nach SEA95 (SCHULZE

1998) – ableiten lassen, stellen wichtige Steuergrößen für die flächenscharfe Übertragung von Befunden aus dem forstlichen Umweltmonitoring dar. Insgesamt konnte für die Waldfläche Brandenburgs an 1.076.222 Punkten im 100x100-m-Raster ein breites Spektrum konsistenter Bodenkennwerte und Standortsinformationen generiert werden.

2.1 Flächendeckende Regionalisierung von Klimadaten als Zeitreihe

Die hier präsentierten Auswertungen zum Wasserhaushalt basieren auf Klimadaten des Deutschen Wetterdienstes. Sie umfassen Zeitreihen von Niederschlag und potenzieller Verdunstung auf Monatsbasis für den Zeitraum 1961-2020, die für die 100x100-m-Rasterpunkte generiert wurden. Die Regionalisierung der Klimaparameter erfolgte auf Tagesbasis mit Hilfe der beiden an der NW-FVA entwickelten R-Pakete „KSPclimreg“ (SCHMIDT-WALTER 2019) und „KSPclimpredict“ (SCHMIDT-WALTER 2018). Neben den frei verfügbaren DWD-Stationsdaten (CDC 2018) gehen die geografische Lage und die Höhe über Normalnull in die Regionalisierung ein. Als Grundlage dient ein digitales Geländemodell in 1x1-km-Auflösung. Für Temperatur, Dampfdruck und Windgeschwindigkeit werden für jeden Tag generalisierte additive Modelle (GAM) an die Messdaten angepasst. Für Niederschlag und Sonnenscheindauer wird das „Universal Kriging“ verwendet. Eine Korrektur der Niederschlagsmessungen nach RICHTER (1985) wurde nicht vorgenommen. Die potentielle Verdunstung wurde als FAO-Grasreferenzverdunstung berechnet (ALLEN et al. 1998), wobei die hierzu benötigte Globalstrahlung aus der täglichen Sonnenscheindauer geschätzt wurde.

Als räumliche Befundeinheit für Auswertungen der Klimadaten wurden die forstlichen Wuchsbezirke Brandenburgs verwendet. Auf der Grundlage des 100x100-m-Stützstellennetzes konnten die Mediane der Klimatischen Wasserbilanz im Sommerhalbjahr (April – September) für insgesamt 94 Wuchsbezirke berechnet werden. Die Wuchsbezirke als Bestandteil der forstlichen Standortsgliederung spiegeln in Brandenburg maßgeblich die geologisch und bodenkundlich unterschiedlichen Landschaftsverhältnisse und deren Hydromorphie wider. Sie bilden daher vor allem unter Anwendungsaspekten sinnvolle räumliche Stratifizierungseinheiten bei der Regionalisierung sich verändernder Klimadaten.

2.2 Regionalisierung von Kennwerten des Bodenwasserhaushalts

Anhand der aus Karten ermittelten bodenphysikalischen Primärdaten, regionalisierten Grundwasserflurabständen und modellierten Humusgehalten wurde die pflanzenverfügbare Bodenwassermenge für jeden der 100x100-m-Rasterpunkte berechnet. Die brandenburgweite Ableitung der Grundwasserflurabstände wird bei HANNAPPEL & RIEK (2011) erläutert. Für die Schätzung und Regionalisierung der Humusgehalte an den Rasterpunkten entwickelte RUSS (2015) auf der Grundlage der aus der Bodenzustandserhebung vorliegenden C-Gehalte und -vorräte einen statistischen Ansatz, bei dem multiple schrittweise Regressionsanalysen, Clusteranalyse sowie das von BREIMANN et al. (1984) entwickelte CART-Verfahren verwendet wurden (vgl. RUSS et al. 2021). Die Bodendichte wurde von RUSS (2015) durch Rekalibrierung der Pedotransferfunktion von ADAMS (1973) berechnet. Für die Schätzung der hydraulischen Bodeneigenschaften wurde die für den Untersuchungsraum validierte Pedotransferfunktion von RENGGER et al. (2009) eingesetzt (vgl. RUSS & RIEK 2011).

Die Ableitung der Kenngrößen des standörtlichen Wasserhaushalts (reale Verdunstung, Sickerung) erfolgte an allen 100x100-m-Rasterpunkten auf Jahresbasis mit dem Modellansatz TUB-BGR (WESSOLEK et al. 2008, 2009) für den Zeitraum 1961-2020. Eingangsgrößen sind Bodenart, nutzbare Feldkapazität (nFK) im effektiven Wurzelraum, Grundwasserflurabstand, Bestandestyp, Niederschlag und potenzielle Evapotranspiration. Als Steuergröße bei der Wasserhaushaltsmodellierung wurde die nFK tiefenstufenweise bis zur effektiven Durchwurzelungstiefe aufsummiert. Zur Abschätzung des effektiven Wurzelraums wurde auf Tiefenfunktionen für die Berechnung der ausschöpfbaren Bodenwassermenge nach RIEK (1998) zurückgegriffen. Diese Funktionen erlauben die Abschätzung der durch den Bestand in jeder Bodentiefe effektiv ausschöpfbaren Bodenwassermenge in Abhängigkeit von Bestandesalter und hydrischen Anreizen zur Tiefendurchwurzelung. In Anlehnung an die Zuwachsentwicklung der meisten Hauptbaumarten wurde davon ausgegangen, dass die vertikale Erschließung des Wurzelraumes im Alter von 40 Jahren i.d.R. abgeschlossen und der Einfluss des Bestandesalters entsprechend limitiert ist. Auf Grundlage dieser für jeden Punkt ermittelten Tiefenfunktion konnte der effektive Wurzelraum dann – dem Ansatz von RENGGER & STREBEL (1980) entsprechend – ermittelt werden (RUSS 2015). Die Wasserhaushaltsmodellierung erfolgte sowohl für die reale Bestockung als auch für den standortsabhängigen Waldtyp der potenziell natürlichen Vegetation. Zur Abschätzung von Wassermangel und ggf. auftretendem Trockenstress wurde der Quotient aus realer und potenzieller Evapotranspiration (AET/PET) berechnet.

2.3 Wasserhaushaltsmodellierung von Buchenbeständen mit LWF-Brook90

Exemplarisch wurden für ausgewählte BZE-Punkte mit Buchenbestockung Wasserhaushaltsmodellierung

gen mit dem Modell LWF-Brook90 (HAMMEL & KENNEL 2001) durchgeführt. Dieses ist eine Erweiterung des Modells Brook90 (FEDERER 2002). Das Modell simuliert auf Tagesbasis ganzjährig Evapotranspiration und Bodenwasserflüsse. Als Eingangsdaten benötigt LWF-Brook90 Klimadaten (Temperatur, Niederschlag, relative Luftfeuchte, Globalstrahlung, Windgeschwindigkeit) in täglicher Auflösung, Blattphänologie, Blattflächenindex (LAI), Stammflächenindex (SAI), Bestandeshöhe, Feinwurzelverteilung und bodenhydraulische Parameter. Um für den Zeitraum 1961-2020 für jeden BZE-Punkt die notwendigen Klimadaten zu erhalten, wurden auf Basis von Tagesdaten des gesamten DWD-Stationsdatensatzes (DEUTSCHER WETTERDIENST 2020) Klimazeitreihen von 01.01.1961 bis 31.08.2020 mittels „ordinary kriging“ (Niederschlag) und „regression kriging“ (alle anderen Klimakenngrößen) interpoliert (ZICHE & SEIDLING 2010). Die Phänologie wurde für den gesamten Zeitraum mit einem standortsspezifisch kalibrierten Modell nach MENZEL & FABIAN (1999) abgeleitet (RUSS & RIEK 2017). Um die Bestandeshöhe und ihre Entwicklung über den Simulationszeitraum abzuleiten, wurde aus den Daten der Bestandesaufnahmen der BZE-Bestände zunächst die Oberhöhe berechnet und ihr Verlauf dann an den Höhenverlauf digitalisierter Ertragstafeln (NAGEL 2007) angepasst. Der LAI und SAI und ihr Verlauf wurden analog berechnet. Für den LAI wurde dazu anhand von Biomassefunktionen zunächst die Blattbiomasse basierend auf den Stammzahl-, Durchmesser- und Höhenwerten der Ertragstafeln berechnet und diese dann mit artspezifischen durchschnittlichen spezifischen Blattfläche (SLA) - Angaben der Baumarten aus der LEDA – Datenbank (KLEYER et al. 2008) multipliziert. Anschließend wurde der Verlauf an die aus den BZE-Bestandesdaten berechneten LAI-Werte angepasst. Der LAI der Bodenvegetation wurde anhand der Deckungsgradschätzungen aus den Vegetationsaufnahmen abgeleitet. Damit wurde zunächst die oberirdische Blattbiomasse, wie in ZICHE et al. (2019) beschrieben, modelliert. Anschließend wurde diese ebenfalls mit SLA-Werten aus der LEDA-Datenbank multipliziert. Die Feinwurzelverteilung wurde entsprechend von WILPERT et al. (2016) anhand einer Regression der Wurzelansprache an der Profilwand mit dem beta-Model (GALE & GRIGAL 1987, JACKSON et al. 1996) modelliert. Hydraulische Parameter zur Modellierung des Matrixflusses nach Mualem – van Genuchten wurden anhand der gemessenen Korngrößenverteilung nach RENGGER et al. (2009) geschätzt. Die Parametrisierung des Modells erfolgte wie in ZICHE et al. (2021) beschrieben. Abweichend davon wurden die Infiltrations-Parameter über alle Flächen konstant gehalten.

Zur Kennzeichnung von zeitlichen Trends wurden folgende Wasserhaushaltskenngrößen und Wassermangelindikatoren auf Grundlage der Simulationsergebnisse für den Zeitraum 1961-2020 berechnet:

- jährliche reale Evapotranspiration (Summe aus Transpiration, Evaporation und Interzeption) [mm]
- jährliche Sickerung [mm]
- mittlere jährliche pflanzenverfügbare Bodenwassermenge bis 200 cm Tiefe [mm]

- mittlere jährliche relative pflanzenverfügbare Bodenwassermenge bis 200 cm Tiefe [%]
- Anzahl der Tage pro Jahr mit $AT/PT < 0,7$: Quotient aus realer und potenzieller Transpiration (SHAW & LAING 1966), Schwellenwert ab dem mit deutlich reduziertem Dickenwachstum zu rechnen ist.

2.4 Ableitungen zur Anbaueignung von Buche

Die Empfehlungen für die Anbaueignung der Rotbuche unter variierenden Wasserhaushaltsbedingungen basieren auf statistischen Ansätzen, die bei RIEK & RUSS (2014, 2019) und RIEK et al. (2020) ausführlich dargestellt sind. Grundlage für die Kennzeichnung der Baumartenempfehlungen bilden Angaben zum Bestandeszieltyp von 268.796 Punkten des verwendeten 100x100-m-Punkterasters, die dem Datenspeicher Wald (Stichjahr: 2008) entnommen wurden. Es wurden Diskriminanzmodelle zur Schätzung der Hauptbaumart des jeweiligen Bestandeszieltyps als Funktion von Boden- und Klimakennwerten hergeleitet, in denen sich folgende Kennwerte als signifikante Einflussgrößen erwiesen:

1. Wasserdefizit aus realer und potenzieller Evapotranspiration
2. Temperatursumme bis zum Zeitpunkt 15.04., ermittelt durch Addition der gewichteten Tagesmitteltemperaturen $> 0^{\circ}\text{C}$ ab Jahresbeginn (Gewichtung im Januar mit Faktor 0,5; im Februar mit Faktor 0,75; ab März mit Faktor 1)
3. Minimale Tagesmitteltemperatur
4. „Spätfrostsumme“ (=Summe der Tagesminimumtemperaturen aller Tage mit Tagesminimumtemperatur $< 0^{\circ}\text{C}$ in den Monaten April und Mai)
5. Fünftelnährkraftstufe ($A^5, A^4, \dots, R^2, R^1$) nach SCHULZE (1998)

Empfehlungswahrscheinlichkeiten für die Hauptbaumarten des Bestandeszieltyps unter veränderten Klimabedingungen wurden anhand der ermittelten Diskriminanzmodelle unter Verwendung von Daten aus Klimaszenarien der Dekaden 2051-2060 und 2091-2100 berechnet (RIEK et al. 2020). Bei den szenarischen Klimadaten handelt es sich um Angaben zu Niederschlag und potenzieller Verdunstung auf Tagesbasis sowie um tägliche Minimum-, Maximum- und Mitteltemperaturen als Ergebnis von Berechnungen mit dem regionalen Klimamodell WettReg auf Grundlage des globalen Klimamodells ECHAM5/MPI-OMT63L31 für die SRES-Szenarien A1B, A2 und B1 (SPEKAT et al. 2007). Basierend auf einem Vergleich der Modellergebnisse für unterschiedliche Szenarien beschränken sich die finalen Herleitungen letztlich auf das Szenario A1B. Die Regionalisierung der Klimakennwerte für ein brandenburgweites 1x1 km Raster erfolgte auf der Grundlage der Klimakennwerte von 62 meteorologischen Stationen in und um Brandenburg. Methodische Details finden sich bei KREIENKAMP & SPEKAT (2009) und RIEK et al. (2013). Aufbauend auf den mit Hilfe der Diskriminanzanalyse für die Hauptbaumarten Kiefer, Eiche und Buche abgeleiteten Empfeh-

lungswahrscheinlichkeiten wurden in einem weiteren Schritt empirisch generierte Baumarteneignungstabellen von 22 verschiedenen Baumarten (GRÜLL 2007) mit in die Auswertung einbezogen. Unter dem Anspruch der Risikominimierung im Klimawandel konnten damit standortsabhängig Empfehlungen zu den Baumartenanteilen an der Bestandeszusammensetzung statistisch hergeleitet werden. Methodische Details werden von RIEK et al. (2020) erläutert.

Im vorliegenden Beitrag wird für die Baumart Buche ein weiterer Ansatz zur Einschätzung ihrer Anbaueignung verwendet. Dieser beruht auf der Standortwasserbilanz nach GRIER & RUNNING (1977), die sich für grundwasserferne Standorte als Summe von langjähriger Klimatischer Wasserbilanz und nutzbarer Feldkapazität bis 1 m Bodentiefe errechnet. Im vorliegenden Beitrag wurde anstelle der nutzbaren Feldkapazität das pflanzenverfügbare Bodenwasser im effektiven Wurzelraum (Abschnitt 2.2) verwendet. Die Standortwasserbilanz (SWB) ist ein einfach herleitbarer Indikator für potenziellen Wassermangel, der jedoch aufwändige Wasserhaushaltsmodellierungen zur Einschätzung von Trockenstress auf physiologischer Ebene nicht ersetzt. Von HAMKENS et al. (2020) werden auf der Grundlage von Literaturangaben, Inventurauswertungen und Expertenwissen Schwellenwerte der SWB für die Trockenstressgefährdung von Baumarten als Entscheidungshilfe zur klimawandelangepassten Baumartenwahl im Land Sachsen-Anhalt vorgelegt. Diese Schwellenwerte werden im vorliegenden Beitrag in Kombination mit der standörtlichen Nährkraftstufe als Grundlage für die standortgerechte Baumartenwahl mit Blick auf die Baumart Rotbuche herangezogen. Nach HAMKENS et al. (2020) wird dabei differenziert zwischen i) Baumart führend, ii) Baumart beigemischt, iii) Baumart vorübergehend beigemischt, iv) Baumart begleitend oder v) Baumart vom Anbau ausgeschlossen. Der Sonderfall „vorübergehend beigemischt“ bezieht sich auf waldbauliche Ausgangssituationen in Buchenbeständen mit flächiger Naturverjüngung, die auf Standorten stocken, deren Wasserversorgung sich klimawandelbedingt so sehr verschlechtern wird, dass die vorhandene Verjüngung nur „vorübergehend“ im Sinne kürzerer Produktionszeiten bzw. geringerer Zielstärken in die Waldentwicklung einbezogen werden kann.

3 Ergebnisse

Mit dem Jahr 2020 endete die jüngste, den Zeitraum 1991-2020 umfassende, sogenannte Klimanormalperiode. Der Begriff kennzeichnet einen Zeitraum der Klimabeobachtung, der von der Weltorganisation für Meteorologie (WMO) auf 30 Jahre festgelegt wurde und als Referenzzeitraum zur Erfassung des Klimas und seiner Änderungen dient. Referenzperioden der WMO sind die Zeitspannen von 1901-1930, 1931-1960, 1961-1990 und 1991-2020. Die Mittelwertbildung über diese Zeitspannen dient dazu, möglichst alle wesentlichen Ausprägungen des Klimas mit seiner natürlichen Variabilität während der Zeitspanne zu berücksichtigen. Die nachfolgenden Darstellungen zu

Klima und Wasserhaushalt basieren auf dem Vergleich der beiden vergangenen Klimanormalperioden und der Dynamik der betrachteten Datenreihen innerhalb des Zeitabschnitts von 1961-2020.

3.1 Veränderung der sommerlichen Klimatischen Wasserbilanz

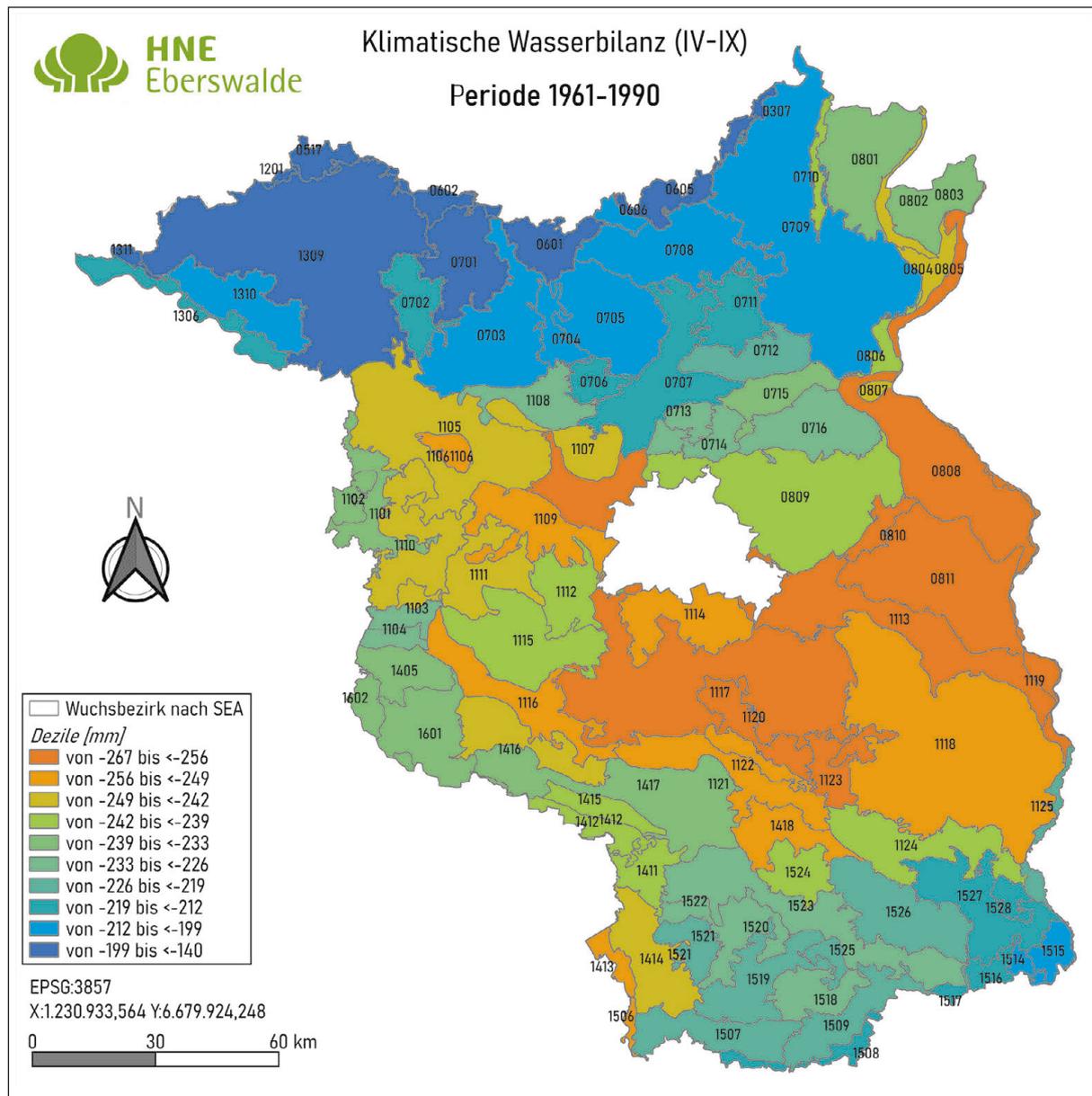
Für grundwasserferne Standorte gibt die Wasserversorgung aus dem Niederschlag in Relation zum atmosphärischen Verdunstungsanspruch erste Hinweise auf mögliche Wassermangelsituationen. Hierzu wurde die Klimatische Wasserbilanz als Differenz aus Niederschlag und potenzieller Evapotranspiration (Grasreferenzverdunstung) im Sommerhalbjahr (April – September) für alle terrestrischen Standorte des brandenburgweiten 100x100-m-Rasters für den Zeitraum der beiden letzten Klimanormalperioden berechnet. Im Ergebnis zeigt sich eine Abnahme der Klimatischen Wasserbilanz von -237 mm in der Normalperiode 1961-1990 (P1) auf -286 mm in der Normalperiode 1991-2020 (P2). Die Differenz ergibt sich durch den Anstieg der potenziellen Verdunstung um 22 mm von 585 mm in P1 auf 607 mm in P2 bei gleichzeitiger Abnahme der Sommerniederschläge um 27 mm von 348 mm in P1 auf 321 mm in P2. Im Mittel aller terrestrischen, d. h. grundwasserfernen, Waldstandorte Brandenburgs reduziert sich die Klimatische Wasserbilanz somit um 49 mm. Die Reduktion ist bei den nährstoffärmeren Standorten schwächer ausgeprägt als bei den kräftigeren Standorten (Tab.1). Dies zeigt sich besonders anhand der Mediane mit einer Differenz von -30 mm bzw. -32 mm bei A- und Z-Standorten gegenüber -48 mm bzw. -51 mm bei K- und R-Standorten. Die Mediane sind hier aufgrund schiefer Verteilungen aussagekräftiger als die arithmetischen Mittelwerte. Die Kohärenz zwischen Nährkraftstufe und Klimatischer Wasserbilanz ergibt sich zufällig aus großräumigen Unterschieden der Nährkraft in Abhängigkeit von der Stratigrafie einerseits und dem Auftreten von Gradienten und räumlichen Mustern bei der Dynamik der Klimatischen Kenngrößen andererseits. Letztere lassen sich anhand von Kartendarstellungen der Klimatischen Wasserbilanz von Wuchsbezirken visualisieren (Abb.1).

Die Karten in Abb.1 zeigen die Mediane der sommerlichen Klimatischen Wasserbilanz von 94 Wuchsbezirken für die Perioden P1 und P2, deren Differenzen aus der Darstellung in Abb.2 hervorgeht. Die Klasseneinteilungen werden in allen drei Darstellungen durch die Dezile der Wuchsbezirksmediane vorgegeben. Gemessen anhand der Spannen zwischen den 10- und 90-Perzentilen variieren die Werte in der Klimanormalperiode P1 zwischen -199 mm und -256 mm und in der Periode P2 zwischen -245 mm und -297 mm. Dies verdeutlicht die Zunahme der Klimatischen Trockenheit im betrachteten Zeitraum.

Durch die Darstellung in Abb.1 wird sichtbar, dass sich die räumliche Verteilung der Klimatischen Wasserbilanz zwischen den beiden Klimanormalperioden P1 und P2 deutlich unterscheidet. So stellen sich z. B. die südöstlich und östlich von Berlin gelegenen Wuchsbezirke in P1 als besonders trocken dar, während sie in P2 moderat in Erscheinung treten. Die trockensten Gebiete sind in P2 indes Wuchsräume im südwestlichen Landesteil, die in P1 noch durchschnittlich erschienen. Die räumlichen Unterschiede bei der Veränderung der Klimatischen Wasserbilanz werden durch die Karte der wuchsbezirksbezogenen Median-Differenzen noch deutlicher (Abb.2). Hier zeigt sich, dass die Abnahme der Klimatischen Wasserbilanz in den während P1 klimatisch besonders trockenen Wuchsräumen südöstlich von Berlin nur sehr gering bis nicht vorhanden ist. Markant fallen hingegen die Abnahmen der Klimatischen Wasserbilanz in den nördlichen insbesondere nordwestlichen Wuchsräumen aus. Insgesamt weist das ermittelte räumlich-zeitliche Muster darauf hin, dass sich der Klimawandel in Regionen die bereits in der Periode P1 als besonders trocken ausgewiesen wurden, weniger bemerkbar macht, als in den ehemals frischeren Regionen, die von bedeutenden Abnahmen der Klimatischen Wasserbilanz von bis zu ca. 100 mm betroffen sind. Dies erscheint für die Fragestellung im vorliegenden Beitrag insofern von Relevanz, als sich die für Rotbuche potenziell geeignetsten Wuchsräume im früher klimabegünstigten nördlichen Brandenburg befinden, welches nun besonders stark von der Tendenz zu größerer Trockenheit betroffen ist.

Tab.1: Klimatische Wasserbilanz, potenzielle Evapotranspiration und Niederschlag im Vergleich der Klimanormalperioden 1961-1990 und 1991-2020 sowie deren Differenzen; stratifiziert nach der Nährkraftstufe terrestrischer Standorte (Grundlage: 100x100-m-Raster)

Nährkraftstufe		Periode 1961-1990			Periode 1991-2020			Differenzen			[ha]
		KWB	PET	Nd	KWB	PET	Nd	KWB	PET	Nd	
A	Mittelwert	-244	589	346	-292	612	320	-48	22	-26	79.765
	Median	-242	586	347	-272	606	313	-30	19	-34	
Z	Mittelwert	-241	590	349	-288	612	324	-47	22	-25	418.098
	Median	-237	588	353	-269	604	319	-32	16	-34	
M	Mittelwert	-233	580	347	-281	603	322	-48	23	-25	390.197
	Median	-226	578	350	-270	595	311	-44	17	-40	
K	Mittelwert	-227	575	347	-276	596	320	-49	21	-28	71.515
	Median	-218	574	349	-267	587	308	-48	13	-41	
R	Mittelwert	-223	569	346	-275	590	316	-52	21	-31	5.721
	Median	-217	568	342	-268	579	304	-51	11	-37	



Die Gegenüberstellung der wuchsbezirksbezogenen Mediane der Klimatischen Wasserbilanz in den beiden Klimanormalperioden zeigt das Streudiagramm in Abb.3. Dargestellt ist die $Y=X$ -Gerade sowie die lineare Ausgleichsfunktion. Es zeigt sich, dass die Mediane der Wuchsbezirke in Periode P2 ausnahmslos niedriger sind als in Periode P1. Zudem wird auch hier deutlich, dass der Betrag der Abnahme vom Ausgangswert der Periode 1 abhängt. Rechnerisch ergibt sich aus dem Verlauf der Ausgleichsgeraden, dass für Ausgangswerte (P1) um -290 mm keine Veränderung der mittleren Klimatischen Wasserbilanz in P2 erfolgt, während für Ausgangswerte > -200 mm Abnahmen von ca. $60 - 100$ mm zu verzeichnen sind.

Die Dekadenmittelwerte der wuchsbezirksbezogenen Mediane (Abb.4) zeigen einen Abwärtstrend der som-

merlichen Klimatischen Wasserbilanz von 213 mm in der Dekade 1961-1970 auf 305 mm in der Dekade 2011-2020, wobei sich die Dekade 2001-2010 deutlich durch einen vom Gesamtverlauf abweichenden (weniger negativen) Wert heraushebt. Für die letzte Dekade 2011-2020 unterstreichen die einzelnen Jahreswerte der sommerlichen Klimatischen Wasserbilanz die besondere Trockenheit der jüngsten Vergangenheit, insbesondere der Jahre 2018 (-549 mm), 2019 (-424 mm), 2020 (-391 mm), 2016 (-376 mm) und 2015 (-334 mm). Das Jahr 2018 liegt damit weit außerhalb des räumlich-zeitlichen Streubereichs aller Werte im betrachteten Zeitraum von 1961-2020. Die Besonderheit des Extremjahres 2018 bestätigt sich auch, wenn bei der Berechnung von Kennwerten für Wassermangel die Bodenwasserspeicherkapazität mit einbezogen wird (Abschnitt 3.2).

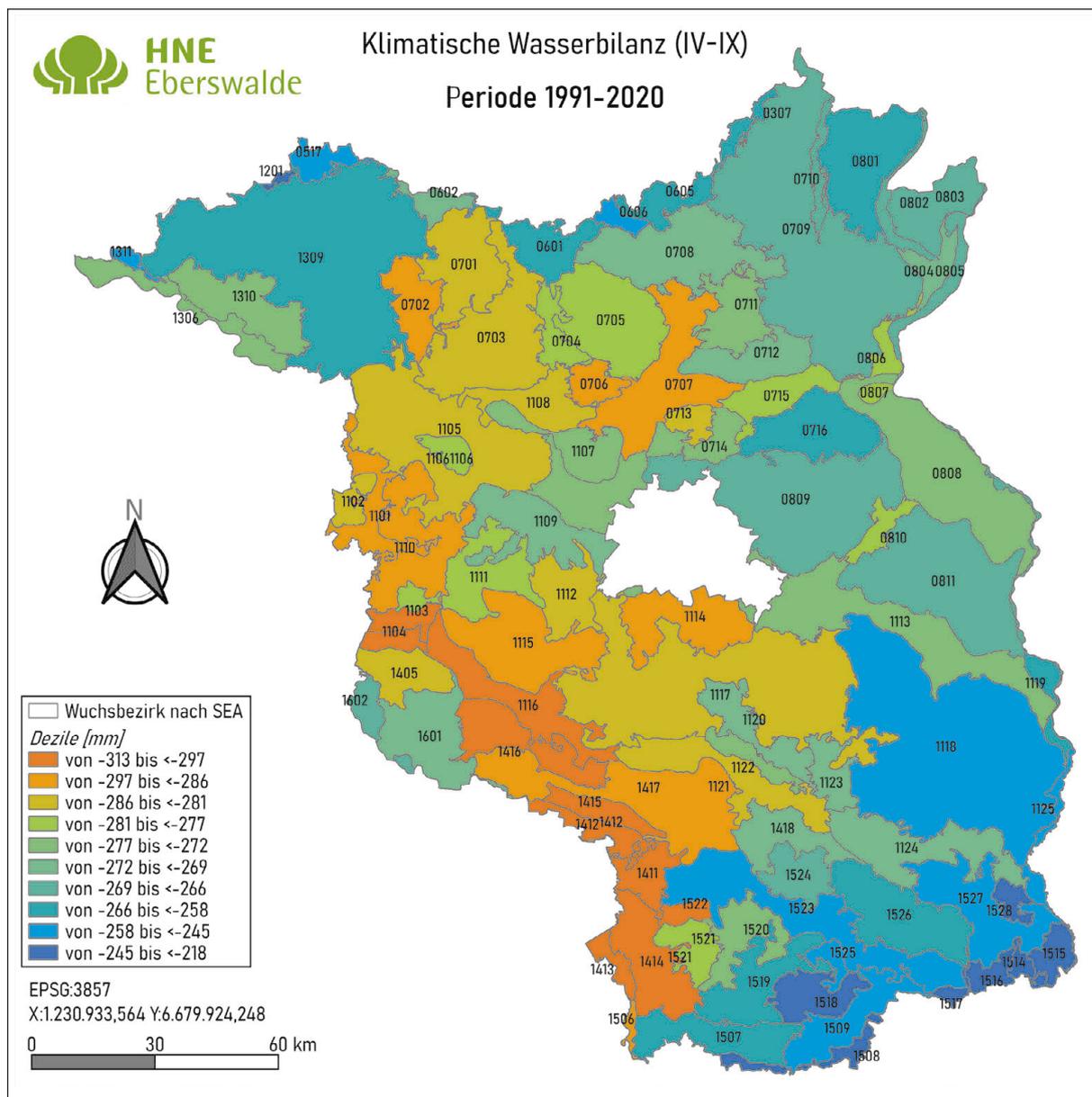


Abb.1a und b: Dezile der wuchsbezirksbezogenen sommerlichen Klimatischen Wasserbilanz (April – September) mit Wuchsbezirksnummer im Vergleich der Klimanormalperioden 1961-1990 und 1991-2020

Um die Dynamik innerhalb der beiden Klimanormalperioden zu berücksichtigen, wurden für 94 Wuchsbezirke mittels linearer Regressionsanalyse Trendgeraden über den Zeitraum 1961-2020 berechnet und anhand der jeweiligen Regressionsmodelle mittlere sommerliche Klimatische Wasserbilanzen für die Dekade 2021-2030 ermittelt. Diese sich aus dem jeweiligen individuellen Trend der Wuchsbezirke ergebenden statistischen Prognosewerte dürften die unmittelbar bevorstehenden klimatischen Wasserhaushaltsbedingungen aufgrund der aktuellen Dynamik deutlich realistischer widerspiegeln als Mittelwerte vergangener Klimanormalperioden. Eine entsprechende Darstellung der Dezile der Wuchsbezirke zeigt die Karte in Abb.5. Im Ergebnis zeigt sich gegenüber der Klimanormalperiode 1991-2020 eine weitere Abnahme der sommerlichen Klimatischen Wasserbilanz, die nun-

mehr überwiegend zwischen -292 mm bis -350 mm (10- bis 90-Perzentil) liegt. Auffallend sind die sich aus der Regressionsanalyse bildenden, neuen regionalen Muster. Dabei zeichnen sich die trockensten Regionen südlich von Berlin im zentralen Bereich des Wuchsgebiets Mittelbrandenburger Talsand- und Moränenland ab (WG 07). Der Norden und Nordwesten sowie äußerste Süden und Südosten bleiben weiterhin etwas begünstigt und auch im Hohen Fläming (WG 16) sind die Werte gegenüber den angrenzenden Wuchsgebieten etwas erhöht.

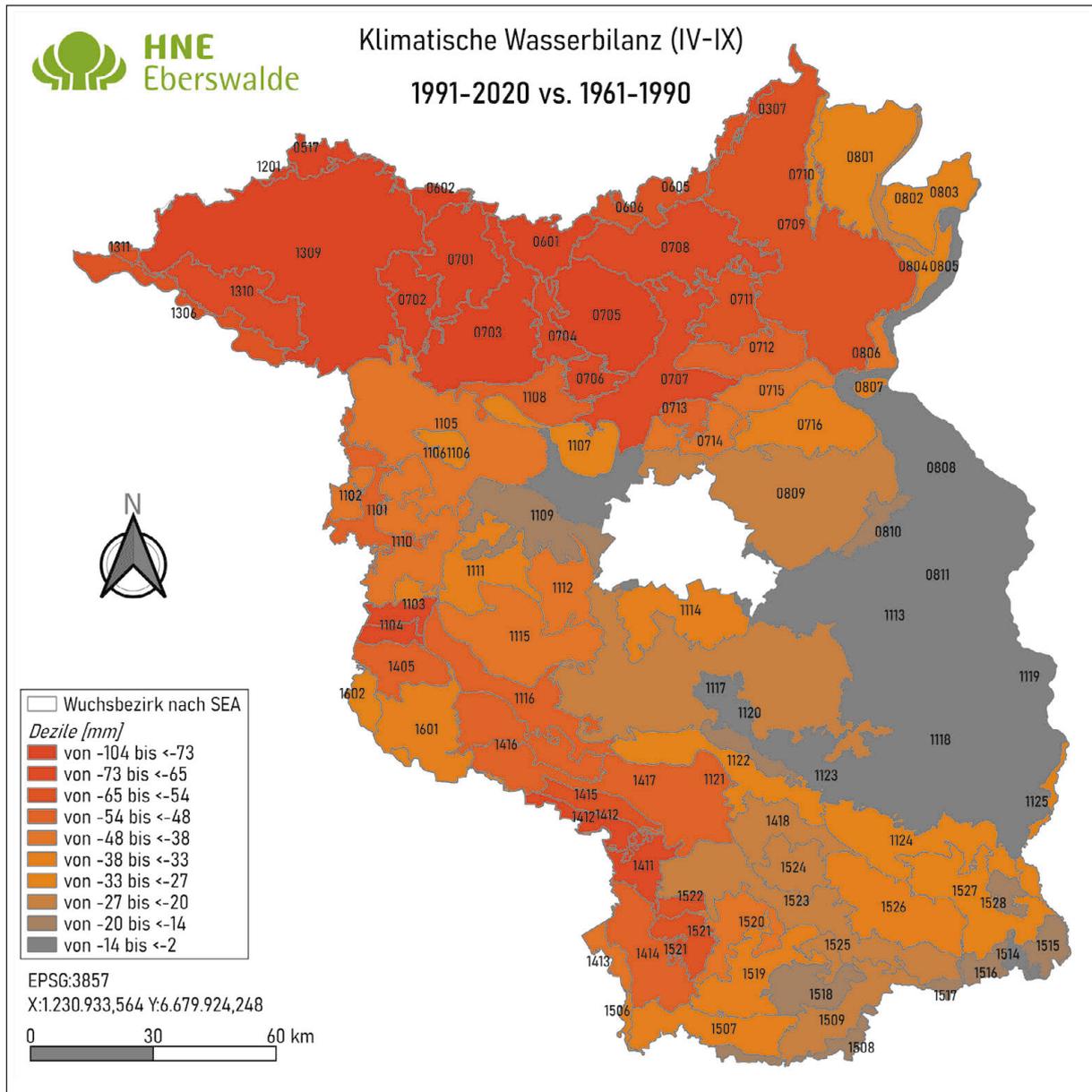


Abb.2: Differenzen der wuchsbezirksbezogenen sommerlichen Klimatischen Wasserbilanzen (April – September) in den Klimanormalperioden 1961-1990 und 1991-2020 mit Wuchsbezirksnummer

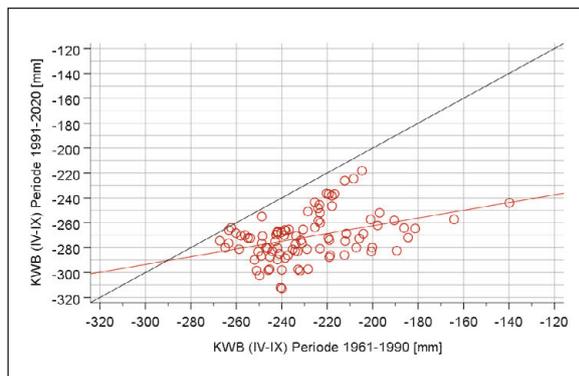


Abb.3: Streudiagramm der wuchsbezirksbezogenen sommerlichen Klimatischen Wasserbilanzen in den Klimanormalperioden 1961-1990 und 1991-2020 mit Ausgleichsgerade (rot, $R^2=0,16$) und $Y=X$ -Linie (schwarz)

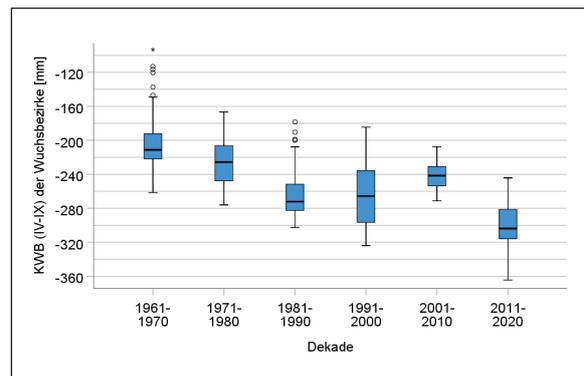


Abb.4: Boxplot der wuchsbezirksbezogenen Mediane der sommerlichen Klimatischen Wasserbilanz für die Dekaden des Zeitraums 1961-2020

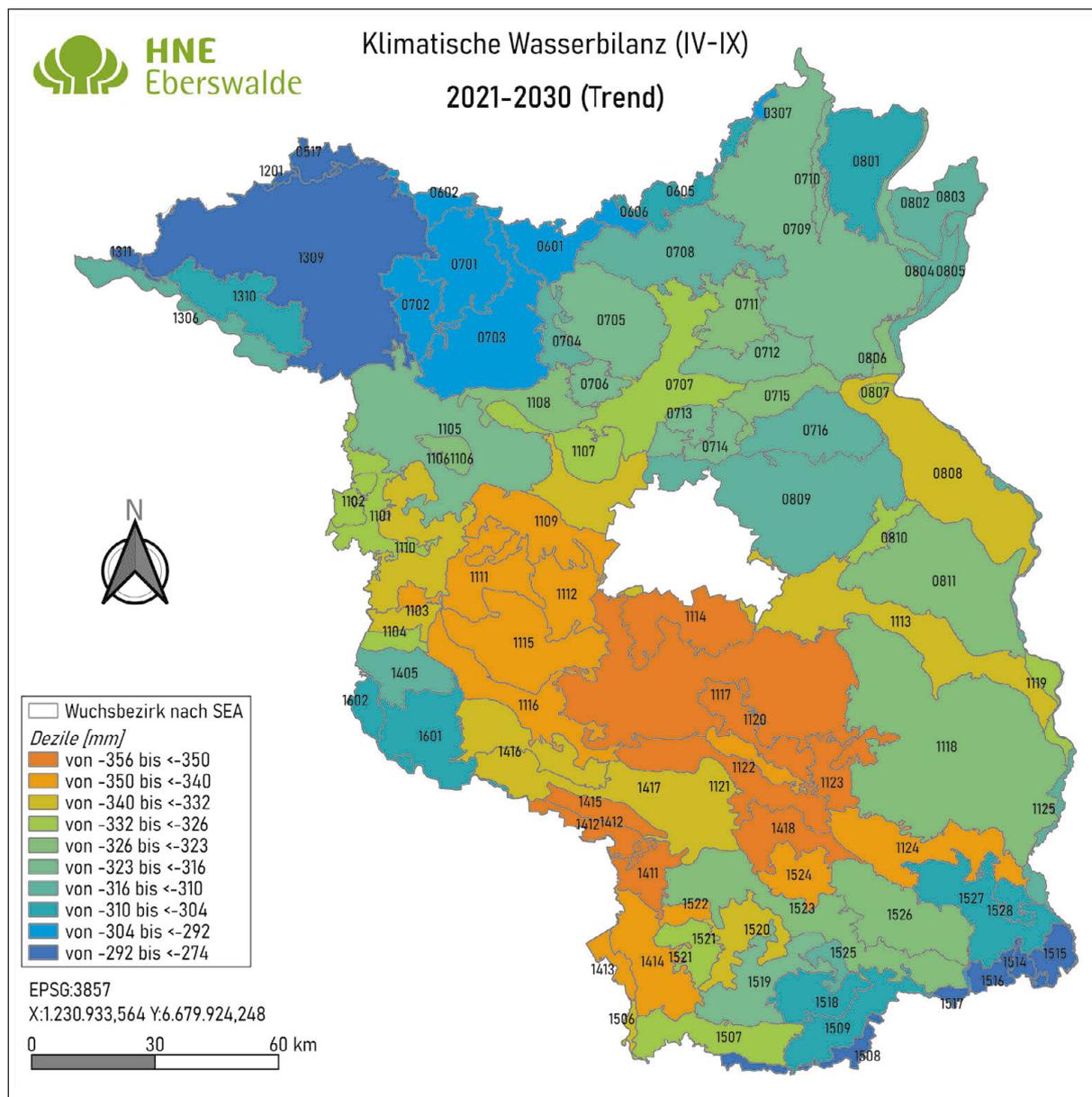


Abb.5: Dezile der wuchsbezirksbezogenen sommerlichen Klimatischen Wasserbilanz (April – September) in der Dekade 2021-2030, berechnet aus dem linearen Regressionstrend jedes Wuchsbezirks der Zeitreihe 1961-2020

3.2 Veränderungen des Wasserhaushalts auf Standortebene

Mit Hilfe des Modellansatzes TUB-BGR konnten für die Rasterpunkte des 100x100-m-Netzes reale Verdunstungsraten geschätzt werden (Abschnitt 2.2). Als Index für Wassermangel dient hier der Quotient aus realer und potenzieller Evapotranspiration (AET/PET). Für die brandenburgische Gesamtwaldfläche berechnete AET/PET-Quotienten sind bei RIEK & RUSS (2019) dargestellt und unter Nutzung der Ergebnisse von Level-II-Flächen sowie Einbeziehung standortkundlicher Straten integrierend ausgewertet worden. Zudem finden sich dort die Ergebnisse von TUB-BGR-Wasserhaushaltssimulationen, die mit szenarischen Klimadaten des SRES-Szenarios A1B mit dem Klimaregionalmodell WettReg generiert wurden.

Den folgenden Ausführungen liegen AET/PET-Quotienten zugrunde, die für die 100x100-m-Rasterpunkte unter Verwendung der Klimazeitreihe 1961-2020 berechnet wurden. Um insbesondere Aussagen zur Dynamik des Wasserhaushalts grundwasserferner Buchenstandorte treffen zu können, werden hier exemplarisch nur fK2 und mK2-Standorte betrachtet, d. h. terrestrische nährstoffkräftige Standorte im Bereich der konventionellen standortkundlichen Klimastufen f (frisch) und m (=mäßig trocken). Gemäß MLUV (2006) entsprechen die Bestandeszieltypen dieser Standorte Schlusswaldstadien von natürlichen Buchenwaldgesellschaften. Charakteristische Waldbiotoptypen sind Knäuelgras-Hainbuchen-Buchenwald, Flattergras-Buchenwald und Perlgras-Buchenwald. Die Ausprägung von Wassermangel hängt bei den ausgewählten Standorten aufgrund von fehlendem kapillarem Aufstieg aus

dem Grundwasser ausschließlich von der Wasserspeicherfähigkeit der Böden und den (sommerlichen) Witterungsbedingungen ab; Klimaänderungen pausen sich auf die modellierten AET/PET-Werte somit stärker durch, als im Falle grundwasserbeeinflusster Böden. Für die Modellierung des jeweiligen standortsabhängigen effektiven Wurzelraumes bei der Berechnung der pflanzenverfügbaren Bodenwasserspeicherkapazität (Abschnitt 2.2) wurde ein 100-jähriger Buchenbestand angenommen.

Abb.6 zeigt die Histogramme von AET/PET im Vergleich der beiden Klimanormalperioden 1961-1990 (P1) und 1991-2020 (P2). Im jeweiligen Histogramm enthalten sind alle räumlich-zeitlichen Merkmalsausprägungen der beiden Perioden (je 30 Jahre) über alle fK2- und mK2-Standorte der Gesamtwaldfläche (n = 1.256.640). Die Häufigkeitsverteilung der AET/PET-Quotienten zeigt in Periode P1 eine Tendenz zur Linksschiefe, in P2 hingegen zur Rechtsschiefe (Abb.6). Dieses ergibt sich aus der Verschiebung der Werteausprägungen im zentralen Häufigkeitsbereich hin zu kleineren Werten. Der Median von AET/PET reduziert sich zwischen P1 und P2 um 0,08 von 0,83 auf 0,75, was einer Abnahme der mittleren Differenzen AET - PET um 51 mm von -118 mm auf -169 mm (Median) entspricht. Die niedrigsten AET/PET-Ausprägungen liegen sowohl in P1 als auch in P2 bei Werten <0,58 (5-Perzentil); die der Differenzen zwischen AET und PET bei -326 mm (P1) bzw. -329 mm (P2). Da es sich bei der hier verwendeten potenziellen Evapotranspiration um die Grasreferenzverdunstung

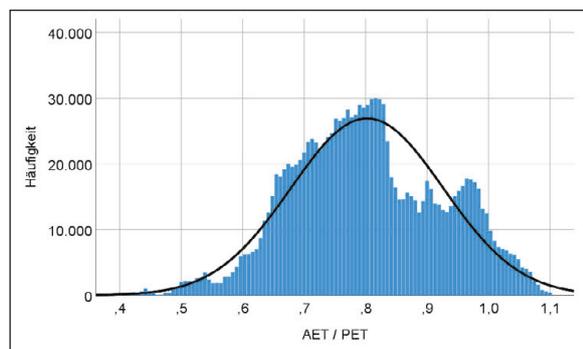
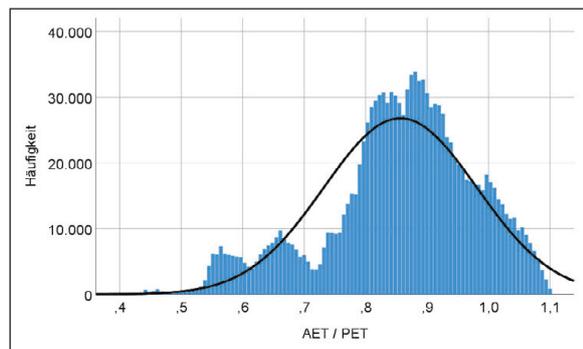


Abb.6: Histogramme der Quotienten aus tatsächlicher und potenzieller Evapotranspiration (AET/PET) mit Normalverteilungskurve, berechnet mit den TUB-BGR-Ansatz für fK2 und mK2-Standorte im Vergleich der Klimanormalperioden 1961-1990 (oben) und 1991-2020 (unten)

nach ALLEN et al. (1998) handelt, können aufgrund der gegenüber Einheitsrasen größeren Verdunstungsoberfläche von Waldbeständen auch AET/PET-Quotienten >0 auftreten. Diese machen in P1 3,8 % und in P2 1,5 % der Stichprobe aus.

Auf der Grundlage der betrachteten grundwasserfernen K-Standorte lässt sich der Trend der Abnahme der jährlichen AET/PET-Quotienten regressionsanalytisch darstellen. Hierzu wurden zunächst die Mediane aller fK2- und mK2-Standorte für jedes Jahr berechnet und mit diesen aggregierten Daten eine lineare Regressionsanalyse durchgeführt. Die sich dabei ergebende Regressionsfunktion lautet:

$$AET/PET = 4,907561 - 0,002069 \cdot \text{Jahr}$$

(R=0,36; P<0,001)

Auf der Basis dieser Ausgleichsgeraden über dem Zeitraum 1961-2020 lässt sich sehr grob abschätzen, ob und wann zu erwarten ist, dass Ausprägungen von AET/PET in den vergangenen Extremjahren zu durchschnittlichen Verhältnissen in der Zukunft werden. Nach Tab. 2 zeigt sich anhand dieser Extrapolation der Regressionsfunktion, dass das Extremjahr 2018 von so außergewöhnlicher Trockenheit war, dass selbst bei hypothetisch unterstellter, weiterhin linear verlaufender Abnahme der AET/PET-Quotienten, diese erst nach etwa 100 Jahren zu durchschnittlichen Bedingungen würden. In Tab.2 sind für die 10 trockensten Jahre der vergangenen beiden Normalperioden (gemessen anhand von AET/PET) diejenigen Jahre angegeben, ab derer gemäß der genannten Regressionsfunktion der jeweilige AET/PET-Quotient erreicht würde, d. h. ab dann dem Durchschnitts- bzw. Erwartungswert entspräche. Extremjahre, wie 1976, 1992, 2016, 2020 und 2006 könnten demzufolge bereits um die Jahrhundertmitte zu einem Durchschnittsjahr werden. Hierbei ist zu bedenken, dass die Extrapolation des statistischen Trendverlaufs viele Faktoren unberücksichtigt lässt. Insbesondere nicht berücksichtigt sind die für die Zukunft erhofften Auswirkungen von Maßnahmen des Klimaschutzes, wie diverser Strategien und Verordnungen zur Reduktion des Ausstoßes klimarelevanter Treibhausgase. Andererseits weisen auch die mit Hilfe

Tab.2: Liste der 10 bezüglich AET/PET extremsten Trockenjahre im Zeitraum 1961-2020 sowie prognostiziertes Jahr, ab dem der jeweilige AET/PET-Wert dem statistischen Erwartungswert entspricht

Jahr (Extrem)	AET/PET	Jahr (Durchschnitt)
2018	0,514	2123
1989	0,536	2113
1982	0,582	2091
2003	0,610	2077
1988	0,612	2076
1976	0,637	2064
1992	0,647	2059
2016	0,653	2056
2020	0,654	2056
2006	0,663	2052

von komplexen Klimamodellen berechneten Szenarien vor allem mit Blick auf die Niederschlagsentwicklung in der Region Brandenburg unterschiedliche Verläufe auf, sodass Prognosen hinsichtlich AET/PET mit Unsicherheiten behaftet sind (ZICHE et al. 2021). So betrachtet haben die hier über zwei Klimanormalperioden abgeleiteten statistischen Trends neben den gängigen Modellstudien durchaus ihre Berechtigung bei der Einschätzung zukünftig möglicher Veränderungen des standörtlichen Wasserhaushalts und damit verbundendem Trockenstress.

Um die Bedeutung der Klimaveränderung für den Wasserhaushalt grundwasserferner Buchenstandorte noch anschaulicher zu machen, wurden die mittleren jährlichen AET/PET-Quotienten und AET-PET-Differenzen der im nördlichen Brandenburg gelegenen, konventionell als frisch oder mäßig trocken eingestuft potenziellen Buchenverbreitungsgebiete der Makroklimaformen α , β , δ und μ mit den als sehr trocken eingestuften Gebieten der Makroklimaform γ in Zentralbrandenburg verglichen. Die hierzu berücksichtigten exemplari-

schen Wuchsräume (Tab.3) umfassen im Wesentlichen die Wuchsgebiete des (Mittel-)Mecklenburger Jungmoränenlandes und Ostmecklenburg-Nordbrandenburger Jungmoränenlandes (WG 06, WG 07) einschließlich des dem Altmoränengebiet zuzurechnenden Wuchsbezirks Pritzwalker Platte (1309; WG 13) einerseits sowie das als trocken eingestufte Mittelbrandenburger Talsand- und Moränenland (WG 11) andererseits. Nicht aufgeführt sind in Tab.3 Wuchsbezirke mit sehr geringem Anteil grundwasserferner K-Standorte; dies sind einige Sander- und Talsandbereiche der Urstromtäler sowie Feuchtgebiete. Die in Tab.3 ausgewertete Stichprobe umfasst alle K2-Standorte des 100x100-m-Punkterasters in den aufgeführten exemplarischen Wuchsbezirken. Es handelt sich dabei meist um Bodenvergesellschaftungen von Bändersand-Braunerden, Lehm-Fahlerden und Parabraunerden aus Geschiebesanden und -lehmen der Grund- und Endmoränen. Je nach Mächtigkeit der bindigen Schichten variieren die pflanzenverfügbaren Bodenwasserwassermengen dieser Standorte und liegen im Mittel bei 120 mm bis maximal 210 mm.

Tab.3: Vergleich der Wassermangelkennwerte AET/PET bzw. AET-PET in den Klimanormalperioden P1 (1961-1990) und P2 (1991-2020) für grundwasserferne K-Standorte ausgewählter Wuchsbezirke im konventionell frischen bis mäßig trockenen nördlichen sowie im trockenen zentralen Brandenburg (Berechnung mittels TUB-BGR-Ansatz)

Code	Wuchsbezirksbezeichnung	AET / PET		AET - PET	
		1961-1990	1991-2020	1961-1990	1991-2020
307	Helpt-Brohmer Höhenmoräne	0,86	0,77	-95	-155
601	Rheinsberg-Mirower Seenmoräne	0,83	0,74	-112	-181
602	Malchower Grund-(Wellen-)moräne	0,87	0,76	-83	-166
605	Feldberger Huegelmoräne	0,83	0,74	-112	-181
701	Gadower Sander	0,86	0,74	-95	-182
703	Neuruppiner Platte	0,84	0,74	-107	-183
705	Granseer Platte	0,84	0,75	-111	-180
708	Templiner sandreiche Jungmoräne	0,83	0,75	-111	-175
709	Angermuende-Strasburger Grund-(Wellen-) moräne	0,83	0,75	-119	-170
711	Kienschorfheide	0,84	0,76	-109	-169
712	Eichhorster Platte	0,82	0,76	-122	-168
715	Eberswalder Talabschnitt	0,74	0,68	-194	-230
716	Tramper Platte	0,81	0,78	-131	-158
1309	Pritzwalker Platte	0,87	0,77	-81	-158
Mittelwert (ungewichtet)		0,83	0,75	-113	-175
1102	Schollener Platte	0,82	0,74	-125	-174
1105	Havelländisches Luch	0,80	0,75	-135	-175
1106	Friesacker Platte	0,80	0,75	-141	-176
1107	Bellin-Glin-Platte	0,79	0,76	-141	-170
1109	Nauener Platte	0,79	0,76	-145	-169
1110	Premnitzer Talsand und Platten	0,81	0,75	-129	-172
1111	Brandenburger Niederung und Platten	0,83	0,76	-124	-166
1112	Potsdamer Seen und Hügel	0,81	0,76	-133	-173
1113	Berlin-Fürstenwalder Talsand	0,79	0,75	-151	-176
1114	Teltower Platte	0,78	0,74	-163	-187
1115	Zauche Platte	0,81	0,75	-134	-175
1117	Koenigs Wusterhausener Talsand und Platten	0,79	0,76	-156	-177
1118	Beeskower Platte	0,81	0,79	-139	-150
1120	Teupitzer Platten und Hügel	0,78	0,76	-158	-169
Mittelwert (ungewichtet)		0,80	0,76	-141	-172

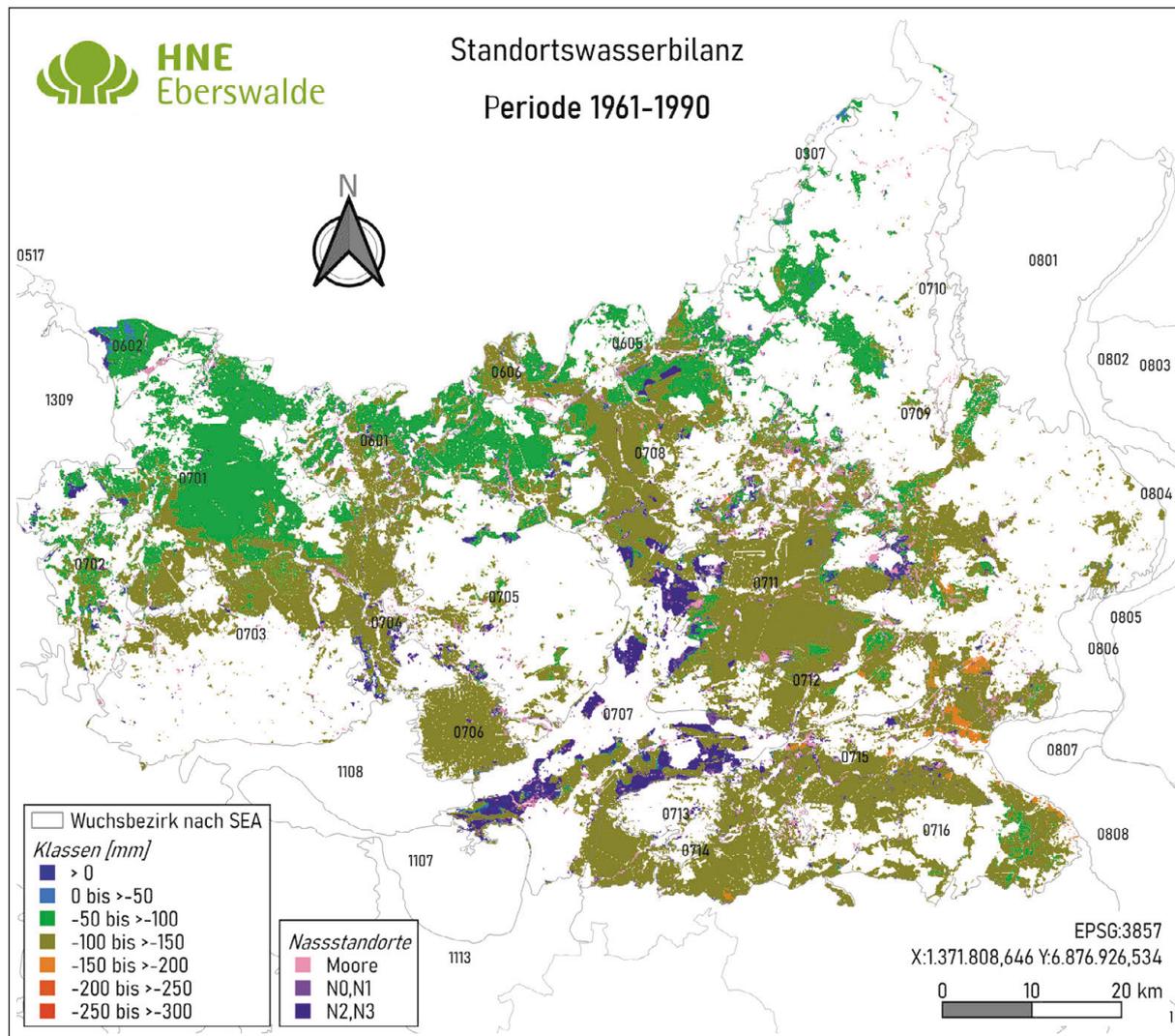


Abb.7: Standortswasserbilanz als Median der Klimanormalperiode 1961-1990 von terrestrischen Standorten der Wuchsgebiete WG 06 und WG 07 sowie organische und anorganische Nassstandorte

Die vergleichende Darstellung von AET/PET bzw. AET-PET in Tab.3 bestätigt den Trend, wonach sich die Gebiete im traditionell feuchteren Norden hinsichtlich der Intensität von Wassermangel den Trockengebieten annähern. Die Daten zeigen, dass Wassermangel im nördlichen Brandenburg in der Periode P2 mit durchschnittlich -175 mm Wasserdefizit (AET/PET=0,75) sogar noch stärker ausgeprägt ist als im klassischen zentralen Trockengebiet während der Periode P1 (Wasserdefizit: -141 mm, AET/PET=0,80). Für die ausgewählten Punkte im nördlichen Brandenburg ist eine Steigerung des Wasserdefizits um einen Betrag von durchschnittlich 62 mm, für den zentralen Bereich um 31 mm zu verzeichnen.

Zum Vergleich sei hier auf szenarische Berechnungen der AET-PET-Differenzen mit dem Klimamodell Wett-Reg für das SRES-Klimaszenario A1B hingewiesen (RIEK et al. 2020). Für die Dekade 2091-2100 liegen die Werte demnach bei -212 mm (Gebiet der heutigen Klimastufe f) bzw. -225 mm (Klimastufe t). Bei diesen Berechnungen wurden brandenburgweit alle

100x100-m-Rasterpunkte, d. h. auch grundwasserbeeinflusste Standorte, berücksichtigt.

Zur Kennzeichnung von potentiell Wassermangel kann – insbesondere für den Einsatz in der Forstlichen Standortkartierung – die sogenannte Standortswasserbilanz (SWB = Summe von Klimatischer Wasserbilanz und pflanzenverfügbaren Bodenwassermenge) herangezogen werden. Dieser Indexkennwert bezieht neben den Klimakenngrößen Niederschlag und Grasreferenzverdunstung auch die Bodenverhältnisse rechnerisch mit ein und ist daher der Klimatischen Wasserbilanz hinsichtlich seiner Aussagekraft bei der Einschätzung des standörtlichen Wassermangels überlegen. Aufgrund derselben Eingangsgrößen zur Herleitung der Kennwerte ist die SWB sehr eng mit der anhand des TUB-BGR-Ansatzes berechneten AET-PET-Differenzen korreliert und damit für vergleichbare Aussagen zum Trockenstressrisiko geeignet. Dies gilt insbesondere, wenn wie im vorliegenden Beitrag nicht nur standardmäßig die nutzbare Feldkapazität bis 1 m Tiefe, sondern das pflanzenverfügba-

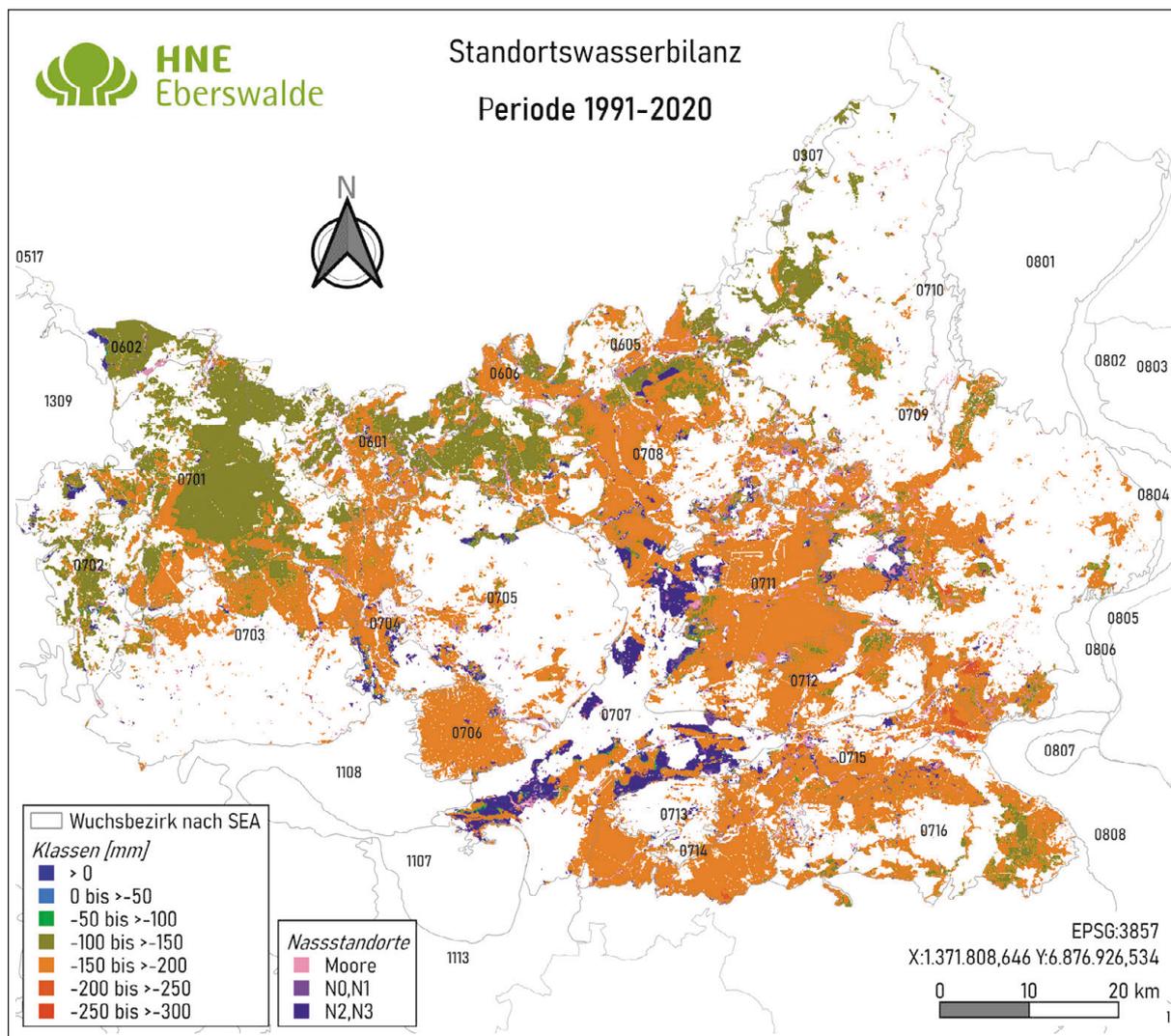


Abb.8: Standortswasserbilanz als Median der Klimanormalperiode 1991-2020 von terrestrischen Standorten der Wuchsgebiete WG 06 und WG 07 sowie organische und anorganische Nassstandorte

re Bodenwasser im effektiven Wurzelraum (Abschnitt 2.2) für die Berechnung von SWB verwendet wird.

Die Ausprägung der SWB im Vergleich der beiden Klimanormalperioden P1 und P2 sowie die Prognose für die Dekade 2021-2030 (Abschnitt 3.1) zeigen die Karten in den Abb. 7, 8 und 9 exemplarisch für die Region der Wuchsgebiete WG 06 und WG 07. Die unterschiedenen Klassen wurden hierbei in Anlehnung an Hamkens et al. (2020) festgelegt, wobei alle Nassstandorte gesondert ausgewiesen sind. Die Karten veranschaulichen die Zunahme der Trockenheit im Betrachtungszeitraum der beiden Normalperioden. In Perioden P1 lag die Mehrheit der Standorte (61 %) noch im Bereich von -100 mm bis -150 mm, in P2 waren dies nur 26 % und für die Prognosewerte der Dekade 2021-2030 (Abb.9) lediglich noch 1 % der Standorte. Hingegen nimmt der Anteil der Klasse -200 mm bis -250 mm von 0 % bzw. 0,5 % (P1, P2) auf 55 % in der Dekade 2021-2030 zu. Mit einer entsprechenden drastischen Zunahme der Voraussetzungen für Trockenstress wäre nach diesen Ergebnissen in den nächsten Jahren zu rechnen.

3.3 Wasserhaushaltssimulation mit LWF-Brook90

Simulationen des Wasserhaushaltes erfolgten für exemplarische Buchenbestände mit dem deterministischen Wasserhaushaltsmodell LWF-Brook90 auf Tagesbasis für die Jahre 1961-2019 (ZICHE & RIEK 2020). Bei den ausgewählten Flächen handelt es sich um 7 Inventurpunkte der Bodenzustandserhebung. Standortkundliche und forstliche Kenndaten der Punkte sind in Tab.4 dargestellt. Alle Standorte sind grundwasserfern und überwiegend durch bindiges Ausgangssubstrat geprägt, auf dem sich Fahlerden sowie Übergänge von Fahlerde zu Braunerde und Pseudogley entwickelt haben. Die nutzbaren Feldkapazitäten der Böden liegen bis 1 m Bodentiefe bei 98 mm – 189 mm und bis 2 m Tiefe bei 216 mm – 342 mm. Die entsprechenden Feinbodenformen nach der Nomenklatur der SEA gehen aus Tab.4 hervor.

Entsprechend der während der vergangenen 60 Jahre tendenziell angestiegenen Temperaturen im Untersuchungsraum nimmt auch die potenzielle

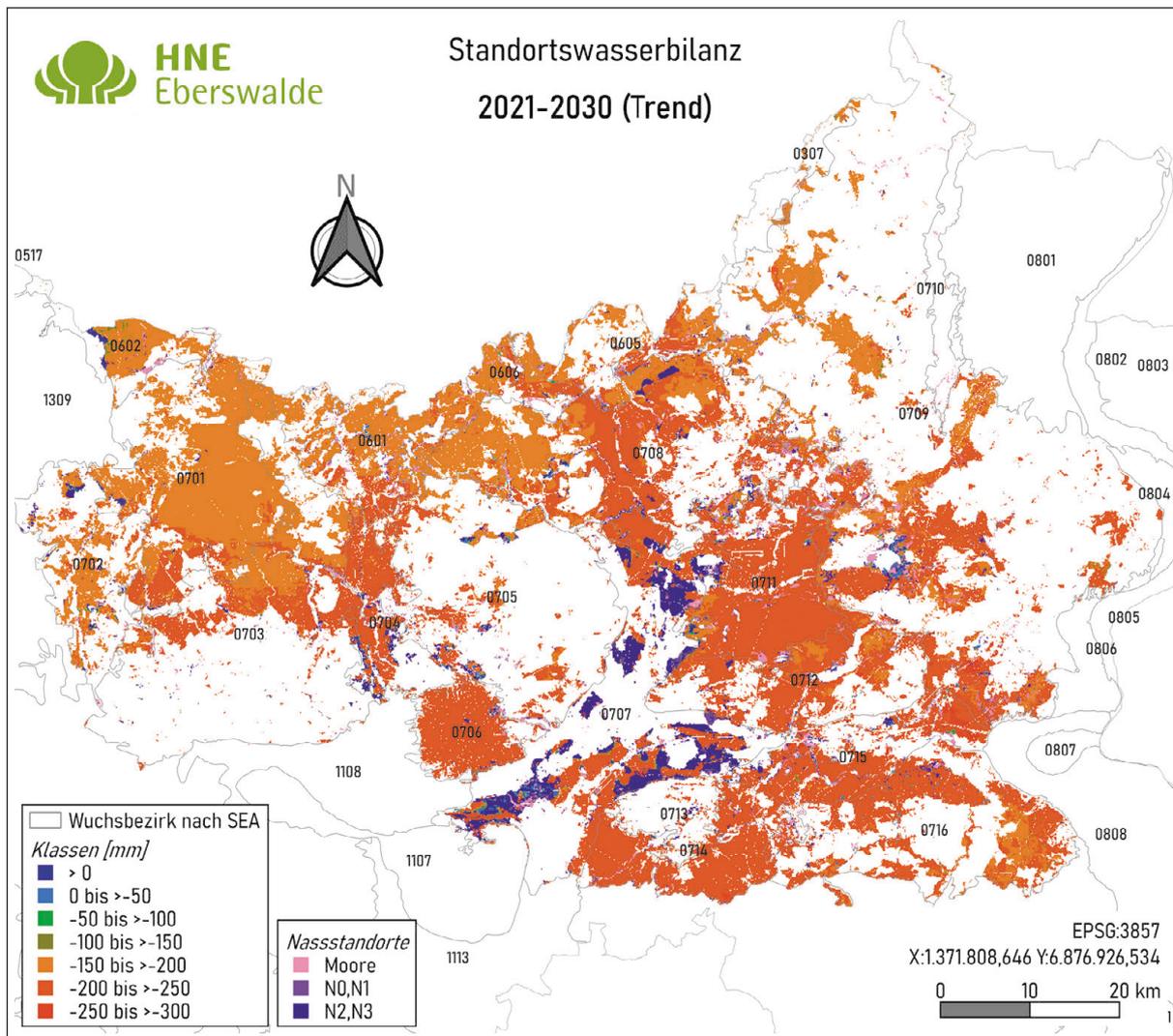


Abb.9: Standortswasserbilanz der Dekade 2021-2030 (Trend aus Regressionsmodell) von terrestrischen Standorten der Wuchsgebiete WG 06 und WG 07 sowie organische und anorganische Nassstandorte

Tab.4: Standortskundliche und forstliche Kennwerte ausgewählter BZE-Flächen mit Buchenbestockung

BZE-Punkt	Wuchsbezirk (Code nach SEA)	Feinbodenform (SEA)	Hangneigung [%]	Hangexposition	Standortgruppe	Humusform	Vegetation	Grundfläche (g) [m ²]	g-Anteil Buche	LAI	Bestandesalter (2020)
120003	Berlin-Fürstenwalder Talsand (1113)	Tuchener Staubsand-Braunerde	1		Z1	Mull	Hainsimsen-Buchenwald	23,6	1	7,1	64
120018	Strausberger Platte (0809)	Leistener Sand-Braunerde	13	SW	M2	mullart. Moder		35,8	1	7,8	89
120049	Angermünder-Strasburger Grund-(Wellen-)moräne (0709)	Pamitzer Bänderstaubsand-Braunerde	12	SO	K2	mullart. Moder	Waldmeister-Buchenwald	21,1	1	7,1	169
120056	Rheinsberg-Mirower Seenmoräne (0601)	Pamitzer Bänderstaubsand-Braunerde	0		K2	mullart. Moder	Hainsimsen-Buchenwald	27,8	1	6,5	114
120084	Strausberger Platte (0809)	Zerwelinseer Tieflehm-Fahlerde	2	O	K2	mullart. Moder	Hainsimsen-Buchenwald	21,4	0,7	5,4	84
120087	Buckower Stobber-Durchbruch (0809)	Hamekoper Bändersand-Braunerde	19	NW	K2	Mull	Forst: Laubholz	13,3	0,6	3,1	79
120187	Rheinsberg-Mirower Seenmoräne (0601)	Leistener Sand-Braunerde	1		M2	mullart. Moder	Forst: Laubholz	24	1	4,8	134

Evapotranspiration deutlich zu. Die in Abb.10 für die Untersuchungspunkte über der Zeit dargestellte Grasreferenzverdunstung zeigt einen mehr oder weniger kontinuierlichen Anstieg, der ab Mitte der 1980er Jah-

re etwas forciert erfolgt. Die ersichtlichen Unterschiede der potenziellen Verdunstung zwischen den einzelnen Flächen ergeben sich aus deren regionaler Lage, sowie aus der Lage im Relief. So weist der in der Märki-

schen Schweiz an einem NW-Hang mit einer Neigung von 19 % gelegene Punkt 120087 (Tab.4) eine deutlich niedrigere Grasreferenzverdunstung auf als die übrigen Punkte. Die an SO- bzw. SW-Hängen gelegenen Punkte 120049 und 120018 indes weisen bei einer Hangneigung von 12 % und 13 % erhöhte Werte der potenziellen Evapotranspiration auf.

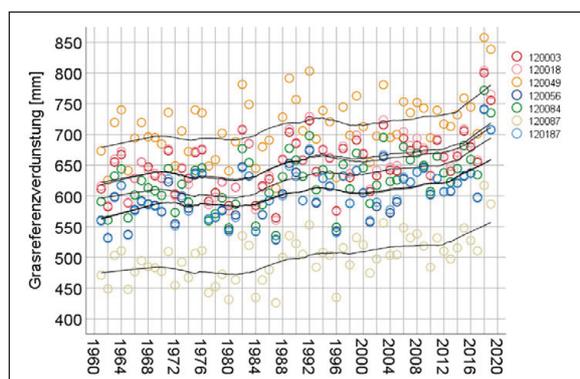


Abb.10: Zeitreihe der Grasreferenzverdunstung im Zeitraum 1961-2019 auf BZE-Flächen mit Buchenbestockung mit geglätteter Ausgleichsfunktion (LOESS-Glättung; JACOBY 2000)

Mit Hilfe der Modellsimulationen wurden die Wasserhaushaltskomponenten reale Evapotranspiration und Versickerung (Abb.11) sowie ausgewählte Wasserstressindizes (Abb.12-13) für die Zeitreihe 1961-2019 berechnet und als Jahressummen bzw. -mittelwerte dargestellt. Die Diagramme veranschaulichen die Abhängigkeit der betrachteten Wasserhaushaltskennwerte vom Verdunstungsanspruch der Atmosphäre (Grasreferenzverdunstung), der sich im Zuge des Klimawandels erhöht. Die Kennwerte des ökosystemaren Wasserhaushalts zeigen einen grundsätzlichen Bezug zur potenziellen Verdunstung als integrierender Klimakenngröße. Deren Wirkung wird flächenindividuell durch die jeweiligen bodenphysikalischen Verhältnisse, die Vegetationsstruktur und das Relief modifiziert. Die reale Verdunstung (Abb.11) steigt dabei zunächst mit der Grasreferenzverdunstung weitgehend linear an. Nimmt letztere durchschnittliche Jahreswerte über ca. 650 mm an, kommt es in zunehmendem Maße zu Wassermangelphasen und die reale Verdunstung erhöht sich nicht mehr weiter. Unter diesen Bedingungen nehmen die Sickerraten im statistischen Mittel ab und liegen schließlich überwiegend unter 50 mm pro Jahr. Höhere Sickerraten werden dabei erwartungsgemäß für die Standorte mit sandigem Ausgangsmaterial wie am BZE-Punkt 120187 ermittelt. Am BZE-Punkt 120087 ist die reale Evapotranspiration am niedrigsten und die Sickerung am höchsten. Dies ist zum einen auf die NW-Hanglage zurückzuführen (s.o.) und zum anderen auf den niedrigen LAI des Bestandes, der durch eine besonders geringe Bestandesdichte bedingt ist. Die höchste Evapotranspiration findet sich an den Standorten 120003 und 120049. Dieses ist das Resultat einer Kombination von hoher Verdunstung durch Standorts- (SO-Hanglage bei 120049) oder Bestandeseigenschaften (hoher LAI bei 12003) bei ausreichender Wasserversorgung.

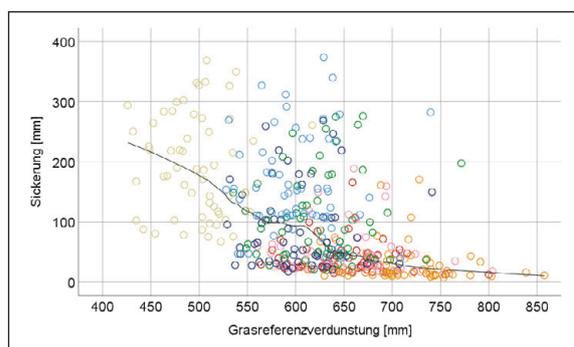
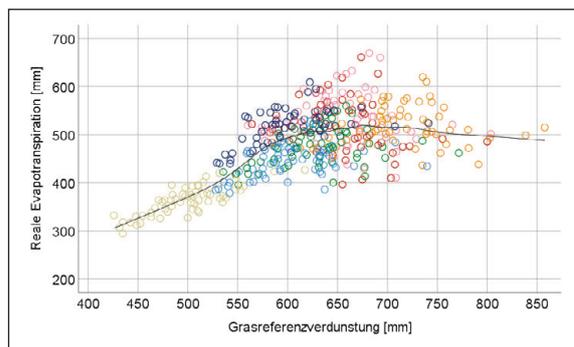


Abb.11: Wasserhaushaltskennwerte (reale Evapotranspiration, Sickerung) von BZE-Flächen mit Buchenbestockung in Abhängigkeit von der Grasreferenzverdunstung mit geglätteter Ausgleichsfunktion (LOESS-Glättung; JACOBY 2000); zugrundeliegender Zeitraum 1961-2019

Die Kennwerte für Wassermangel und Trockenstress zeigen ebenfalls eine grundsätzliche Abhängigkeit vom klimatischen Verdunstungsanspruch. So nimmt der Jahresdurchschnittswert der verfügbaren Bodenwassermenge über die Spanne der Grasreferenzverdunstung kontinuierlich ab (Abb.12). Dieses trifft auch auf die mittlere jährliche relative pflanzenverfügbare Bodenwassermenge zu (REW-Wert nach BRÉDA & GRANIER, 1996). Die Größe des verfügbaren Speichers wird dabei durch die beiden Punkte Feldkapazität und permanenter Welkepunkt der Retentionskurve bestimmt und in Abb.12 pauschal für die Bodentiefe bis 2 m berechnet. Befindet sich der betrachtete Bodenbereich am oder unterhalb des permanenten Welkepunktes, geht man davon aus, dass der Speicher an durch die Wurzeln aufnehmbarem Bodenwasser vollständig entleert ist. REW nimmt dann den Wert „0“ an. Ein vollständig gefüllter Speicher liegt dann vor, wenn sich die Wassergehalte des gesamten Bodenblocks auf dem Niveau der Feldkapazität befinden. Bei hohen Wassergehalten oberhalb der Feldkapazität, welche in gut drainierten terrestrischen Böden aufgrund der hohen hydraulischen Leitfähigkeiten in diesem Bereich in der Regel nur kurzfristig auftreten, wird ein Überlauf des Speichers angenommen. Es zeigt sich, dass der jeweilige Bodenwasserspeicher der Flächen 120087 und 120084 absolut am wenigsten ausgeschöpft wird. Dieses ist darin begründet, dass am BZE-Punkt 120087 die geringsten Verdunstungsverluste auftreten bzw. am Punkt 120084 ein sehr hoher Bodenwasserspeicher zu verzeichnen ist (Tieflehm-Fahlerde).

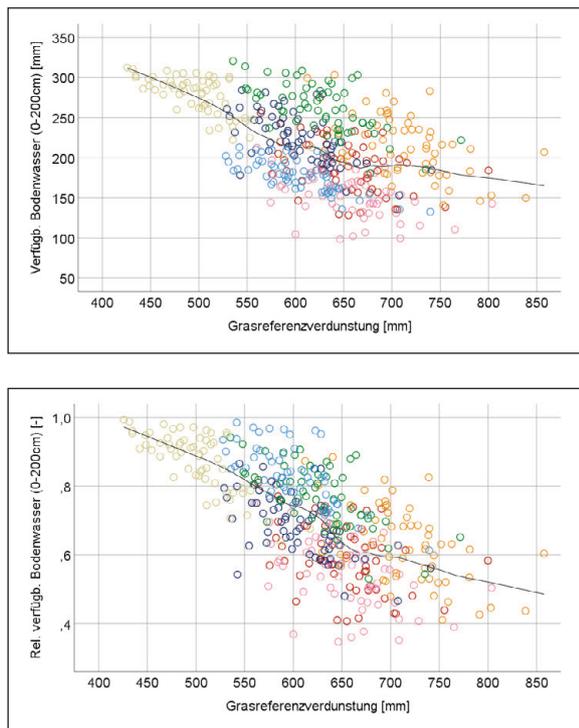


Abb.12: Jahresmittelwerte der pflanzenverfügbaren Bodenwassermenge [mm] sowie relative pflanzenverfügbare Bodenwassermenge (REW) [%] in 0-200 cm Tiefe in Abhängigkeit von der Grasreferenzverdunstung mit geglätteter Ausgleichsfunktion (LOESS-Glättung); zugrundeliegender Zeitraum 1961-2019

Die Abb.13 zeigt die jährliche Anzahl an Trockenstress-tagen in Abhängigkeit von der Grasreferenzverdunstung. Dabei werden Trockenstresstage an der Ausprägung des von LWF-Brook90 generierten „Wassermangelquotienten“ aus realer und potenzieller Transpiration $AT/PT < 0,7$ festgemacht. Wenn dieser Quotient unter 1 fällt, bedeutet dies, dass die Nachlieferung an Wasser aus dem Boden nicht mehr ausreicht, um die Wasserverluste durch die Transpiration auszugleichen. Die Pflanzen sind gezwungen, die Transpiration durch Minderung der stomatären Leitfähigkeit einzuschränken. Dadurch wird auch die Assimilation durch die eingeschränkte Nachlieferung mit Kohlendioxid reduziert. Abb.13 zeigt den Zusammen-

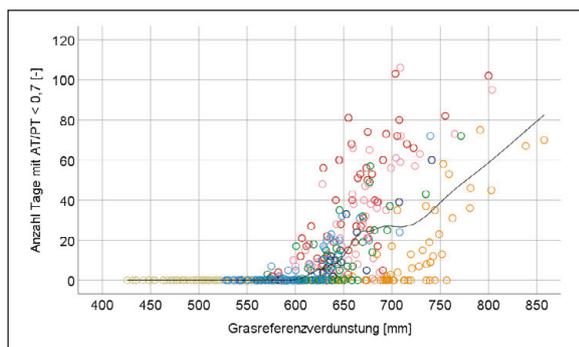


Abb.13: Anzahl der Tage mit $AT/PT < 0,7$ pro Jahr in Abhängigkeit von der Grasreferenzverdunstung mit geglätteter Ausgleichsfunktion (LOESS-Glättung; JACOBY 2000); zugrundeliegender Zeitraum 1961-2019

hang der Anzahl der Trockenstresstage und der Grasreferenzverdunstung (potenzielle Evapotranspiration, PET). Ab einem PET-Wert von ca. 550 mm tritt an einzelnen Standorten Trockenstress auf. Dieser nimmt mit steigender PET weiter zu. Das Ausmaß von Trockenstress wird in den 7 Buchenbeständen durch die jeweiligen Standorts- und Bestandeseigenschaften modifiziert. So tritt an den Standorten 120003, 120018 und 120049 aufgrund der SO- bzw. SW-Hanglage und / oder eines hohen LAI häufiger Trockenstress auf. Angesichts des prognostizierten Temperaturanstiegs und dem damit einhergehenden Anstieg der potenziellen Verdunstung ist zu befürchten, dass der Trockenstress zukünftig zunehmen wird.

3.4 Prognose zur Entwicklung der Rotbuche

Anhand von WettReg-Klimamodellierungen mit dem SRES-Szenario A1B der Dekade 2091-2100 wurden auf der Grundlage des 100x100-m-Punkterasters für die Gesamtwaldfläche Brandenburgs Baumartenempfehlungen erarbeitet (RIEK et al. 2020, RIEK & RUSS 2014, 2019). Den hierbei durchgeführten Wahrscheinlichkeitsrechnungen liegen die empirischen Kenntnisse über die Baumarteneignung in Abhängigkeit von Wasserverfügbarkeit, Wärmehaushalt und Nährstoffversorgung zugrunde. Im Vorfeld erfolgte hierzu durch die Standortserkundung und regionale Forstpraxis exemplarisch für unterschiedliche Standortseinheiten eine Beurteilung von 20 verschiedenen Baumarten bezüglich der Merkmale Leistungsstärke, Konkurrenzfähigkeit, Betriebssicherheit und Bodenpfleglichkeit (methodische Details vgl. RIEK et al. 2020, GRÜLL 2007, 2015). Die daraus resultierenden Einschätzungen wurden durch ein statistisches Modell verallgemeinert, in welchem anschließend die den Wasserhaushalt betreffenden Einflussgrößen durch die szenarischen Klimadaten der Dekade 2091-2100 modifiziert wurden. Mit besonderem Blick auf die Rotbuche ergeben sich die in Tab.5 dargestellten Empfehlungen von Baumartenanteilen an der Bestandeszusammensetzung. Die dargelegten Spannen zwischen minimal und maximal empfohlenen Anteilen orientieren sich an den Medianen bzw. 95%-Perzentilen der mittels Diskriminanzanalyse berechneten Empfehlungswahrscheinlichkeiten und sind auf 5 %-Stufen gerundet. Die aufgelisteten Standortscluster sind in absteigender Reihenfolge der Rotbuchenanteile sortiert, wobei insgesamt nur diejenigen aller bei RIEK et al. (2020) ausgewiesenen Cluster angegeben sind, für die die maximal empfohlenen Rotbuchenanteile mindestens 5 % betragen. Als Standortscluster werden hierbei Zusammenfassungen von Standortsformen bezeichnet, die sich bezüglich der Baumartenanteile nicht signifikant unterscheiden.

In Tab.5 sind neben der Rotbuche auch die empfohlenen Anteilsspannen für weitere standortsheimische Baumarten aufgeführt. Infolge des spezifischen methodischen Ansatzes führen die statistisch hergeleitete Orientierungswerte zu einer relativ gleichmäßigen Berücksichtigung der in Frage kommenden Baumarten, ohne dass die eine oder andere Art eindeutig zur

Tab.5: Statistisch hergeleitete Empfehlungen der Baumartenanteile für Standortscluster nach RIEK et al. (2020); auf 5 % gerundete minimale und maximale Anteile an der Bestandeszusammensetzung für standortsheimische Baumarten in absteigender Reihung der Empfehlung für RBU; Waldflächenkalkulation auf Grundlage des 100x100-m-Stützstellennetzes

Standortscluster	RBU-Anteil [%]	Weitere Baumarten [%-Anteil]	Waldfläche [ha]
R2, R2g	20-30	HBU (20-30), TEI/SEI (25-30), WLI (20-30), EDL (15-30)	4.742
K2 (Klimastufe f)	15-45	GBI (10-15), HBU (20-30), TEI/SEI (20-25), WLI (15-30), EDL (15-25)	4.514
NK3, K1, K2g, NR3, R1, R2g	15-35	HBU (20-35), TEI/SEI (30-40), WLI (20-30), EDL (15-35)	16.050
NR2	10-25	HBU (20-35), RER (10-20), SEI (25-30), WLI (15-25), EDL (15-20)	2.260
K2 (Klimastufe m, t)	10-25	GBI (10-20), HBU (20-35), TEI/SEI (25-35), WLI (20-35), EDL (15-25)	58.908
M2 (Klimastufe f, m)	5-40	GBI (20-30), GKI (25-45), HBU (10-35), TEI/SEI (25-45), WLI (10-20), EDL (5-20)	183.023
M2g	5-30	GBI (20-30), GKI (30-45), HBU (10-30), TEI/SEI (20-45), WLI (10-20), EDL (5-20)	33.558
NM3, M1	5-30	GBI (20-30), GKI (20-30), HBU (15-45), TEI/SEI (20-60), WLI (10-20), EDL (10-20)	30.334
NK2	5-30	GBI (10-15), HBU (15-35), RER (20-25), SEI (25-35), WLI (15-20), EDL (10-30)	6.192
Z2g	5-10	GBI (30-40), GKI (55-60), TEI/SEI (10-45)	57.920
NA3, A1, NZ3, Z1	0-10	GBI (30-45), GKI (50-75), HBU (5-15), TEI/SEI (10-40)	54.474
NM2	0-10	GBI (10-30), GKI (5-10), HBU (10-35), RER (35-45), SEI (10-40), WLI (10-20), EDL (15-20)	7.651
NA2, NZ2	0-10	GBI (35-60), GKI (40-65), HBU (15-55), SEI (10-45)	11.056
NK1	0-5	GBI (10), HBU (15-20), RER (25-45), SEI (20-35), WLI (15-20), EDL (20-30)	3.012

dominierenden Haupt-, Misch- oder Nebenbaumart erklärt wird. Dies erfüllt den Anspruch, durch die Entwicklung von arten- und variantenreichen Mischbestockungen die forstbetrieblichen Risiken im Klimawandel zu reduzieren und den bestehenden Wald „klimaplastischer“ zu gestalten. Die maximal empfohlenen Anteile der Rotbuche liegen nach Tab.5 für alle Standortscluster deutlich unter 50 % und auch andere Baumartenanteile sind nur selten höher. Mit Blick auf die Rotbuche wird davon ausgegangen, dass auch in aktuell naturnahen Reinbeständen durch Artenbeimischung eine höhere „Klimaplastizität“ zu erzielen ist. Dabei wird angenommen, dass sich die Anpassungsfähigkeit der Gesamtsysteme durch Diversifikation erhöht und für struktur- und artenreiche Mischbestände auf Systemebene von einem größeren Potenzial an Reaktionsmöglichkeiten auf Umweltveränderungen auszugehen ist.

Die bisherigen Auswertungen deuten darauf hin, dass der standörtlichen Nährstoffausstattung mit sich verschärfender Wasserhaushaltssituation eine wachsende Bedeutung für die Baumartenwahl zukommen wird. Dies ist damit begründet, dass Nährstoffe grundsätzlich nur mit der wässrigen Bodenlösung von den Pflanzenwurzeln aufgenommen werden können. Demgemäß besteht in Tab.5 insbesondere zwischen den empfohlenen Anteilen der Rotbuche an der Bestandeszusammensetzung und der Nährkraftstufe ein klarer positiver Zusammenhang. Am Beispiel des Wuchsbezirks Tramper Platte (WB 0716) zeigen die

Karten in Abb.14 die empfohlenen minimalen und maximalen Anteile der Baumart Rotbuche für die Punkte des 100x100-m-Netzes, ermittelt anhand deren jeweiliger Standortsformenzuordnung. In diesem exemplarischen Wuchsraum machen K2-Standorte 34 %, M2-Standort 39 % und Z2-Standorte 15 % der Waldfläche aus. Augenfällig ist der Dominanzverlust der Rotbuche selbst auf Standorten, wo sie nach der konventionellen Ausweisung von Bestandeszieltypen bislang eine führende Rolle spielte. Nach den vorliegenden Auswertungen fallen die Anteile der Rotbuche an der Baumartenzusammensetzung beispielsweise auf K2-Standorten ähnlich hoch oder niedriger aus, als die von Hainbuche, Eiche und Winterlinde. Insbesondere die beiden schattenverträglichen Baumarten Hainbuche und Winterlinde könnten auf zahlreichen Standorten die derzeitige Rolle der Rotbuche übernehmen, wenn sich die für Tab.5 zugrunde gelegten Klimabedingungen langfristig einstellen.

Die mit dem Klimaregionalmodell WettReg auf Grundlage des globalen Klimamodells ECHAM5/MPI-OMT63L31 für das SRES-Szenario A1B erzielten Szenarien führen im Vergleich zu Simulationen mit dem RCP-Szenario 8.5 zu geringeren Temperaturzunahmen, aber stärker reduzierten Niederschlägen in der Vegetationszeit. Nach den Modellstudien von Ziche et al. (2021) errechnen sich mit den RCP-Klimaszenarien bei Anwendung verschiedener Modelle sehr unterschiedliche Niederschlagsmengen für Brandenburg, die zum Teil auch höher als gegenwärtig

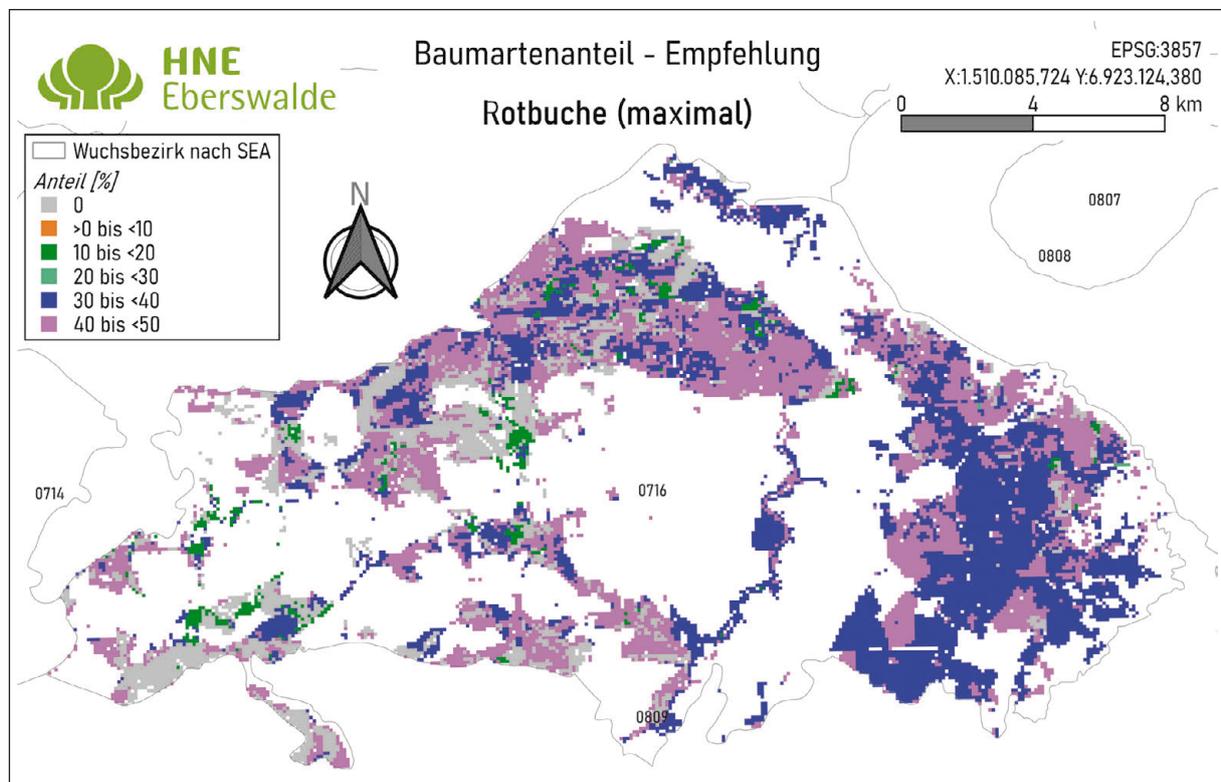
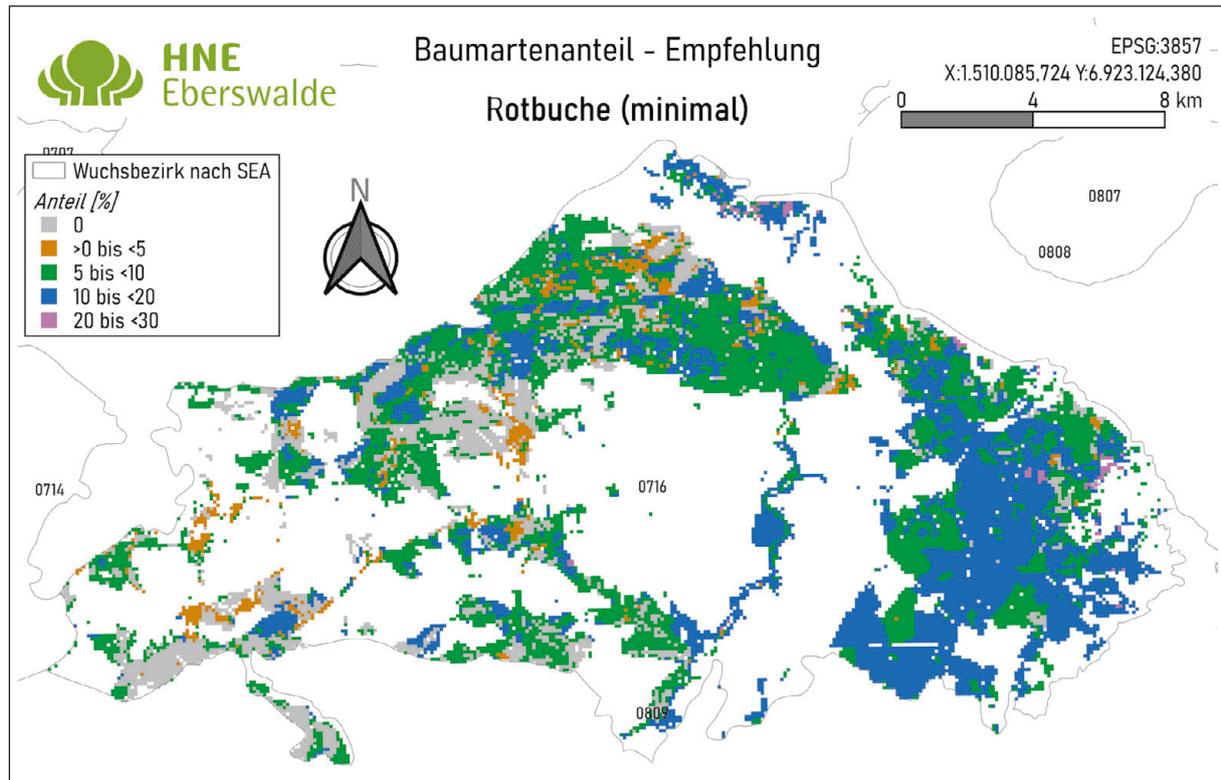


Abb.14: Empfohlene minimale und maximale Anteile der Rotbuche an der Bestandeszusammensetzung am Beispiel des Wuchsbezirks Tramper Platte (WB 0716) für die Klimabedingungen der Dekade 2091-2100 nach WettReg-Modellierung mit SRES-Szenario A1B (nach RIEK et al. 2020)

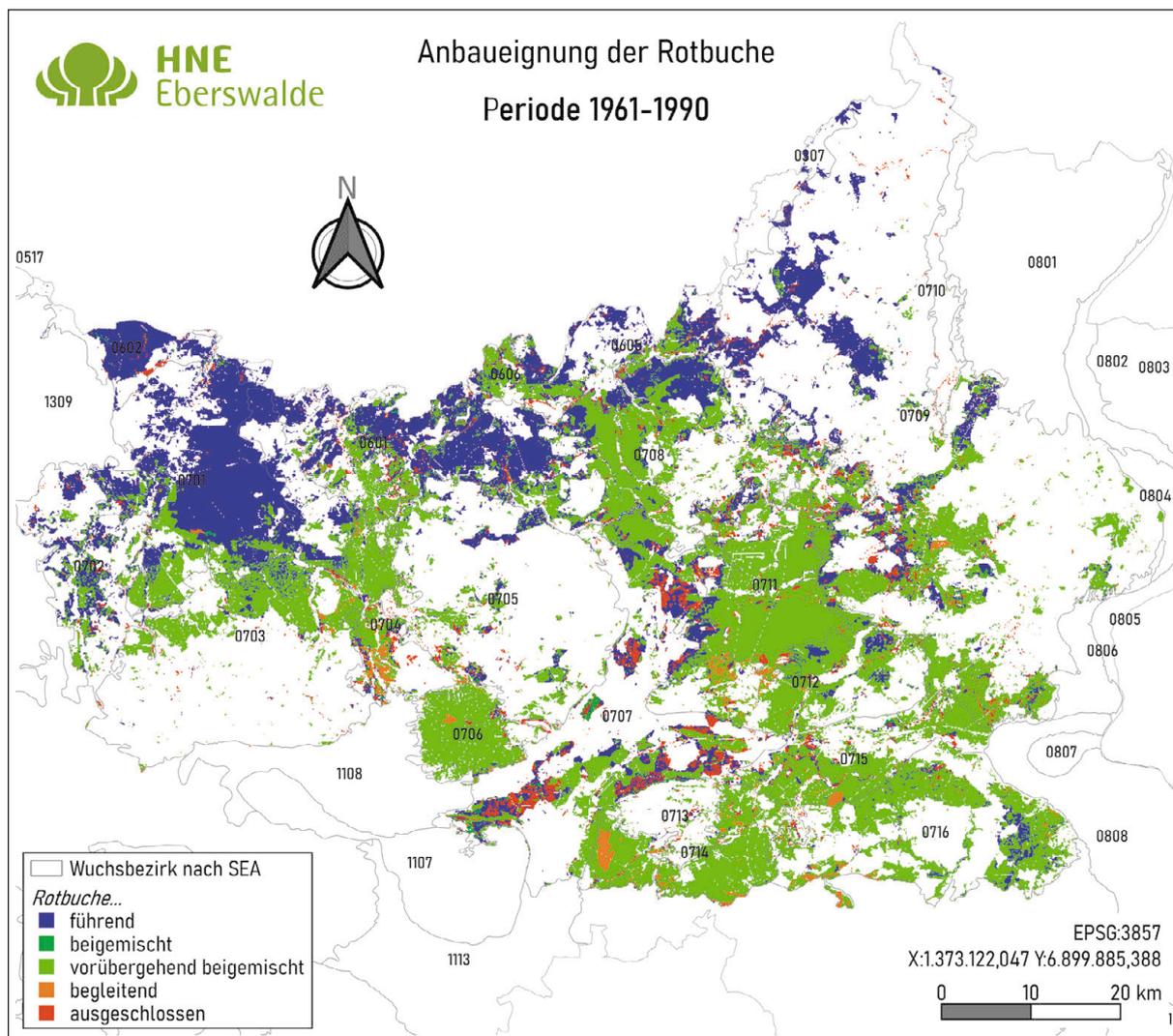


Abb.15: Anbaueignung der Rotbuche nach HAMKENS et al. (2020) auf der Grundlage von Stammnährkraftstufe und Standortswasserbilanz (Median der Klimanormalperiode 1961-1990) in den Wuchsgebieten WG 06 und WG 07

liegen und den zunehmenden Verdunstungsanspruch der Atmosphäre kompensieren könnten. Darin kommen Unsicherheiten bei der Niederschlagssimulation und Einschätzung der zukünftigen Wasserversorgung der Wälder zum Ausdruck, die auch nach ZICHE et al. (2021) die Empfehlung nahelegen, waldbauliche Planungen auf verschiedene artenreiche Waldtypen zu stützen, um mögliche Risiken zu minimieren.

Eindrucksvoll zeigen sich die waldbaulichen Konsequenzen des aktuellen Standortwandels anhand der von HAMKENS et al. (2020) für das Land Sachsen-Anhalt als Entscheidungshilfe zur Baumartenwahl entwickelten Zuordnungsmatrix der Baumarten zu Nährkraftstufe und Standortswasserbilanz (SWB) entsprechend ihrer jeweiligen ökologischen Standortansprüche. Wendet man die von HAMKENS et al. (2020) vorgeschlagenen Schwellenwerte der SWB für die Trockenstressgefährdung der Rotbuche exemplarisch auf die Region der Wuchsgebiete WG 06 und WG 07 im Norden Brandenburgs an, so verändert sich entsprechend des klimatischen Wandels im Zeitraum der letzten beiden Kli-

manormalperioden (Abschnitt 3.2, Abb.7-9) auch die Einordnung der Rotbuche hinsichtlich ihrer Stellung in Mischbeständen (Abb.15-17). Unter Verwendung der SWB der Periode 1961-1990 wird die Rotbuche in den nördlichen Wuchsbezirken nahezu flächendeckend noch als führende Baumart ausgewiesen (Abb.15). Legt man der Einschätzung die SWB der Periode 1991-2020 zugrunde, so lautet die Einschätzung für Rotbuche überwiegend „vorübergehend beigemischt“. Bei dieser Potenzialabschätzung wird davon ausgegangen, dass sich die Wasserversorgung durch den Klimawandel so verschlechtern wird, dass die aktuell vorhandene Naturverjüngung nur „vorübergehend“ sein wird. In den südlichen Wuchsbezirken wird die Rotbuche in beiden Klimanormalperioden lokal führend, größtenteils aber ebenfalls als „vorübergehend beigemischt“ eingestuft. Dieses ändert sich drastisch bei Verwendung der regressionsanalytisch für die Dekade 2021-2030 extrapolierten SWB (Abb.17). Hier tritt die Rotbuche im südlichen Teil der beiden Wuchsgebiete größtenteils nur noch begleitend auf, das heißt als natürlich ankommende Nebenbaumart in ihrem

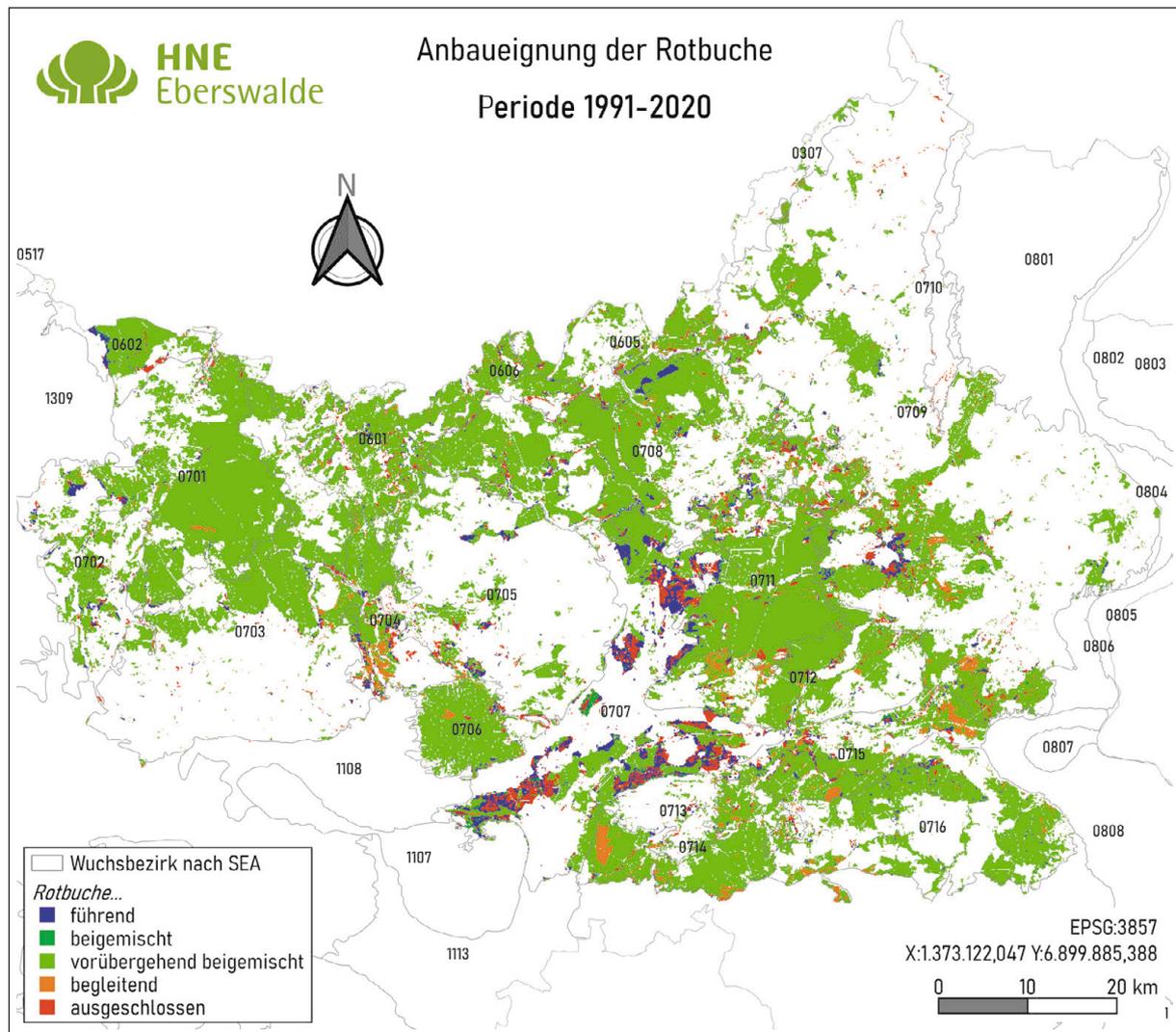


Abb.16: Anbaueignung der Rotbuche nach HAMKENS et al. (2020) auf der Grundlage von Stammnährkraftstufe und Standortswasserbilanz (Median der Klimanormalperiode 1991-2020) in den Wuchsgebieten WG 06 und WG 07

standörtlichen Grenzbereich. Lokal nehmen die Flächenanteile, auf denen sie vom Anbau ausgeschlossen wird, zu. Auch in den nördlichen Wuchsbezirken kommt man bei Verwendung dieser prognostischen Klimadaten für die aktuelle Dekade lediglich zu der Einstufung „vorübergehend beigemischt“.

4 Diskussion und Folgerungen

Die im vorliegenden Beitrag zusammengeführten Auswertungen kommen sowohl auf der Grundlage von statistischen Klimatrends über einen Zeitraum von 60 Jahren als auch anhand szenarischer Daten aus Klimaprojektionen hinsichtlich der zu erwartenden Veränderungen des Bodenwasserhaushalts im Grundsatz zu vergleichbaren Ergebnissen. Wenn sich die für die Zukunft aufgezeigte Entwicklung der Wasserversorgung erfüllt, dürfte die Bedeutung der Rotbuche in den natürlichen Waldgesellschaften weiter Bereiche Brandenburgs deutlich abnehmen. Dabei wird unterstellt, dass wir mit unserer bisherigen Einschätzung zur Trockenheitsempfindlichkeit der Rotbuche – wie

sie beispielsweise in die standortsbezogene Ableitung von Bestandeszieltypen nach MLUV (2006) einfließt – weitgehend richtigliegen. Die realisierten statistischen Ansätze (Abschnitt 3.4) beruhen auf empirischen Zuordnungen von Standort und Baumarteneignung, modifiziert durch Wasserhaushaltsbedingungen, die sich gemäß unserer szenarischen bzw. extrapolierten klimatischen Steuergrößen einstellen werden. Zu beachten ist, dass durch diesen Ansatz nicht die ökologischen Standortsgrenzen der Rotbuche aufgezeigt werden sollen, sondern aufgrund der methodischen Orientierung am Bestandeszieltyp vor allem das leistungsorientierte Standortsspektrum im Fokus steht.

Zahlreiche Publikationen verweisen auf das hohe Anpassungspotenzial der Rotbuche an zunehmende Trockenheit und die große Bedeutung der genetischen Unterschiede bei der Bewertung ihrer Resilienz (BOLTE 2016, CZAİKOWSKI & BOLTE 2006, KÖLLING et al. 2005, MANTHEY et al. 2007, MERGNER et al. 2020, PLUESS & WEBER 2012). EICHHORN et al. (2008) schließen aus Untersuchungen von Reaktionsmustern der Buche nach

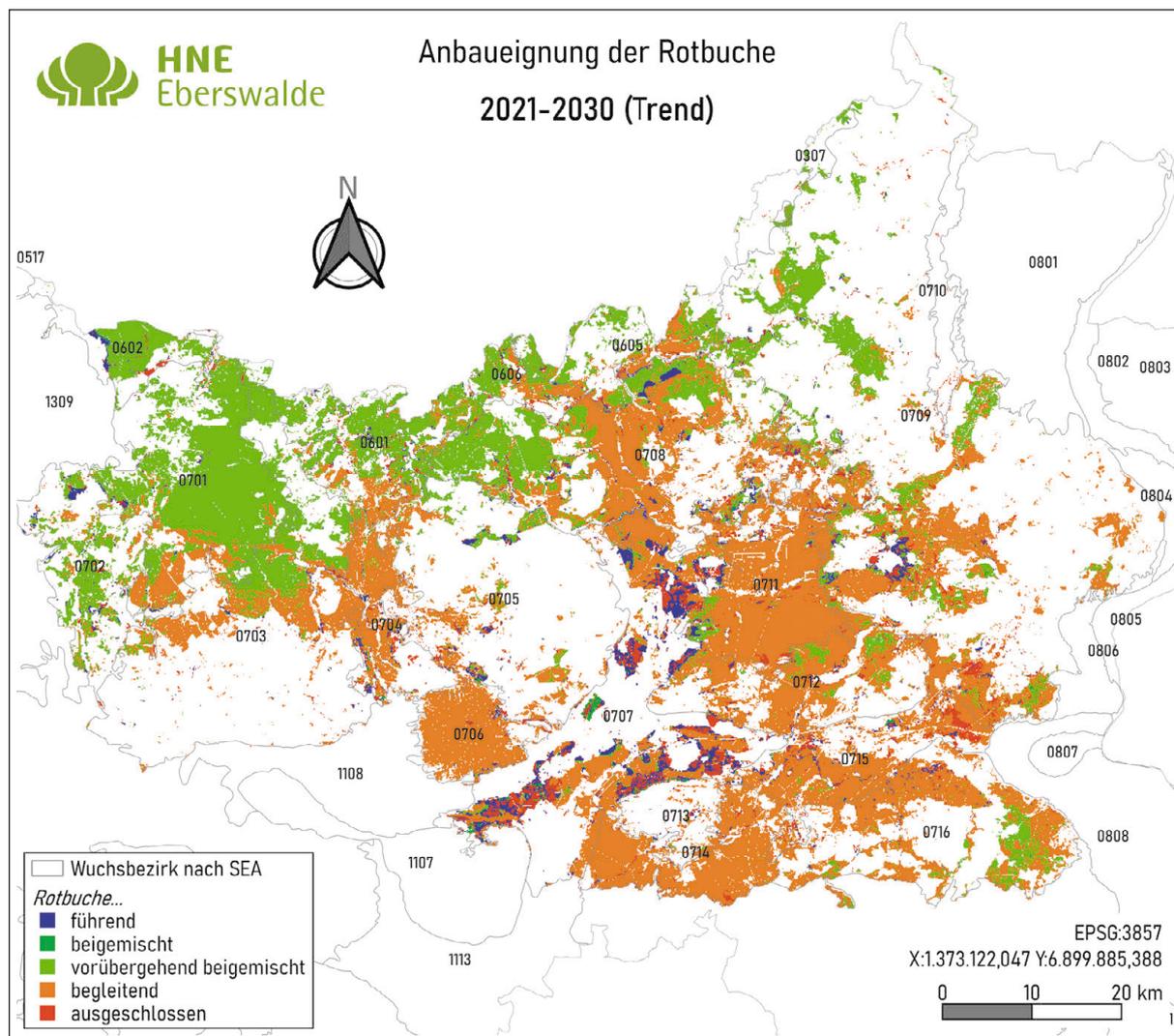


Abb.17: Anbaueignung der Rotbuche nach HAMKENS et al. (2020) auf der Grundlage von Stammnährkraftstufe und Standortswasserbilanz (Dekade 2021-2030 gemäß Trendberechnung nach Regressionsmodell; Abschnitt 3.1) in den Wuchsgebieten WG 06 und WG 07

dem Trockenjahr 2003 auf eine hohe Stresstoleranz und verweisen auf die im Vergleich zu anderen Hauptbaumarten niedrigste Absterberate nach dem Extremjahr. Gleichwohl zeigen die Autoren, dass der Biomassezuwachs für Derbholz und Äste im Jahr 2004 um ca. 50 % reduziert und die Entwicklung der Höhentriebe über mehrere Jahre eingeschränkt war; sie betonen, mit der Reduktion der Höhen- und der Durchmesserleistung gehe eine forstbetrieblich relevante Verringerung des Holzertrages einher. Eine im Vergleich zu Nadelbaumarten stärkere Reduktion des Wachstums und langsamere Regeneration bei der Rotbuche nach dem Trockenjahr 2003 beobachteten auch Granier et al. 2007 an *Carboeurope*-Standorten. Umfassende Untersuchungen von MUFFLER et al. (2021) zur Regeneration der Rotbuche bis in die Grenzbereiche ihres Verbreitungsgebietes in Europa verweisen auf eine hohe Plastizität der Rotbuche im Keimlingsstadium und ein großes Vermögen zur kurzfristigen Klimaanpassung. Die Autoren sehen aufgrund der geringen Überlebensrate bei der Etablierung der Jungpflanzen aber auch Grenzen dieses Anpassungspotenzials und

nehmen an, dass die natürliche Regenerationsfähigkeit unter zukünftig trocken-heißen Klimabedingungen vermutlich eingeschränkt sein wird. Im globalen Vergleich umfasst die Verbreitung der europäischen Buche bereits jetzt die trockensten Standorte (FANG & LECHOWICZ 2006). Generell erachten es die meisten Autoren als offen, inwieweit eine unmittelbare Abfolge von mehreren Trockenjahren an die Grenzen der Anpassungsfähigkeit der Rotbuche führen wird.

Die Auswertungen im vorliegenden Beitrag machen es wahrscheinlich, dass sich in absehbarer Zukunft auf bislang als natürliche Buchenstandorte eingestufteten Flächen Intermediärtypen natürlicher Mischwaldgesellschaften (z. B. Hainbuche-Rotbuche-Traubeneiche) entwickeln werden. Diese Annahme wird durch vergleichende Jahrringanalysen von Eiche, Kiefer, Rotbuche und Hainbuche von SCHARNWEBER et al. (2020) und HARVEY et al. (2019) im Ostseeraum gestützt. Deren Studien legen unter Einbeziehung der Extremjahre 2018 und 2019 dar, dass die sommerliche Wasserverfügbarkeit in Zukunft zunehmend die Domi-

nanz der genannten Baumarten im Untersuchungsraum bestimmen wird. Dabei zeichnet sich die Rotbuche entgegen anderer Studien durch vergleichsweise geringe Trockenresistenz und langsame Regeneration nach dürrebedingten Zuwachseinbrüchen aus. Die Autoren nehmen an, dass die Wachstumsraten der Buche bei weiterer Erwärmung erheblich sinken werden und erwarten, dass sich die Vitalität und damit die Durchsetzungsfähigkeit der Eiche gegenüber der Buche erhöhen wird. Simulationen der Jahrringentwicklung für Klimaszenarien von BAUWE et al. (2015) zeigen auch an Standorten im nordostdeutschen Tiefland einen im Vergleich zu Kiefernbeständen stärkeren Rückgang des Wachstums durch Wassermangel bei den Buchenstandorten.

Die höhere Trockenresistenz der Eiche gegenüber der Buche in Eichen-Buchen-Mischbeständen wird durch Jahrringuntersuchungen von VANHELLEMONT et al. (2019) bestätigt sowie von CAVIN et al. (2013), die anhand der Auswertung von Zuwachs- und Mortalitätsdaten langfristige Abundanzverschiebungen zwischen den beiden Baumarten durch Wasserkonkurrenz zum Nachteil der Rotbuche beschreiben. Signale in diese Richtung kommen aus den jüngsten brandenburgischen Waldzustandsberichten, wonach in Folge des Extremtrockenjahres 2018 dramatische Vitalitätseinbußen der Rotbuche zu verzeichnen sind (MLUK 2020). Die Buche reagierte auf den Wassermangel im Vergleich zu anderen Baumarten besonders stark mit erhöhten Blattverlusten und ausgeprägten Sekundärschäden durch Käferbefall und pilzliche Schadorganismen. Die auf Einzelbaumebene konstatierten Vitalitätsverluste könnten mithin als Hinweise auf beginnende Verdrängungsprozesse und einen möglichen Wandel in aktuell noch von Buche dominierten Misch- und Reinbeständen gedeutet werden.

Für die Prognose zur Entwicklung der Rotbuche im Klimawandel sollte der Fokus zukünftig neben der Modellierung einzelner Arten und deren standortsspezifischen Verbreitung verstärkt auch auf der Modellierung der Verbreitung von Waldgesellschaften gelegt werden (vgl. FISCHER et al. 2019). Der Vorteil dieses Vorgehens besteht darin, dass die Waldgesellschaften eine engere ökologische Amplitude aufweisen als die sie konstituierenden einzelnen Baumarten. Gerade für die Rotbuche ist bekannt, dass sie sowohl hinsichtlich der standörtlichen Nährkraft als auch in Bezug auf den Wasserhaushalt eine große Bandbreite abdeckt; allerdings unterscheiden sich die verschiedenen Buchen-Waldgesellschaften in den Teilarealen des Standortsspektrums hinsichtlich ihrer Artenzusammensetzungen erheblich und werden entsprechend unterschiedlich vom Klimawandel betroffen sein. Die Artenzusammensetzung der Waldgesellschaften ist der Dreh- und Angelpunkt bei der Klimaanpassung und die zentrale waldbauliche Herausforderung für den Erhalt und die nachhaltige Entwicklung der Wälder. Mit Blick auf die Risikostreuung durch Vielfalt sollte auch in aktuell naturnahen Reinbeständen eine höhere Klimaplastizität durch Artenbeimischung gefördert und entwickelt werden. Eine hohe Artendiversität ist an-

zustreben, weil sie eine größere Ökosystemelastizität beim Ausgleich von Störungen induziert. Besonders vor dem Hintergrund der bestehenden Unsicherheiten bei Klimaprojektionen und statistischen Klimatrends sollte daher der Fokus beim Waldumbau auf die Erhöhung des Anteils an arten- und variantenreichen Mischbestandstypen gelegt werden.

Da die bestehenden natürlichen Buchenwaldgesellschaften durch den Klimawandel zunehmend unter Druck geraten werden, ist hier eine besonders zurückhaltende und extensive Bewirtschaftung angezeigt. Dem Bodenschutz und der stofflichen Nachhaltigkeit ist besondere Beachtung zu schenken; d. h. Befahrungsschäden bei der Holzurückung sind absolut zu vermeiden und Nährstoffentzüge durch die Holzernte auf ein standortsverträgliches Minimum zu beschränken. Die Rolle der Böden und speziell deren Speicherkapazität für das Wasser aus dem Winterniederschlag wird im Klimawandel an Bedeutung gewinnen – sowohl für die Wasser- als auch für die Nährstoffversorgung der Waldbäume. Letztere ist an die Wasserverfügbarkeit im Wurzelraum geknüpft, da die für das Pflanzenwachstum essentiellen Nährelemente fast ausschließlich über die Bodenlösung aufgenommen werden. Die nutzbare Wasserspeicherkapazität wird in Zukunft nicht nur über die Wuchsleistung (z. B. PIEDALLU et al. 2011), sondern auch über Vitalität und Überlebensfähigkeit der Rotbuchenbestände als solche entscheiden. Sie hängt wiederum eng mit einem intakten Kohlenstoffhaushalt zusammen und wird durch Humusakkumulation besonders begünstigt. Der Schutz der Waldböden und deren Funktionen im Naturhaushalt stellen für den möglichen Erhalt der wertvollen Buchenwaldgesellschaften in Brandenburg wahrscheinlich die wesentlichste aller waldbaulichen Forderungen vor dem Hintergrund des voranschreitenden anthropogen verursachten Klimawandels dar.

5 Zusammenfassung

Der Vergleich der beiden jüngsten Klimanormalperioden (1961-1990, 1991-2020) dokumentiert für die brandenburgische Waldfläche eine deutliche Zunahme der sommerlichen Trockenheit. Besonders sind hiervon die für die Rotbuche bislang als am geeignetsten eingestufteten Wuchsgebiete im Norden Brandenburgs betroffen. Für typische Buchenstandorte der Standortsgruppe K2 (grundwasserfern, nährstoffkräftig) wird dargestellt, dass das Wasserdefizit der nördlichen Wuchsregion aktuell größer ist, als zu Beginn der Zeitreihe in den trockensten Bereichen im Zentrum Brandenburgs. Trendanalysen und Wasserhaushaltsmodellierungen von Buchenflächen machen wahrscheinlich, dass angesichts des prognostizierten Temperaturanstiegs und damit einhergehenden Anstiegs der potenziellen Verdunstung auch weiterhin von einer Zunahme der Trockenstresshäufigkeit auszugehen ist. Statistisch abgeleitete Baumartenempfehlungen auf standörtlicher Grundlage zeigen, dass die Rotbuche infolge der sich verschlechternden Wasserhaushaltsbedingungen zukünftig nur noch eine geringe Bedeutung als potenziell führende Baumart haben wird und trockenheits-

resistentere Baumarten an ihre Stelle treten werden. Aus forstökologischer und wirtschaftlicher Sicht sollte das zentrale waldbauliche Ziel daher die rasche und planvolle Entwicklung von arten- und variantenreichen Mischbestockungen sein, um den bestehenden Wald klimaplastischer zu gestalten und forstbetriebliche Risiken zu minimieren. In den bestehenden natürlichen Waldgesellschaften mit Buchendominanz sind der Schutz der Bodenfunktionen und die Sicherung der stofflichen Nachhaltigkeit bei der Holznutzung, bis hin zum Nutzungsverzicht, zentrale Ansatzpunkte für den möglichen Erhalt dieser wertvollen Bestände.

6 Literatur

- ADAMS, W.A. (1973): The effect of organic matter on the bulk and true densities of some uncultivated podzolic soils. *Journal of Soil Science* 24 (1): 10–17. URL <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2389.1973.tb00737.x>.
- ALLEN, R. G., PEREIRA, L. S., RAES, D., SMITH, M., et al. (1998): Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrig. Drain. Pap. 56, D05109. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1973.tb00737.x>
- BOLTE, A. (2016): Chancen und Risiken der Buche im Klimawandel. *AFZ/DerWald* 12. 17-19.
- BAUWE, A.; JURASINSKI, G.; SCHARNWEBER, T.; SCHRÖDER, C. & LENNARTZ, B. (2015): Impact of climate change on tree-ring growth of Scots pine, common beech and pedunculate oak in northeastern Germany. *iForest - Biogeosciences and Forestry* 9, 1-11.
- BRÉDA, N.; GRANIER, A. (1996): Intra- and interannual variations of transpiration, leaf area index and radial growth of a sessile oak stand (*Quercus petraea*). *Ann. For. Sci.* 53 (2-3): 521–536. URL <http://dx.doi.org/10.1051/forest:19960232>.
- BREIMAN, L., FRIEDMAN, J.H., OLSHEN, R.A., STONE, C.J. (1984): *Classification and regression trees*. The Wadsworth Statistics/Probability Series, Wadsworth, Belmont, California, 358 S.
- CAVIN, L., MOUNTFORD, E. P., PETERKEN, G. F., JUMP, A. S. (2013): Extreme drought alters competitive dominance within and between tree species in a mixed forest stand. *Functional Ecology*. Vol. 27. Issue 6. 1424-1435. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.12126>.
- CLIMATE DATA CENTER (CDC) (2018): Historical daily station observations (temperature, pressure, precipitation, sunshine duration, etc.) for Germany, version v006.
- CZAIKOWSKI, T, BOLTE, A. (2006): Unterschiedliche Reaktion deutscher und polnischer Herkunft der Buche (*Fagus sylvatica* L.) auf Trockenheit. *Allg. Forst- u. J.-Ztg.*, 177, Jg. 2. 30-40.
- DEUTSCHER WETTERDIENST (2019): Klimastationsdaten des Climate Data Center (CDC). Available online: ftp://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/observations_germany/climate/daily/ (Zugriff am 30.09.2020).
- 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*. Beiträge aus der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt. Band 3. NW-FVA (Hrsg.). 109-134.
- FANG, J. & LECHOWICZ, M. J. (2006): Climatic limits for the present distribution of beech (*Fagus L.*) species in the world. *Journal of Biogeography* 33, 1804-1819.
- FEDERER, C.A. (2002): BROOK 90: A Simulation Model for Evaporation, Soil Water, and Streamflow. Available online: <http://www.ecoshift.net/brook/brook90.htm> (accessed on 31 July 2020).
- FISCHER, H.S., MICHLER, B., FISCHER, A. (2019). High resolution predictive modelling of potential natural vegetation under recent site conditions and future climate scenarios: Case study Bavaria. *Tuexenia* 39: 9–40.
- GALE, M.R., GRIGAL, D.F. (1987): Vertical root distributions of northern tree species in relation to successional status. *Can. J. For. Res.* 17: 829–834.
- GRANIER, A.; REICHSTEIN, M.; BRÉDA, N.; JANSSENS, I.; FALGE, E.; CIAIS, P.; GRÜNWARD, T.; AUBINET, M.; BERBIGIER, P.; BERNHOFER, C.; BUCHMANN, N.; FACINI, O.; GRASSI, G.; HEINESCH, B.; ILVESNIEMI, H.; KERONEN, P.; KNOHL, A.; KÖSTNER, B.; LAGERGREN, F.; LINDROTH, A.; LONGDOZ, B.; LOUSTAU, D.; MATEUS, J.; MONTAGNANI, L.; NYS, C.; MOORS, E.; PAPALE, D.; PEIFFER, M.; PILEGAARD, K.; PITA, G.; PUMPANEN, J.; RAMBAL, S.; REBMAN, C.; RODRIGUES, A.; SEUFERT, G.; TENHUNEN, J.; VESALA, T. & WANG, Q. (2007): Evidence for soil water control on carbon and water dynamics in European forests during the extremely dry year: 2003. *Agricultural and Forest Meteorology* 143, 123 – 145.
- GRIER, C. G., RUNNING, S. W. (1977): Leaf Area of Mature Northwestern Coniferous Forests: Relation to Site Water Balance. *Ecology* 58 (4): 893-899).
- GRÜLL, M. (2007): *Modifizierte Standorts- und Baumarteneignungsbewertung im Rahmen der Forsteinrichtung im AfF Eberswalde*. Vortrag Standortserkundertagung. Peitz. (unveröffentlicht).
- GRÜLL, M. (2015): *Ableitung von klimawandelangepassten Waldentwicklungstypen für Waldstandorte im Nordostdeutschen Tiefland auf Grundlage einer modifizierten Standorts- und Baumarteneignungsbewertung*. Fachtagung Waldmanagement im Klimastress 2.0. Eberswalde. (unveröffentlicht)
- HAMKENS, H., SPELLMANN, H., NAGEL, R.-V., BURESCH, M. (2020): *Entscheidungshilfen zur klimawandelangepassten Baumartenwahl im Land Sachsen-Anhalt*. Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft und Energie des

Landes Sachsen-Anhalt, Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (Hrsg.). 69 S.

HAMMEL, K., KENNEL, M. (2001): Charakterisierung und Analyse der Wasserverfügbarkeit und des Wasserhaushalts von Waldstandorten in Bayern mit dem Simulationsmodell Brook90. Forstliche Forschungsberichte München 185, Heinrich Frank, München, 135 S.

HANNAPPEL, S., RIEK, W. (2011): Berechnung des Flußabstandes des oberflächennahen Grundwassers der Waldfläche Brandenburgs für hydrologisch typische Zeiträume. Hydrologie und Wasserwirtschaft. 55. Heft 1. S. 4-15.

HARVEY, JILL E.; SMILJANIĆ, MARKO; SCHARNWEBER, TOBIAS; BURAS, ALLAN; CEDRO, ANNA; CRUZ-GARCÍA, ROBERTO et al. (2019): Tree growth influenced by warming winter climate and summer moisture availability in northern temperate forests. In: Global change biology. DOI: 10.1111/gcb.14966

JACKSON, R.B., CANADELL, J., EHLERINGER, J.R., MOONEY, H.A., SALA, O.E., SCHULZE, E.D. (1996): A global analysis of root distributions for terrestrial biomes. *Oecologia* 108: 389-411.

JACOBY, W. (2000): Loess: a nonparametric, graphical tool for depicting relationships between variables. *Electoral Studies* 19: 577-613.

KLEYER, M., BEKKER, R.M., KNEVEL, I.C., BAKKER, J.P., THOMPSON, K., et al. (2008). The LEDA Traitbase: A database of life-history traits of Northwest European flora. *Journal of Ecology* 96: 1266-1274.

KÖLLING, C., WALENTOWSKI, H., BOCHERT, H. (2005): Eine Waldbaumart mit grandioser Vergangenheit und sicherer Zukunft / Die Buche in Mitteleuropa. *AFZ-Der Wald*, 13. 696-701.

KREIENKAMP, F., SPEKAT, A. (2009): Regionalisierung standortsbezogener Kennwerte (1 x 1 km Raster-Interpolation) für Brandenburg. CEC, Potsdam GmbH. Unveröffentlichter Bericht im Auftrag des Landesbetriebs Forst Brandenburg. Potsdam: 30 S.

MENZEL, A., FABIAN P. (1999). Growing season extended in Europe. *Nature*, 397, 659-659.

MANTHEY, M., LEUSCHNER, C., HÄRDLE, W. (2007): Buchenwälder und Klimawandel. *Natur und Landschaft*. 85. H.9/10. 441-445.

MERGNER, U., MANTHEY, M., SCHARNWEBER, T., KRAUS, D. (2020): Kronenverlichtung und Absterbevorgänge bei der Buche. *AFZ/DerWald* 7. 16-19.

MLUK, 2020. Waldzustandsbericht 2020 des Landes Brandenburg. Ministerium für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Klimaschutz des Landes Brandenburg (MLUK), Landeskompetenzzentrum Forst Eberswalde (LFE), Eberswalde. 38 S.

MLUV (2006): Bestandeszieltypen für die Wälder des Landes Brandenburg. Ministerium für ländliche Entwicklung, Umwelt und Verbraucherschutz des Landes Brandenburg (Hrsg.).

MUFFLER, L., SCHMEDDES, J., WEIGEL, R., BARBETA, A., BEIL, I., BOLTE, A., BUHK, C., HOLM, S., KLEIN, G., KLISZ, M., LÖF, M., PEÑUELAS, J., SCHNEIDER, L., VITASSE, Y., KREYLING, J. (2021): High plasticity in germination and establishment success in the dominant forest tree *Fagus sylvatica* across Europe. *Global Ecology and Biogeography*. 1-14. <https://doi.org/10.1111/geb.13320>

NAGEL J. (2007). *ForestTools2: Forstliche Software-Sammlung*. Selbstverlag J. Nagel.

PIEDALLU, C.; GEGOUT, J.-C.; BRUAND, A. & SEYNAVE, I. (2011): Mapping soil water holding capacity over large areas to predict potential production of forest stands. *Geoderma* 160, 355-366.

PLUESS, A. R. & WEBER, P. (2012): Drought-Adaptation Potential in *Fagus sylvatica*: Linking Moisture Availability with Genetic Diversity and Dendrochronology. *PLoS ONE* 7(3): e33636. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0033636>

RENGER, M., BOHNE, K., FACKLAM, M., HARRACH, T., RIEK, W., SCHÄFER, W., WESSOLEK, G., ZACHARIAS, S. (2009): Ergebnisse und Vorschläge der DBG-Arbeitsgruppe „Kennwerte des Bodengefüges“ zur Schätzung bodenphysikalischer Kennwerte. In: *Bodenphysikalische Kennwerte und Berechnungsverfahren für die Praxis: Bodenökologie und Bodengenese: Bd. 40*. Technische Universität Berlin: 5-51.

RENGER, M., STREBEL, O. (1980): Beregnungsbedarf landwirtschaftlicher Kulturen in Abhängigkeit vom Boden. *Wasser und Boden* 32 (12): 572-575.

RICHTER, D. (1985): Methodik zur Korrektur von Niederschlagshöhen. In: *Arbeitsmappe Gutachtenerteilung des MD d. DDR, Teil III -23 Hauptamt f. Klimatologie, Potsdam*.

RIEK, W. (1998): Verfahren zur Bestimmung des effektiv nutzbaren Bodenwassers von Kiefernstandorten im pleistozänen Tiefland. *Beitr. Forstwirtsch. u. Landsch. ökol.* 32 (1): 28-33.

RIEK, W., KALLWEIT, R., RUSS, A. (2013): Analyse der Hauptkomponenten des Wärmehaushalts brandenburgischer Wälder auf der Grundlage von regionalen Klimaszenarien. – Abgrenzung von Risikogebieten und Schlussfolgerungen für ein Klima-Monitoring. *Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz*. Heft 13. 17-32.

RIEK, W., RUSS, A. (2014): Regionalisierung des Bodenwasserhaushaltes für Klimaszenarien als Grundlage für die forstliche Planung. In: *Wissenstransfer in die Praxis - Beiträge zum 9. Winterkolloquium*. Eberswalder Forstliche Schriftenreihe, Bd. 55. Landesbetrieb

- Forst Brandenburg, Landeskompetenzzentrum Forst Eberswalde (Hrsg), Eberswalde. 20-30. <http://forst.brandenburg.de/cms/media.php/lbm1.a.4595.de/efs55.pdf>
- RIEK, W., RUSS, A. (2016): Regionalisierung: Ableitung von Flächenaussagen aus Fallstudien und BZE. In: 30 Jahre forstliches Umweltmonitoring in Brandenburg. Ministerium für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Landwirtschaft des Landes Brandenburg (Hrsg.). Eberswalder Forstliche Schriftenreihe, Bd. 63. 192-206.
- RIEK, W., RUSS, A. (2019): Waldbodenbericht Brandenburg. Weitere Ergebnisse der landesweiten Bodenzustandserhebungen und Folgerungen für die nachhaltige Waldnutzung. Band 2. Eberswalder Forstliche Schriftenreihe Bd. 68. Landesbetrieb Forst Brandenburg, Landeskompetenzzentrum Forst Eberswalde (Hrsg), Eberswalde 238 S.
- RIEK, W., RUSS, A., GRÜLL, M. (2020): Zur Abschätzung des standörtlichen Anbaurisikos von Baumarten im Klimawandel im nordostdeutschen Tiefland. Eberswalder Forstliche Schriftenreihe, Bd. 69. Landesbetrieb Forst Brandenburg, Landeskompetenzzentrum Forst Eberswalde (Hrsg.), Eberswalde. 48-70.
- RUSS, A. (2015): Regionalisierung des Wasser- und Kohlenstoffhaushalts für die Waldfläche Brandenburgs – Entwicklung von Regionalisierungsansätzen unter besonderer Berücksichtigung der forstlichen Standortkarte. Bodenökologie und Bodengenese, Bd. 44. Technische Universität Berlin Selbstverlag, 164 S.
- RUSS, A., RIEK, W. (2011): Pedotransferfunktionen zur Ableitung der nutzbaren Feldkapazität – Validierung für Waldböden des nordostdeutschen Tieflands. Wald- ökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz 11: 5-17. URL <http://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:0041-afsv-01139>
- RUSS, A., RIEK, W. (2017). Anwendung eines standortspezifisch parametrisierten Wasserhaushaltsmodells zur Ableitung der Wasserhaushaltskomponenten auf Level II-Standorten unter Verwendung von aktuellen Messdaten (Stichjahr 2016). HNEE. Studie im Auftrag des Landeskompetenzzentrums Forst Eberswalde. 139 S. (unveröffentlicht)
- RUSS, A., RIEK, W., HENTSCHEL, R., HANNEMANN, J., BARTH, R., BECKER, F. (2019): Wasserhaushalt im Trockenjahr 2018 – Ergebnisse aus dem Level II Programm in Brandenburg. Eberswalder Forstliche Schriftenreihe, Bd. 67. Landesbetrieb Forst Brandenburg, Landeskompetenzzentrum Forst Eberswalde (Hrsg.), Eberswalde. 11-24.
- RUSS, A., RIEK, W., WESSOLEK, G. (2021): Three-Dimensional Mapping of Forest Soil Carbon Stocks Using SCORPAN Modelling and Relative Depth Gradients in the North-Eastern Lowlands of Germany. Appl. Sci., 11, 714. <https://doi.org/10.3390/app11020714>
- SCHARNWEBER, T., SMILJANIC, M., CRUZ-GARCÍA, R., MANTHEY, M., WILMKING, M. (2020): Tree growth at the end of the 21st century - the extreme years 2018/19 as template for future growth conditions. Environ. Res. Lett. 15 074022. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/ab865d>
- SCHMIDT-WALTER, P. (2019): KSPclimreg: Routines for interpolating daily climatic variables. R package version 0.1.0.
- SCHMIDT-WALTER, P. (2018): KSPclimpredict: Predict daily climate parameters from saved ModelObjects and Data. R package version 0.1.0.
- SCHULZE, G. (1998): Anleitung für die forstliche Standorterkundung im nordostdeutschen Tiefland - (Standorterkundungsanleitung) SEA 95, Bd. D - Bodenformen-Katalog. 3. Aufl. Schwerin, 252 S.
- SHAW, R.H.; LAING, D.R. (1966): Moisture stress and plant response. In: W.H. Pierre, D. Kirkham, J. Pesek, R. Shaw (Hrsg.): Plant environment and efficient water use. American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, Madison, WI, S. 73-94. URL <http://dx.doi.org/10.2134/1966.plantenvironment.c5>.
- SPEKAT, A., ENKE, W., KREIENKAMP, F. (2007): Neuentwicklung von regional hoch aufgelösten Wetterlagen für Deutschland und Bereitstellung regionaler Klimaszenarios auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit dem Regionalisierungsmodell WettReg auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit ECHAM5/MPI-OM T63L31 2010 bis 2100 für SRES-Szenarios B1, A1B und A2. Forschungsbericht des CEC Potsdam GmbH im Rahmen des FuE-Vorhabens „Klimaauswirkungen und Anpassungen in Deutschland – Phase I: Erstellung regionaler Klimaszenarios für Deutschland“ des Umweltbundesamtes: 106 S.
- VANHELLEMONT, M., SOUSA-SILVA, R., MAES, S. L., VAN DEN BULCKE, J., HERTZOG, L., DE GROOTE, S., VAN ACKER, J., BONTE, D., MARTEL, A., LENS L. (2019) Distinct growth responses to drought for oak and beech in temperate mixed forests. Science of the Total Environment. Volume 650, Part 2, 3017-3026. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.054>
- VON WILPERT, K., HARTMANN, P., PUHLMANN, H., SCHMIDT-WALTER, P., MEESENBERG, H., MÜLLER, J. (2016). Bodenwasserhaushalt und Trockenstress. In: WELLBROCK, N., BOLTE, A., FLESSA, H. (Hrsg.). Dynamik und räumliche Muster forstlicher Standorte in Deutschland. Thünen Report 43, S. 343-386.
- WESSOLEK, G., DUIJNISVELD, W., TRINKS, S. (2008): Hydro-pedotransfer functions (HPTFs) for predicting annual percolation rate on a regional scale. J. Hydrol. 356 (1-2): 17 – 27.
- WESSOLEK, G., DUIJNISVELD, W. H., TRINKS, S. (2009): Hydro-Pedotransferfunktionen zur Berechnung der Sickerwasserrate aus dem Boden – das TUB-BGR-Ver-

fahren. In: Bodenphysikalische Kennwerte und Berechnungsverfahren für die Praxis: Bodenökologie und Bodengenese: Bd. 40. Technische Universität Berlin.66–80.

ZICHE, D., GRÜNEBERG, E., HILBRIG, L., HÖHLE, J., KOMPA, T., LISKI, J., REPO, A., WELLBROCK, N. (2019). Comparing soil inventory with modelling: Carbon balance in central European forest soils varies among forest types. *Science of the Total Environment*, 647, 1573-1585.

ZICHE, D., RIEK, W. (2020): Wasserhaushaltsmodellierung für Flächen der Forstlichen Umweltkontrolle Brandenburg und Berlin. Untersuchungen zum Wasserhaushalt der Level II Flächen in Brandenburg und Berlin anhand von LWF-Brook90 Wasserhaushaltssimulationen. HNEE. Studie im Auftrag des Landeskompetenzentrums Forst Eberswalde. 47 S. (unveröffentlicht)

ZICHE, D., RIEK, W., RUSS, A., HENTSCHEL, R., MARTIN, J. (2021): Water Budgets of Managed Forests in Northeast Germany under Climate Change - Results from a Model Study on Forest Monitoring Sites. *Appl. Sci.* 11, 2403. <https://doi.org/10.3390/app11052403>

ZICHE, D., SEIDLING, W. (2010). Homogenisation of climate time series from ICP Forests Level II monitoring sites in Germany based on interpolated climate data. *Annals of Forest Science*, 67, 804. DOI: 10.1051/forest/2010051.

Zur Zukunft der Rot-Buche im Brandenburger Wald – ein Zwischenfazit

Ralf Kätzel und Jens Schröder

Die Rot-Buche nimmt derzeit etwa 3,3 Prozent der Waldfläche in Brandenburg ein, am Oberstand ist sie mit 2,2 Prozent beteiligt¹. Damit entspricht ihr Anteil bei weitem noch nicht der Fläche, die ihr bei rein natürlicher Waldentwicklung zukäme: Der Anteil von Wäldern unter maßgeblicher Beteiligung der Rot-Buche an der potenziellen natürlichen Vegetation liegt hier bei rund 40 Prozent². Die Erhaltung und Förderung der Baumart und der von ihr dominierten Waldökosysteme ist deshalb ein zentrales wald- und naturschutzpolitisches Ziel, nicht nur im Land Brandenburg.

Der intensiven waldbaulichen Förderung der natürlichen und künstlichen Verjüngung der Rot-Buche in Brandenburg stehen in den letzten Jahren zunehmende Meldungen der forstlichen Praxis über Vitalitätsverluste bei alten und mittelalten Buchenbeständen gegenüber. Dies gab den Anstoß, die Baumart stärker in den Fokus der Eberswalder Waldforschung zu rücken.

Die hier vorgelegten Ergebnisse zeigen den Zwischenstand von teilweise räumlich und zeitlich begrenzten Einzelstudien, die der interessierten Öffentlichkeit bereits jetzt vorgestellt werden sollten. Mit dem Wald Beschäftigte, Waldeigentümerinnen und Waldeigentümer werden vor ihrem Erfahrungshintergrund am besten beurteilen können, ob ähnliche Beobachtungen auch auf anderen Waldflächen die Repräsentativität der Einzelbefunde bestätigen. Gleichzeitig sollen die Ergebnisse – auch vor dem Hintergrund der Wahl der Rot-Buche zum Baum des Jahres 2022 – den Diskurs über die Zukunft der Baumart in Brandenburg anregen.

Die Buche kommt in Brandenburg vor allem in vergleichsweise alten Wäldern vor (s. Kap. 1). Diese Bestände sind das Ergebnis von oft höchst unterschiedlichen Begründungs- und Bewirtschaftungshistorien, wie die Ergebnisse der genetischen Untersuchungen am Beispiel der beiden alten Buchenbestände in *Beerenbusch (Menz)* am Stechlinsee und der UNESCO-Naturerbe-Fläche *Grumsin* im Norden Brandenburgs beispielhaft zeigen (Kap. 8). Die Vielfalt in der Bestandesgeschichte legt

eine relativ große Diversität im genetischen Ausgangsmaterial nahe, die im Allgemeinen eine vorteilhafte Basis für artbezogene Anpassungsprozesse bietet.

Auch aus anderen Gründen galt die Rot-Buche bislang als besonders anpassungsfähig an akute Stressfaktoren und latente Umweltveränderungen. Insbesondere ihre isohydrische (=hydrostabile) und damit wassersparende Anpassungsstrategie hat sich in Trockenstressexperimenten bestätigt. Bei langanhaltenden und wiederkehrenden Trockenphasen wirkt sich diese Strategie einer strengen Spaltöffnungsregulation allerdings nachteilig aus (Kap. 6). Als Folge gehen die Speicher für überlebenswichtige Kohlenhydratverbindungen zurück, was sich ebenso in der zeitlich versetzten Reduktion des Dickenwachstums widerspiegelt. Gleichzeitig steigt die Prädisposition der Bäume gegenüber Schadinsekten und Pathogenen (Kap. 3 und 4) und ihre Konkurrenzkraft sinkt, was die Langzeituntersuchungen am Beispiel des *Melzower Buchen-Naturwaldes* bestätigen (Kap. 9).

Absterbeprozesse treten somit überwiegend mit (großer) zeitlicher Verzögerung auf. Bei dem Einzelbaumvergleich der mittleren Zeitreihen der Jahrringbreiten im Beispielbestand *Breitefenn* 193 (Kap. 5) wurde deutlich, dass sich die untersuchten Gruppen vitaler und kranker Bäume bereits seit 1990 auseinanderentwickelt haben. Auch bei den stressphysiologischen Untersuchungen der Einzelbäume der Level-II-Dauerbeobachtungsfläche *Beerenbusch* verhält sich die heute absterbende Buche 2 bereits seit sieben Jahren physiologisch „auffällig“, ohne dass dies frühzeitig äußerlich sichtbar wäre (Kap. 6). Trotz der taxonomisch einheitlichen Zuordnung der Rot-Buche und der Trauben-Eiche zur Familie der *Fagaceae* unterscheiden sich die beiden Arten unter anderem bezüglich der Dynamik ihrer Stressreaktion deutlich. Hierzu passt auch der verspätete, aber drastische Anstieg der Kronenverlichtung der Buchen ab dem Jahr 2019 (Kap. 2).

In das Gesamtbild der mit unterschiedlichen Methoden und teilweise an unterschiedlichen Beständen untersuchten Buchenvitalität ordnet sich ebenfalls die Zunahme der Sensitivität (resp. Abnahme der Pufferkapazität) der Wachstumsreaktionen und die Zunahme der Weiserjahre in den letzten Jahrzehnten ein. Die Intensität von Stressereignissen überlagert zunehmend die Variabilität baumindividueller Stressantworten und führt zu synchronen Stressreaktionen und Wachstumsverläufen. Hier kommt die physiologische Plastizität der Buchenbestände an ihre Grenzen.

¹ Quelle: Landeswaldinventur Brandenburg 2013 (<https://bwi.info/?inv=LWIBB2013>) sowie Auswertung des Datenspeicher Wald (DSW2), LFE / U. Pommer 2021

² Quelle: Flächenstatistik zu den Anteilen der Buchen- und Buchenmischwald-Kartierungseinheiten der PNV auf der heutigen Waldfläche Brandenburgs, Bezug: Hofmann, G.; Pommer, U. (2005): Potentielle Natürliche Vegetation von Brandenburg und Berlin. Landesforstanstalt Eberswalde, Eberswalder Forstliche Schriftenreihe, Band 24, ISBN 3-933352-62-2

Diese Untersuchungen zeigen aber auch die regionalen und lokalen Unterschiede in den Anpassungspotenzialen. Für die standörtlich begünstigten Vorkommen, insbesondere in Nordbrandenburg, besteht eine wachsende Vulnerabilität der vorhandenen Rot-Buchen-Bestände im Klimawandel und hier vor allem der älteren, großen Einzelbäume. Im Gegensatz dazu traten z. B. an dem kontinentaleren und südöstlicheren Standort „Oder-Spree“ deutlich weniger Weiserjahre in den Jahrringchronologien auf als in den besser wasserversorgten nördlicheren und westlicheren Vergleichsbeständen (Kap. 5). Langjährige genetische Anpassungsprozesse an ungünstigere Standortbedingungen z. B. in der Folge von Selektionsvorgängen und möglicherweise auch physiologische Konditionierungen (wie bei dem wiederholten Trockenstressexperiment gezeigt; Kap. 6) steigern die ökologische Amplitude der Anpassung.

Dies zeigt sich nicht nur auf regionaler, sondern auch auf europäischer Ebene. Dass die Buche innerhalb ihres europäischen Verbreitungsgebietes unterschiedliche genetische Ökotypen hervorgebracht hat, wird insbesondere an den Ergebnissen des Herkunftsversuches mit neun europäischen Provenienzen deutlich (Kap. 7). Die Ergebnisse unterstreichen, dass südliche Provenienzen aus trockneren Klimaregionen unter Umständen eine Chance für den Anbau in Brandenburg bieten könnten, wie die beiden Herkünfte aus Bulgarien (*Golze Delchev*) und Frankreich (*Pyrénées*) zeigen. Das Negativbeispiel *Plateaux* aus Frankreich verdeutlicht aber auch, dass für einzelne Herkünfte die Verwendung in Brandenburg derzeit nicht in Frage kommt. Ergebnisse wie diese zeigen noch einmal, wie wichtig derartige Versuche für den Wissenszuwachs in der Praxis sind.

Neben der Wahl geeigneter Herkünfte bieten vor allem ausgewählte, besonders gut angepasste Baumindividuen, die z. B. in Samenplantagen zusammengeführt werden könnten, eine Chance, das Anpassungspotenzial künftiger Buchengenerationen zu erhöhen. Dies ist noch ein sehr langer Weg, der jedoch zeitnah begonnen werden sollte. Wie diese Einzelbäume z. B. unter Nutzung von Biomarkern selektiert werden könnten, zeigen beispielhaft die Kapitel 6 und 7. Hierzu gehört auch die Beobachtung, dass aus Baumschulware hervorgegangene Populationen eine deutlich höhere genetische Vielfalt (und damit Anpassungsfähigkeit) haben können als natürlich verjüngte Bestände, wenn diese artbedingt genetisch eng verwandte Familienstrukturen ausbilden (Kap. 8).

Bei Kunstverjüngung muss der Fokus auf einer möglichst hohen genetischen Diversität des verwendeten Saatguts aus nachweislich klimangepassten Saatgutbeständen liegen. Eine initial hohe genetische Diversität ist für die künstliche Verjüngung besonders wichtig, weil sie die Selektion standortangepasster Pflanzen erleichtert und die Voraussetzungen für eine weitergehende Anpassung in Folgegenerationen schafft.

Das Anpassungspotenzial von Bäumen sinkt allerdings – wie auch bei anderen Organismengruppen – nach einer altersabhängigen Optimalphase stark ab. Dies bestätigt sich bei den Untersuchungen zum Kronenzu-

stand (Kap. 2) und zu den physiologischen Stressreaktionen (Kap. 6) ebenso wie bei den Jahrringchronologien (Kap. 5). Bei der Kronenansprache im Frühjahr wurden höhere Austriebsverluste (> 40 %) überwiegend bei Bäumen mit einem BHD über 50 cm beobachtet. Bei dem Untersuchungsbestand im Revier *Breitefenn* waren insbesondere Altbuchen von der Vitalitätsschwäche betroffen. Zusätzlich verschärfend wirkt sich hier aus, dass diese Altbäume aus deutlich kühleren Zeiträumen stammen und ihr Genotyp durch selektive Filter geprägt wurde, die die aktuellen Witterungsextreme kaum abbilden konnten.

Obwohl sich der Schadensverlauf bei der Buche in Brandenburg mit den Beobachtungen in anderen Bundesländern deckt, vollzieht sich der derzeitige Absterbeprozess hier noch nicht flächendeckend, sondern es sterben in lokalen Schwerpunkten Einzelbäume oder Kleingruppen. In Folge der Lückenausbreitung könnte sich jedoch nach künftigen Trockenstressereignissen die Mortalität auch hier exponentiell ausweiten. Kurzfristige Freistellungen, südexponierte Randlagen oder das Öffnen des Kronendachs nach Windwürfen sind dabei zusätzliche prädisponierende Faktoren.

Wie die Untersuchungen im Naturwald *Melzower Forst* („*Fauler Ort*“) zeigen, werden die Lücken der absterbenden Altbuchen mit „trockentoleranteren“ Laubbauarten (z. B. Sommer-Linde, Elsbeere, Feld-Ahorn, Flatter-Ulme, Stiel-Eiche) ausgefüllt. Das natürliche Buchenareal nimmt also zukünftig mit hoher Wahrscheinlichkeit ab, während die Baumartenvielfalt zunimmt. Dieser Befund ist für die künftige waldbauliche Planung von besonderer Bedeutung und spiegelt sich auch in den Modellszenarien der künftigen Buchenausbreitung (Kap. 10) wider.

Die Zusammenführung dieser standort- und vegetationskundlichen Befunde mit den Ergebnissen der jüngsten Waldzustandsanalysen und der dendrochronologischen Untersuchungen mahnt somit zur Vorsicht: Sie stellt das aktive waldbauliche Annähern des Buchenanteils an die „aktuelle“ (eher frühere) potenziell natürliche Vegetation zumindest teilweise in Frage, gerade wenn dies als großflächiger Anbau von Reinbeständen erfolgt. Zukünftig kommt es umso mehr auf die genaue Auswahl geeigneter Standorte für eher kleinflächige Buchenanbauten in Mischung mit ebenfalls kleinflächigen Verjüngungen weiterer, gegebenenfalls trockenertoleranterer Baumarten an.

Die künftige Vitalitätsentwicklung als wichtiger Faktor für langfristige Überlegungen zur Gestaltung unserer Wälder muss auch für die Rot-Buche weiter im Fokus eines kombinierten ökosystemaren Monitorings stehen. Dabei sind unterschiedliche Einflussgrößen (abiotisch, biotisch), Wirkungsreaktionen (Wachstum, Physiologie) und ökosystemare Folgen (z. B. Selektion) durch aktuelle und kombinierte Verfahren (Waldzustandserfassung im Rasternetz, Fernerkundung auf Bestandesebene) zu erfassen. Nur so können künftige Optimalbereiche, aber auch Grenz- und Ausschlussgebiete für den Anbau dieser schönen, faszinierenden und wichtigen Baumart in Brandenburg realitätsnah abgeschätzt werden.

In der Eberswalder Forstlichen Schriftenreihe sind bisher erschienen:

- SCHULZ, P.M.: Biographie Walter Pfalzgraf, des ersten Leiters des Zentralforstamtes in der Sowjetischen Besatzungszone von 1945–1948. Eberswalder Forstliche Schriftenreihe 1. ISBN 3-933352-02-9
- MILDNER, H.; SCHWARTZ, E.: Waldumbau in der Schorfheide, zum Andenken an Oberlandforstmeister Dr. phil. Erhard Hausendorff. Eberswalder Forstliche Schriftenreihe 2. ISBN 3-933352-06-1
- HEINSDORF, D. et al.: Forstliche Forschung im Nordostdeutschen Tiefland (1992–1997). Eberswalder Forstliche Schriftenreihe 3. ISBN 3-933352-07-X
- HOLLENDER, H. et al.: Planung der Waldentwicklung im Land Brandenburg, Vorträge zur Fachtagung am 4. November 1998 in Eberswalde. Eberswalder Forstliche Schriftenreihe 4. ISBN 3-933352-10-X
- KÄTZEL, R. et al.: Forstsaatgutprüfung in Eberswalde 1899–1999, Grundlage für eine nachhaltige Forstwirtschaft. Eberswalder Forstliche Schriftenreihe 5. ISBN 3-933352-12-6
- HEINSDORF, D.: Das Revier Sauen – Beispiel für erfolgreichen Waldumbau. Eberswalder Forstliche Schriftenreihe 6. ISBN 3-933352-22-3
- HÖPPNER, K. et al.: Ökologische und ökonomische Gesichtspunkte der Waldbewirtschaftung im südlichen Brandenburg. Eberswalder Forstliche Schriftenreihe 7. ISBN 3-933352-24-X
- KRAUT, H.; MÖCKEL, R.: Forstwirtschaft im Lebensraum des Auerhuhns, ein Leitfaden für die Waldbewirtschaftung in den Einstandsgebieten im Lausitzer Flachland. Eberswalder Forstliche Schriftenreihe 8. ISBN 3-933352-23-1
- KÄTZEL, R. et al.: Die Birke im Nordostdeutschen Tiefland; Eberswalder Forschungsergebnisse zum Baum des Jahres 2000. Eberswalder Forstliche Schriftenreihe 9. ISBN 3-933352-30-4
- Abteilung Forstwirtschaft des Ministeriums für Landwirtschaft, Umweltschutz und Raumordnung des Landes Brandenburg: Landeswaldbericht 1997 und 1998, mit einem Sonderkapitel zur Naturalplanung in Brandenburg. (Sonderband) Eberswalder Forstliche Schriftenreihe 10. ISBN 3-933352-31-2
- JOACHIM, H.F.: Die Schwarzpappel (*Populus nigra* L.) in Brandenburg. Eberswalder Forstliche Schriftenreihe 11. ISBN 3-933352-32-0
- BRUECK, C.: Zertifizierung von Forstbetrieben. Beiträge zur Tagung vom 5. November 1999 in Fürstenwalde/Spree (Brandenburg). Eberswalder Forstliche Schriftenreihe 12. ISBN 3-933352-34-7
- HEINSDORF, D.; BERGMANN, J.H.: Sauen 1994 – ein gelungener Waldumbau ... Eberswalder Forstliche Schriftenreihe 13. ISBN 3-933352-35-5
- Abteilung Forstwirtschaft des Ministeriums für Landwirtschaft, Umweltschutz und Raumordnung des Landes Brandenburg: Landeswaldbericht 1999 mit einem Sonderkapitel „Regionaler Waldbericht für die Zertifizierung der Waldbewirtschaftung in Brandenburg. (Sonderband) Eberswalder Forstliche Schriftenreihe 14. ISBN 3-933352-37-1
- RIEK, W. et al.: Funktionen des Waldes und Aufgaben der Forstwirtschaft in Verbindung mit dem Landschaftswasserhaushalt. Eberswalder Forstliche Schriftenreihe 15. ISBN 3-933352-47-9
- MÜLLER, J. et al.: Privatwald in Brandenburg – Entwicklung, Rahmenbedingungen und aktuelle Situation. Eberswalder Forstliche Schriftenreihe 16. ISBN 3-933352-48-7
- AUTORENKOLLEKTIV: Die Schwarz-Erle (*Alnus glutinosa* [L.] GAERTN.) im nordostdeutschen Tiefland. Eberswalder Forstliche Schriftenreihe 17. ISBN 3-933352-52-5
- AUTORENKOLLEKTIV: Zertifizierung nachhaltiger Waldbewirtschaftung in Brandenburg. Eberswalder Forstliche Schriftenreihe 18. ISBN 3-933352-53-3

RIEK, W.; STÄHR, F. et al.: Eigenschaften typischer Waldböden im Nordostdeutschen Tiefland unter besonderer Berücksichtigung des Landes Brandenburg – Hinweise für die Waldbewirtschaftung. Eberswalder Forstliche Schriftenreihe 19. ISBN 3-933352-56-8

AUTORENKOLLEKTIV: Kommunalwald in Brandenburg – Entwicklung, Rahmenbedingungen und aktuelle Situation. Eberswalder Forstliche Schriftenreihe 20. ISBN 3-933352-57-6

AUTORENKOLLEKTIV: Naturverjüngung der Kiefer – Erfahrungen, Probleme, Perspektiven. Eberswalder Forstliche Schriftenreihe 21. ISBN 3-933352-58-4

MÜLLER, J. et al.: Die zweite Bundeswaldinventur (BW12) – Ergebnisse für Brandenburg und Berlin. Eberswalder Forstliche Schriftenreihe 22. ISBN 3-933352-59-2

AUTORENKOLLEKTIV: Zukunftsorientierte Waldwirtschaft: Ökologischer Waldumbau im nordostdeutschen Tiefland. Eberswalder Forstliche Schriftenreihe 23.

HOFMANN, G.; POMMER, U.: Potentielle Natürliche Vegetation von Brandenburg und Berlin mit Karte im Maßstab 1 : 200 000. Eberswalder Forstliche Schriftenreihe 24. ISBN 3-933352-62-2

AUTORENKOLLEKTIV: Aktuelle Ergebnisse und Fragen zur Situation der Eiche und ihrer Bewirtschaftung in Brandenburg. Eberswalder Forstliche Schriftenreihe 25. ISBN 3-933352-63-0

Wissenstransfer in die Praxis, Tagungsband zum 1. Eberswalder Winterkolloquium am 2. März 2006. Eberswalder Forstliche Schriftenreihe 26. ISBN 3-933352-64-9

Die Schwarz-Pappel, Fachtagung zum Baum des Jahres 2006. Eberswalder Forstliche Schriftenreihe 27. ISBN 3-933352-63-0

Naturschutz in den Wäldern Brandenburgs Beiträge der Naturschutztagung vom 2. November 2006 in Eberswalde. Eberswalder Forstliche Schriftenreihe 28. ISBN 3-933352-97-8

Wissenstransfer in die Praxis-Beiträge zum zweiten Winterkolloquium am 1. März 2007 in Eberswalde. Eberswalder Forstliche Schriftenreihe 29.

AUTORENKOLLEKTIV: Waldwachstumskundliche Grundlagen für eine effektive Waldbewirtschaftung, Zum 100. Geburtstag von Professor Dr. habil. Werner Erteld. Eberswalder Forstliche Schriftenreihe 30.

AUTORENKOLLEKTIV: 100 Jahre Naturschutzgebiet Plagefenn. Ein Beispiel für erfolgreiches Zusammenwirken von Forstwirtschaft und Naturschutz. Tagungsband zur Tagungs- und Exkursionsveranstaltung vom 11. – 12. Mai 2007 in Chorin. Eberswalder Forstliche Schriftenreihe 31.

AUTORENKOLLEKTIV: Die Kiefer im Nordostdeutschen Tiefland. Ökologie und Bewirtschaftung. Eberswalder Forstliche Schriftenreihe 32.

Wald, Forstwirtschaft, Förster und Gesellschaft – Wälder schaffen Wachstum und sichern Lebensgrundlagen. Tagungsbericht der gemeinsamen Forstpolitischen Jahrestagung vom 14. Juni 2007 in Paaren/Glien. Eberswalder Forstliche Schriftenreihe 33.

GROSS, J.: Waldfunktionen im Land Brandenburg. Eberswalder Forstliche Schriftenreihe 34.

Wissenstransfer in die Praxis-Beiträge zum dritten Winterkolloquium am 28. Februar 2008 in Eberswalde. Eberswalder Forstliche Schriftenreihe 35.

Biodiversität-Lebensversicherung des Waldes – Tagungsband zur gemeinsamen Jahrestagung des Ministeriums für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Verbraucherschutz und des Brandenburgischen Forstvereins e. V. am 24.04.2008. Eberswalder Forstliche Schriftenreihe 36.

Hohenlubbichow: Naturgemäße Waldwirtschaft zwischen Verklärung und Realität – Natur- und Landschaftsschutz im Gebiet um Bellinchen/Bielinek und Hohenlubbichow/Lubiechów Górný. Eberswalder Forstliche Schriftenreihe 37.

- HEINSDORF, D.; KRAUSS, H.H.: Herleitung von Trockenmassen und Nährstoffspeicherungen in Buchenbeständen. Eberswalder Forstliche Schriftenreihe 38.
- HOFMANN, G. et al.: Wildökologische Lebensraumbewertung für die Bewirtschaftung des wiederkäuenden Schalenwildes im nordostdeutschen Tiefland. Eberswalder Forstliche Schriftenreihe 39.
- Wissenstransfer in die Praxis-Beiträge zum vierten Winterkolloquium am 26. Februar 2009 in Eberswalde. Eberswalder Forstliche Schriftenreihe 40.
- LOCKOW, K.W. : Die Hainbuche im nordostdeutschen Tiefland-Wuchsverhalten und Bewirtschaftungshinweise. Eberswalder Forstliche Schriftenreihe 41.
- AUTORENKOLLEKTIV: Risikomanagement im Forstbetrieb. Eberswalder Forstliche Schriftenreihe 42.
- AUTORENKOLLEKTIV: Die Douglasie im nordostdeutschen Tiefland. Chancen und Risiken in Klimawandel. Eberswalder Forstliche Schriftenreihe 43.
- Wissenstransfer in die Praxis-Beiträge zum fünften Winterkolloquium am 25. Februar 2010 in Eberswalde. Eberswalder Forstliche Schriftenreihe 44.
- AUTORENKOLLEKTIV: Aktuelle Beiträge zur Wildökologie und Jagdwirtschaft in Brandenburg. Eberswalder Forstliche Schriftenreihe 45.
- AUTORENKOLLEKTIV: Naturnahe Waldwirtschaft-Dauerwald heute? Eberswalder Forstliche Schriftenreihe 46.
- Wissenstransfer in die Praxis-Beiträge zum sechsten Winterkolloquium am 24. Februar 2011 in Eberswalde. Eberswalder Forstliche Schriftenreihe 47.
- AUTORENKOLLEKTIV: Technik für den Wald – Eine Retrospektive zur Entwicklung der forstlichen Verfahrenstechnik und Mechanisierung in der DDR. Eberswalder Forstliche Schriftenreihe 48.
- Wissenstransfer in die Praxis-Beiträge zum siebten Winterkolloquium am 23. Februar 2012 in Eberswalde. Eberswalder Forstliche Schriftenreihe 49.
- Nachhaltige Waldbewirtschaftung – Realität oder visionärer Anspruch? Tagungsband zur gemeinsamen Jahrestagung mit dem Brandenburgischen Forstverein e. V. am 10. Mai 2012 in Rangsdorf. Eberswalder Forstliche Schriftenreihe 50.
- Wissenstransfer in die Praxis-Beiträge zum achten Winterkolloquium am 21. Februar 2013 in Eberswalde. Eberswalder Forstliche Schriftenreihe 51.
- HEINSDORF, D.: Zur Entwicklung und waldökologischen Bedeutung von neun Baumarten bei unterschiedlicher Nährstoffversorgung auf trockenen Sandstandorten Ergebnisse einer Langzeitstudie (1968-2012) im Süden Brandenburgs (Forstrevier Preschen). Eberswalder Forstliche Schriftenreihe 52.
- Die Eiche – Chancen und Risiken einer Charakterbaumart im nordostdeutschen Tiefland. Tagungsband zur gemeinsamen Vortrags- und Exkursionsveranstaltung mit dem Brandenburgischen Forstverein am 23. Mai 2013 in Eberswalde. Eberswalder Forstliche Schriftenreihe 53.
- HOFMANN, G. et al.: Die Waldvegetation Nordostdeutschlands. Eberswalder Forstliche Schriftenreihe 54.
- Wissenstransfer in die Praxis-Beiträge zum neunten Winterkolloquium am 27. Februar 2014 in Eberswalde. Eberswalder Forstliche Schriftenreihe 55.
- Biomasseschätzung für Wälder mittels Fernerkundung und Modellierung – Ergebnisse des deutsch-polnischen Verbundprojekts „ForseenPOMERANIA“
Szacowanie biomasy leśnej za pomocą teledetekcji i modelunku – Wyniki projektu zrealizowanego w ramach współpracy polsko-niemieckiej „ForseenPOMERANIA“. Eberswalder Forstliche Schriftenreihe 56.
- Wald-Monitoring-Konzeption des Landes Brandenburg. Eberswalder Forstliche Schriftenreihe 57.

Erhaltung und nachhaltige Nutzung forstlicher Genressourcen. Eberswalder Forstliche Schriftenreihe 58.

Wissenstransfer in die Praxis-Beiträge zum 10. Winterkolloquium am 19. Februar 2015 in Eberswalde. Eberswalder Forstliche Schriftenreihe 59.

Waldbodenbericht Brandenburg. Ergebnisse der landesweiten Bodenzustandserhebungen BZE-2 und BZE-2a (Band 1). Eberswalder Forstliche Schriftenreihe 60.

Maßnahmen zur Abwehr des Kiefern-Wurzelschwammes (*Heterobasidion annosum*) in der Bergbaufolgelandschaft Südbrandenburgs. Eberswalder Forstliche Schriftenreihe 61.

Wissenstransfer in die Praxis-Beiträge zum 11. Winterkolloquium am 25. Februar 2016 in Eberswalde. Eberswalder Forstliche Schriftenreihe 62.

30 Jahre forstliches Umweltmonitoring in Brandenburg. Beiträge zur Fachtagung am 6. und 7. Juli 2016 in Eberswalde. Eberswalder Forstliche Schriftenreihe 63.

Wissenstransfer in die Praxis-Beiträge zum 12. Winterkolloquium am 23. Februar 2017 in Eberswalde. Eberswalder Forstliche Schriftenreihe 64.

Wissenstransfer in die Praxis-Beiträge zum 13. Winterkolloquium am 22. Februar 2018 in Eberswalde. Eberswalder Forstliche Schriftenreihe 65.

Ergebnisse der ersten Landeswaldinventur 2013 im Land Brandenburg im Kontext mit der dritten Bundeswaldinventur 2012 und der Waldentwicklungs- und Holzaufkommensmodellierung 2012-2052. Eberswalder Forstliche Schriftenreihe 66.

Wissenstransfer in die Praxis-Beiträge zum 14. Winterkolloquium am 21. Februar 2019 in Eberswalde. Die Auswirkungen des Dürrejahres 2018 auf den Wald in Brandenburg. Eberswalder Forstliche Schriftenreihe 67.

Waldbodenbericht Brandenburg. Zustand und Entwicklung der brandenburgischen Waldböden. Weitere Ergebnisse der landesweiten Bodenzustandserhebung und Folgerungen für die nachhaltige Waldnutzung (Band 2). Eberswalder Forstliche Schriftenreihe 68.

Wissenstransfer in die Praxis-Beiträge zum 16. Winterkolloquium am 20. Februar 2020. Wald im Wandel-Risiken und Lösungsansätze. Eberswalder Forstliche Schriftenreihe 69.

Wissenstransfer in die Praxis-Tagungsband zum Jubiläumskolloquium „150 Jahre Waldforschung in Brandenburg“ am 9. Juni 2021. Eberswalder Forstliche Schriftenreihe 70.

**Ministerium für Landwirtschaft,
Umwelt und Klimaschutz
des Landes Brandenburg**

Landesbetrieb Forst Brandenburg
Landeskompetenzzentrum Forst Eberswalde

Alfred-Möller-Straße 1
16225 Eberswalde
Telefon: 03334 2759-203
Fax: 03334 2759-206
E-Mail: lfe@lfb.brandenburg.de
Internet: www.forst.brandenburg.de

**WALDWIRTSCHAFT
- ABER NATÜRLICH**