

Welche Folgen hat die Dürre seit 2018 für hessische Buchenwälder?

Tobias Hoppmann, Andreas Mölder & Peter Meyer

Einordnung der aktuellen Buchenschäden

Nach der Fichte verabschiedet sich die Buche aus unseren Wäldern? Im Spätsommer 2018 konnten aufmerksame Waldbesucher nicht übersehen, dass Buchenkronen braun wurden und mancherorts ganze Waldpartien abzustarben schienen. Berichte und Kommentare schlugen teils alarmistische Töne an. Der Baumart Buche stünde ein ähnliches Untergangsszenario wie der Fichte bevor. In der Diskussion um die Klimastabilität der Buche bekamen die Skeptiker Auftrieb. Auch die Rolle der Forstwirtschaft rückte in den Fokus, wobei unterschiedliche Deutungen zu finden waren. Manch einer stellte die Holzernte grundsätzlich infrage, da sie zu den Öffnungen des Kronendachs führt, während andere die Forstwirtschaft entlastet sahen, weil Waldschäden auch an standortheimischen Baumarten in nutzungs-freien Beständen auftreten.

Auch in den Jahren 2019, 2020 und 2022 waren mancherorts erhebliche Schäden an Buchen zu sehen. Nasse und kühle Witterungsphasen täuschen leicht darüber hinweg, wie langsam sich die Wasserspeicher in den Böden wieder füllen. Auch nach scheinbar feuchten Wintern blieben auf manchen Standorten tiefere Bodenschichten weiterhin trocken, und die zeitweise wassergesättigten Oberböden trockneten im nächsten Frühling bald wieder aus. Kontinuierliche Messungen der Bodenfeuchte in unterschiedlichen Tiefen belegen anschaulich, dass sich Dürren regional zu mehrjährigen Ereignissen entwickeln können. Das Dürreereignis seit 2018 besteht vielerorts auch im Jahr 2022 fort (UBA 2022).

An sich sind solche Ereignisse nicht neu. Für die vergangenen 200 Jahre sind Dürren für Hessen gut dokumentiert. Bei Betrachtung der Dürrejahre fällt eine Häufung in den späten 1850er, den 1860er und den 1880er Jahren auf



Abb. 1: Geschädigter Buchenaltbestand im südlichen Reinhardswald, ca. 1890. Der Bestandesrand wurde in den ca. 35 Jahren zuvor von Westen her freigestellt. Als Schäden werden Windbruch, „Rindenbrand“, Wipfeltrocknis und Bodenverödung beschrieben. (Foto: Archiv Forstamt Reinhardshagen, vgl. Borggreve 1891).

(ANONYMUS 1858, 1860, HESS 1900). Auch diese Ereignisse haben zu schweren Schäden an Buchenbeständen geführt, wie historische Fotografien eindrucksvoll dokumentieren (Abb. 1).

Diese Langzeitperspektive ermöglicht eine gewisse Relativierung der aktuellen Schäden, erlaubt aber keine Entwarnung. Denn entscheidend ist nicht nur die Schwere von Dürreereignissen, sondern auch deren Häufigkeit. Seit 2003 nahmen die komplexen Schäden an Buchen infolge warmer und trockener Witterungsphasen und milder Winter zu. Eine längerfristige Erholung fand seitdem nicht statt. 2021 wurde für Hessen der höchste Wert an stark geschädigten Buchen seit Beginn der Waldzustandserhebung zu Beginn der 1980er Jahre ermittelt (NW-FVA & HMUKLV 2021). Für die kommenden Jahrzehnte wird aufgrund des Klimawandels mit einer erheblichen Zunahme an Risikojahren gerechnet (WAGNER et al. 2015).

Untersuchungen in hessischen Naturwaldreservaten

Die hessischen Naturwaldreservate bieten sich für eine nähere Untersuchung der Dürrefolgen für Waldbestände an, da die Waldentwicklung seit über 30 Jahren sehr genau und baumindividuell dokumentiert wird. Die Reservate wurden in den späten 1980er Jahren eingerichtet und werden seitdem nicht mehr forstlich bewirtschaftet. Nach einem standardisierten Verfahren (MEYER et al. 2018) finden dort regelmäßig Stichprobeninventuren statt. Die Stichprobenpunkte sind in regelmäßigem Raster angeordnet (Abb. 2). Dabei umfasst die tatsächliche Inventurfläche insgesamt 10 Prozent der Gesamtfläche. Zentrale Inventurdaten sind z. B. Baumart, Baumhöhe und Durchmesser. Da jeder Baum ab sieben cm Durchmesser in Brusthöhe (BHD) fest eingemessen ist, kann das individuelle „Schicksal“ eines

Welche Folgen hat die Dürre seit 2018 für hessische Buchenwälder?

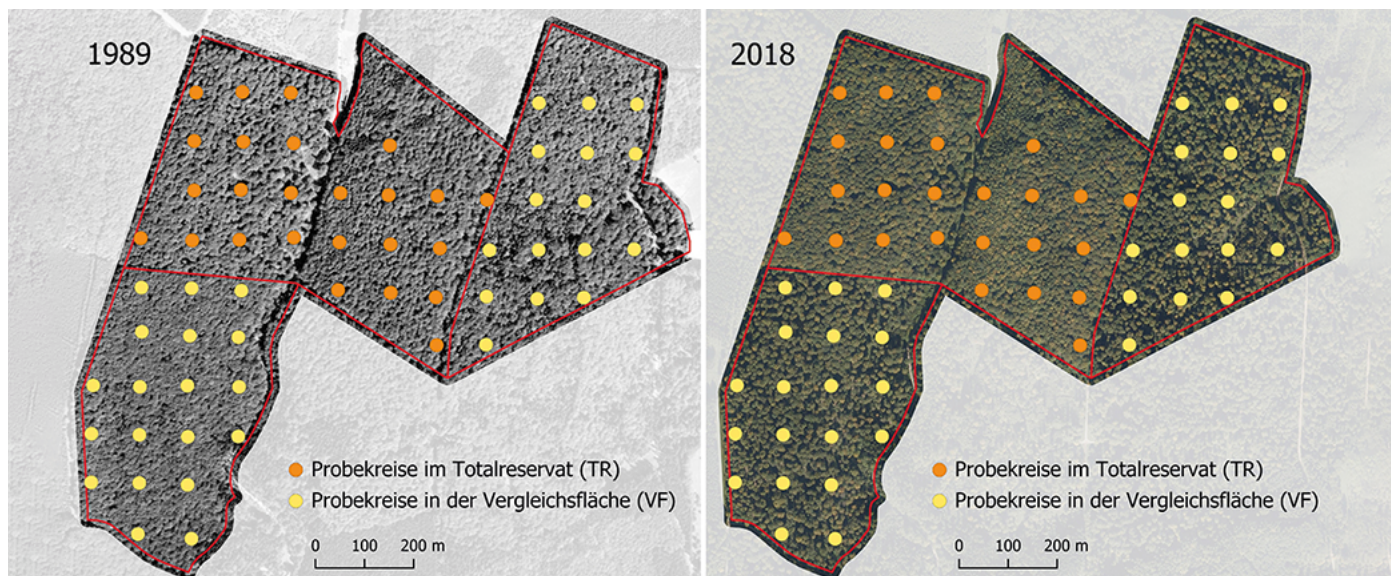


Abb. 2: Verteilung der Stichprobenkreise im Naturwaldreservat Goldbachs- und Ziebachsrück (Grafik: NW-FVA, Luftbilder: © HVBG 2021)

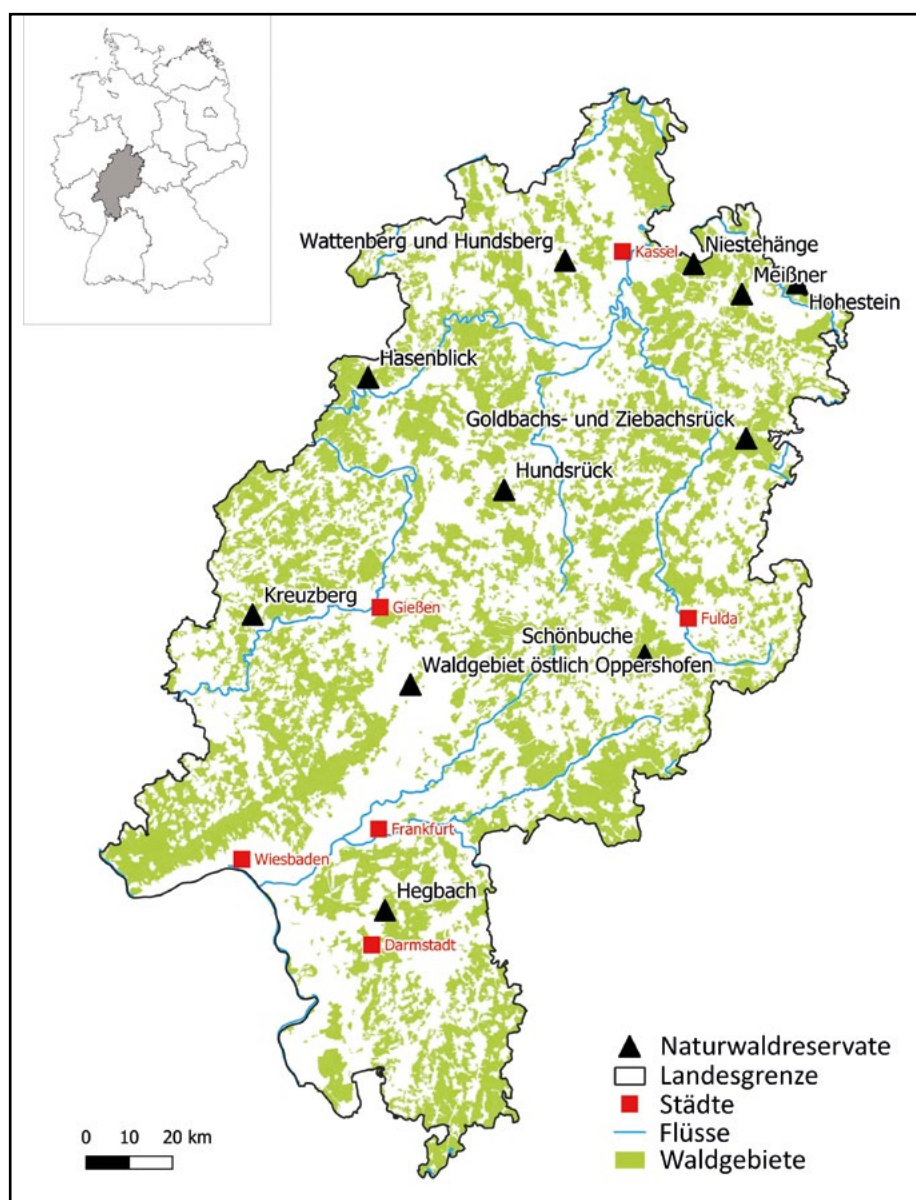


Abb. 3: Lage der untersuchten Naturwaldreservate in Hessen (Grafik: NW-FVA, Geodaten: © HVBG 2021)

Baumes über den Gesamtzeitraum verfolgt werden. Die hessischen Naturwaldreservate weisen außerdem die Besonderheit auf, über jeweils eine weiterhin forstlich bewirtschaftete Vergleichsfläche zu verfügen. Die Vergleichsflächen liegen angrenzend oder in räumlicher Nähe und wurden im Sinne einer möglichst großen Vergleichbarkeit ausgewählt. Zweck der Vergleichsflächen ist es, den Einfluss der forstlichen Bewirtschaftung über einen langen Zeitraum zu beobachten. Dies bietet uns heute die Möglichkeit, das dürrebedingte Absterben von Buchen auf bewirtschafteten und nutzungsfreien Flächen unter sonst weitgehend gleichen Bedingungen zu vergleichen.

Um das Ausmaß des Absterbens von Buchen in den Dürrejahre 2018 und 2019 zu quantifizieren, wurden die Inventuren im Jahr 2020 in elf buchengeprägten Naturwaldreservaten in Hessen wiederholt (Abb. 3). Wälder im Alter von unter 100 Jahren wurden nicht berücksichtigt. Naturwaldreservate und Vergleichsflächen waren zuvor bereits zweimal nach dem standardisierten Stichprobenverfahren inventarisiert worden (MEYER et al. 2018). Die erste Inventur hatte Ende der 1980er bis Anfang der 1990er Jahre stattgefunden, die zweite Inventur in den Jahren 2003 bis 2016. Damit lässt sich die Beobachtungszeit in zwei Perioden gliedern. Eine dritte Periode unter Einschluss der dürregeprägten Jahre 2018 und 2019 wurde hinzugefügt, indem bei der Inventur 2020 für jeden abgestorbenen Baum beurteilt wurde,

ob er innerhalb von zwei Jahren zuvor (2018/19) oder schon länger abgestorben war. Bei dieser Untersuchung wurden nur Buchen betrachtet, die zum Zeitpunkt der Erstinventur vorhanden waren und damals lebten. Anhand der drei Perioden konnte für jeden Baum bestimmt werden, ob er am Ende der Untersuchungszeit noch lebte bzw. in welcher Periode er abgestorben war. Betrachtet wurde nur die natürliche Mortalität, die Holzernte auf den Vergleichsflächen fand also keinen Eingang in die Berechnungen. Eine ergänzende Auswertung der mittleren klimatischen Wasserbilanz für die Untersuchungsflächen während der Vegetationsperiode verdeutlicht den ausgeprägten Wassermangel in den Jahren 2018 und 2019 (Abb. 4). In die Auswertung wurde außerdem die generelle Wasserversorgung des Standorts einbezogen. Für die Auswertung wurden frische bis feuchte Standorte von trockeneren unterschieden. Um der Frage nachzugehen, ob eher dünnere oder stärkere Bäume abgestorben sind, wurde ein Dominanz-Index errechnet, der die Stellung eines Baumes im Kollektiv des Gesamtbestandes beschreibt.

Dürrebedingte Mortalität in moderatem Umfang

Im Jahr 2020 lebten von den 6583 bei der ersten Inventur erfassten Bäumen noch 4166, das waren 82% des Ausgangsbestandes in den Totalreservaten und – aufgrund der Bewirtschaftung – 45% des Ausgangsbestandes in den Vergleichsflächen. Die Grundfläche stieg in den Totalreservaten an, während sie – bei gleichem Ausgangsniveau – auf den Vergleichsflächen absank (Abb. 5). In den Totalreservaten ist während der Dürrejahre die natürliche Mortalitätsrate zwar signifikant angestiegen, hat jedoch ein moderates Niveau nicht überschritten (Abb. 6). Der Anstieg der Mortalitätsraten in den bewirtschafteten Vergleichsflächen fällt geringer aus als in den Totalreservaten und ist nicht signifikant. Auf schwächer wasserversorgten Standorten ist der Anstieg der Mortalitätsrate etwas stärker ausgeprägt als auf Standorten mit besserer Wasserversorgung. Die Mortalitätsraten berücksichtigen zunächst nicht die Stärke der Bäume. Erst die Einbeziehung des Dominanz-Index erlaubt Rückschlüsse darüber, ob eher herr-

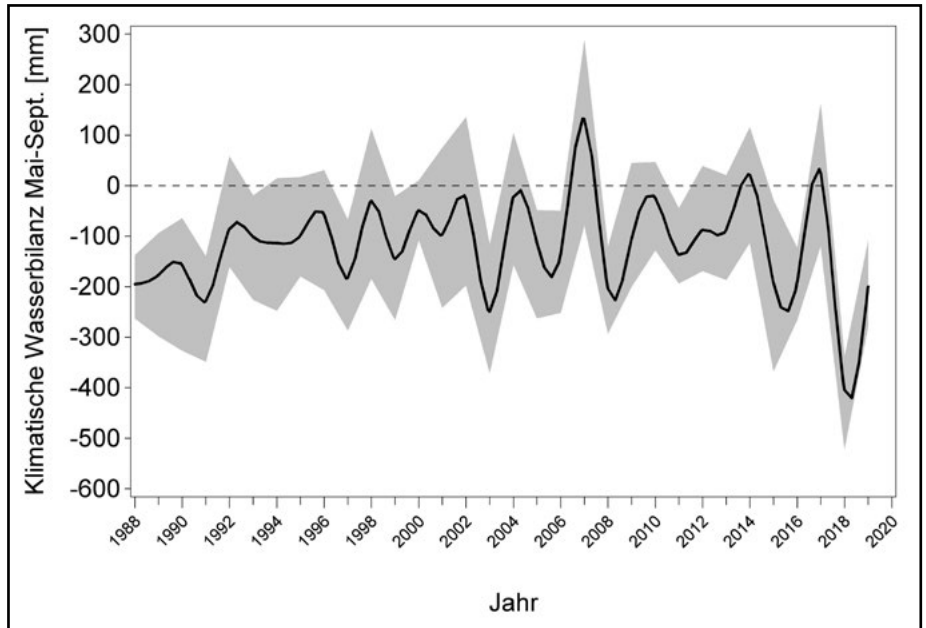


Abb. 4: Klimatische Wasserbilanz in der Vegetationsperiode für die Jahre von 1988 bis 2019 in den Untersuchungsflächen (schwarze Linie: Mittelwert der Probestflächen, grau unterlegt: 95 %-Konfidenzintervall). (Grafik: NW-FVA)

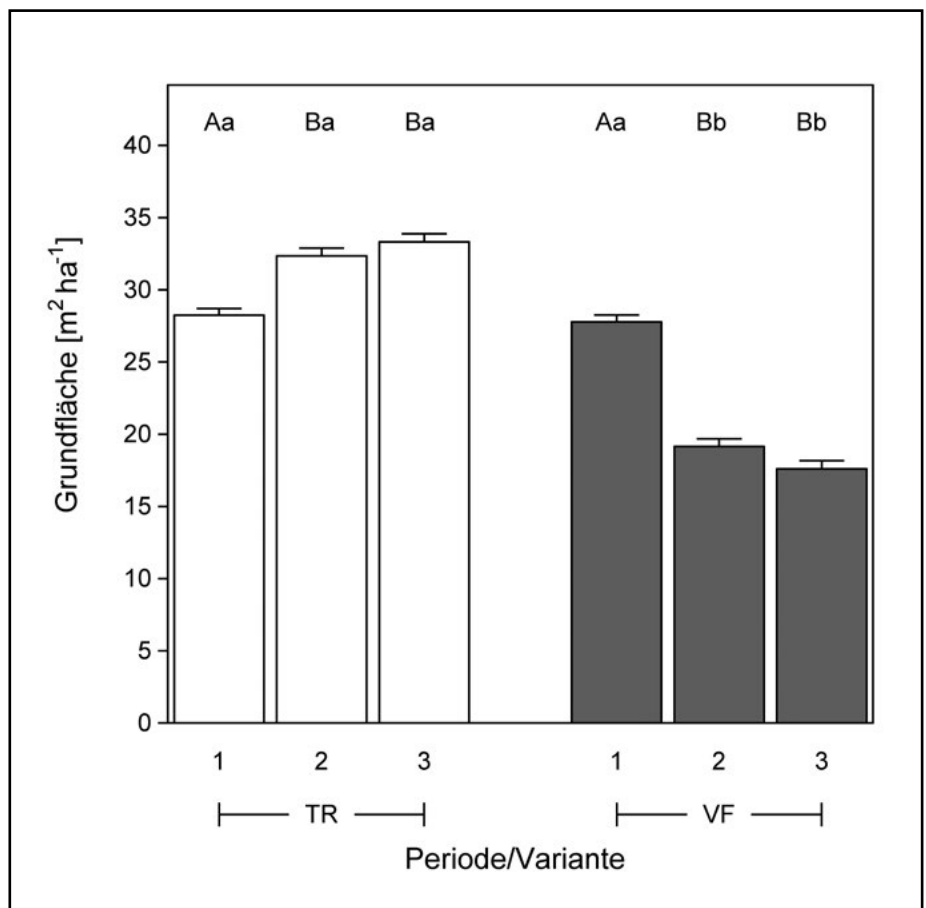


Abb. 5: Mittelwerte und Obergrenze des 95 %-Konfidenzintervalls der Grundfläche des lebenden Derbholzbestandes zu Beginn der Untersuchungsperioden (TR: Totalreservat, VF: bewirtschaftete Vergleichsfläche). Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante ($P < 0,05$) Unterschiede zwischen den Perioden innerhalb einer bestimmten Behandlung (Großbuchstaben) und zwischen den Behandlungen innerhalb eines bestimmten Zeitraums (Kleinbuchstaben) nach einem Scheffé-Test. Die Fehlerbalken umfassen die obere Hälfte des 95 %-Konfidenzintervalls. (Grafik: NW-FVA)

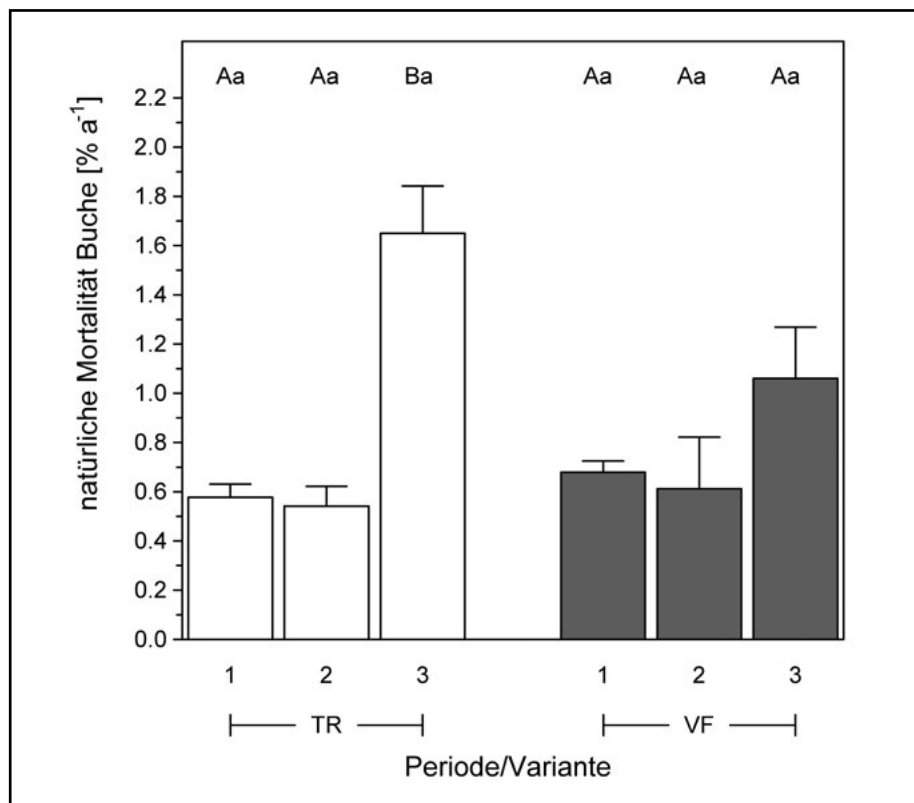


Abb. 6: Mittelwerte und Obergrenze des 95 %-Konfidenzintervalls der natürlichen Mortalitätsraten der Buche in den Untersuchungsperioden und Varianten (TR: Totalreservat, VF: bewirtschaftete Vergleichsfläche). Zur Bedeutung der Buchstaben s. Abb. 5. (Grafik: NW-FVA)

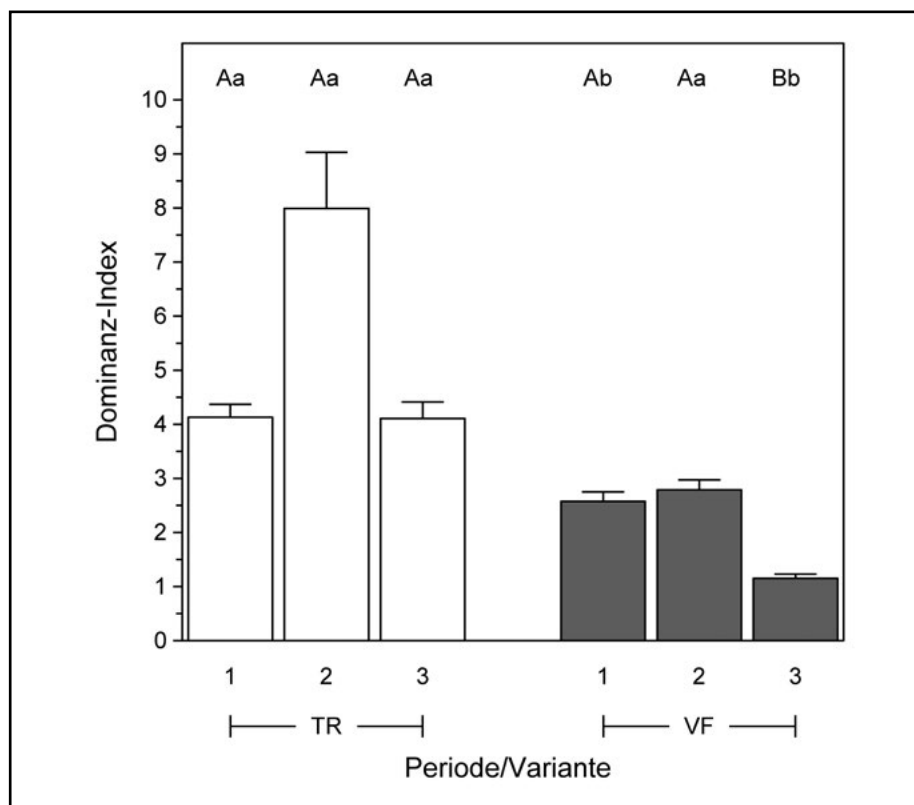


Abb. 7: Mittelwerte und Obergrenze des 95 %-Konfidenzintervalls des Dominanz-Index der natürlich abgestorbenen Buchen in den Untersuchungsperioden und Varianten (TR: Totalreservat, VF: bewirtschaftete Vergleichsfläche). Zur Bedeutung der Buchstaben s. Abb. 5. (Grafik: NW-FVA)

sche oder eher unterdrückte Bäume absterben. Ein Dominanz-Index über eins steht für eher unterdrückte, ein Index unter eins für eher herrschende Bäume. Abb. 7 zeigt, dass in den ersten beiden Perioden überwiegend unterdrückte Bäume abgestorben sind. Signifikant ist der niedrige Dominanzindex in der dritten Periode auf den Vergleichsflächen, der auf das vermehrte Absterben herrschender Bäume hinweist. Verschiedene Modellansätze zur Aufklärung der Mortalitätsursachen (Details s. MEYER et al. 2022) konnten keinen klaren Zusammenhang zwischen Mortalität und standörtlichen Gegebenheiten finden. Allerdings ließ sich nachweisen, dass die natürliche Sterbewahrscheinlichkeit mit einem höheren Defizit der klimatischen Wasserbilanz in der Vegetationszeit und einer geringeren sozialen Stellung des Einzelbaums ansteigt. Auch die Höhe der entnommenen Grundfläche (als Maß für die Eingriffsstärke) steht mit erhöhter Mortalität in Verbindung, der Einfluss ist jedoch eher unbedeutend.

Standörtliche Einordnung der Befunde

Unsere Ergebnisse können als repräsentativ für die hessischen Buchenwälder gelten, da die untersuchten Gebiete etwa 96 % der Standortbedingungen des hessischen Waldes hinsichtlich Bodenwasserhaushalt und Nährstoffverfügbarkeit abbilden. Im Vergleich zu trockeneren Regionen Deutschlands (SCHULDT et al. 2020, OBLADEN et al. 2021) blieb die Mortalität während der Dürrejahre 2018/19 gering. Unsere Ergebnisse liegen nahe an der im hessischen Waldzustandsbericht genannten Absterberate von 0,3 % für die Jahre 2018/19 (PAAR et al. 2020). Zur Einordnung der Ergebnisse muss berücksichtigt werden, dass flachgründige, skelettreiche Standorte, wie sie häufig in Muschelkalkgebieten vorkommen, in Hessen eher selten sind. Beobachtungen, dass Buchenbestände auf flachgründigen Kalkböden bei Absterbewellen stärker betroffen sind, wurden spätestens seit Mitte des 19. Jahrhunderts publiziert (LAUPRECHT 1868, WAGENHOFF & WAGENHOFF 1975). Aus Kurhessen wurde während des Dürreereignisses Ende der 1850er Jahre berich-

tet, dass Trocknisschäden an Buchen auf trockeneren Kuppen und Höhenrücken am größten seien, an den unteren Hängen nur wenig und in den Tallagen hingegen gar nicht bemerkt würden (ANONYMUS 1858). Nach flächigen Absterberscheinungen im Kleinen Odenwald 1947 formuliert SAUER (1952), dass der Buchenwald zwar das Ideal auf Muschelkalk sei, denn „Boden und Holzart“ gewährten sich „gegenseitig am reichsten, was beide am meisten bedürfen: Schatten und Nahrung“ (Umstellung im Zitat). Der Autor fügt jedoch hinzu, dass ohne ausreichende Gründigkeit des Bodens die Buchen im „Oberholz“ in Dürrejahren vertrockneten, im Unterstand jedoch unentbehrlich seien.

Buchensterben und Waldbau

Nicht nur standörtliche Fragen alleine, sondern auch Fragen des Buchen-Waldbaus in Abhängigkeit vom Standort werden bereits seit langer Zeit in Fachkreisen diskutiert. So widmete Friedrich Ludwig von Witzleben, damals kurhessischer Forstmeister in Kassel, in seiner 1805 erschienenen Schrift „Ueber die rechte Behandlung der Rothbuchen-Hoch- oder Samen-Waldung“ ein ausführliches Kapitel den Fehlern bei der Behandlung von Buchenbeständen und wie diese zu Folgeschäden führen (WITZLEBEN 1805). Eine zentrale Frage der heutigen Zeit ist, inwieweit das Kronendach möglichst geschlossen bleiben sollte, um das Mikroklima zu erhalten, oder ob durch eine intensive Durchforstung die Einzelbaumstabilität erhöht werden müsste (vgl. BRÉDA et al. 1995, SOHN et al. 2016).

Grundsätzlich zeichnen sich Buchen durch ein hohes Anpassungsvermögen an veränderte Standortbedingungen aus. Auf frei gewordenen Wuchsraum reagieren sie in der Regel schnell, verstärken ihr Dickenwachstum und vergrößern ihre Kronen (DIELER & PRETZSCH 2013). Die bisher vorliegenden Untersuchungen stimmen darin überein, dass Durchforstungen die Dürretoleranz erhöhen (GERHARDT et al. 2016, DIACONU et al. 2017). Sie werden daher zur Verbesserung der Widerstandsfähigkeit gegenüber Trockenstress empfohlen (SOHN et al. 2016, DIACONU et al. 2017). Die waldbaulich

geförderten Bäume können umfangreichere Wurzelsysteme entwickeln und damit ihre Wasserversorgung während und nach Dürreperioden sichern (AUSSENAC & GRANIER 1988, MISSON et al. 2003). Zudem erholt sich das Wachstum der im Rahmen von stärkeren Durchforstungen geförderten Buchen rascher und vollständiger als das von solchen Bäumen, die in weniger stark durchforsteten Beständen erwachsen sind (GERHARDT et al. 2016). Buchen mit niedrigeren Wachstumsraten, wie sie typisch bei intensiver Konkurrenz durch Nachbarbäume sind, haben hingegen ein erhöhtes Absterberisiko (GILLNER et al. 2013). Das bestätigen auch unsere Ergebnisse in den dicht bestockten Totalreservaten.

Insbesondere in älteren Beständen kann sich die Auflichtung des Kronendachs allerdings auch negativ auf den Wasserhaushalt der Einzelbäume auswirken. Es entspricht dem waldbaulichen Erfahrungswissen, dass ältere, vormals geschlossene Buchenwälder auf starke und rasche Auflichtungen oftmals mit Rinden- oder Sonnenbrand, einer schütterten Belaubung und Absterberscheinungen reagieren (BORGGREVE 1891, HESS 1900, MAYER 1984). Das Mikroklima wird durch erhöhte Sonneneinstrahlung verändert und stärkere Windbewegungen im Kronendach erhöhen den Wasserverlust durch Transpiration. Dies geschieht insbesondere kurz nach der Holzernte (BROOKS & MITCHELL 2011). Bei älteren Bäumen mit großen Kronen und ho-

hem Wasserbedarf kann diese zusätzliche Transpirationsbelastung durch das bestehende Wurzelwerk nicht immer ausreichend bedient werden und so zum Versagen der Wasserversorgung des Baumes führen (HERBETTE et al. 2010). Dieser Effekt ist vermutlich ausschlaggebend für die von uns festgestellte Verlagerung der natürlichen Mortalität auf stärkere Bäume in den bewirtschafteten Beständen.

Diese differenzierten Befunde stehen im Einklang mit den Ergebnissen von THURM et al. (2022), die den Ursachen der seit 2019 auftretenden Vitalitätsschwächung von Buchen in Mecklenburg-Vorpommern nachgingen. Die Autoren halten fest, dass mehrere Faktoren prädisponierend für Trockenstress wirken und empfehlen, durch starke Jugenddurchforstungen (bis max. 80 Jahre) und vorsichtige Eingriffe in höherem Alter Schäden vorzubeugen. Besonderer Forschungsbedarf bestehe jedoch mit Blick auf die meist langen Verjüngungszeiträume, da gering bestockte Altbestände in der Phase der Naturverjüngung besonders anfällig bei Hitze und Trockenheit seien.

Neben Dürre, Konkurrenz und der waldbaulichen Vorgeschichte spielen Pathogene eine wichtige Rolle beim Absterben von Buchen. Insbesondere bei komplexen Buchenschäden bestehen wesentliche Unsicherheiten darüber, wie die einzelnen Faktoren zusammenwirken (LANGER 2019, LANGER et al. 2020). Eine wesentliche Rolle spielen zudem zeitliche Koinziden-



Abb. 8: Abgestorbene unterständige Buche im Naturwald Totenberg (Totalreservat) im Bramwald, Südniedersachsen (Foto: P. Meyer)

zen. In der ersten Vegetationsperiode nach einem forstlichen Eingriff ist die Sensitivität der Bestände größer als in den Folgejahren. Diese waldbauliche Erfahrung wird auch durch die Ergebnisse der Inventuren in hessischen Naturwaldreservaten gestützt (MAYER 1984, SCHMIDT et al. 2019).

Schlussfolgerungen und Ausblick

Dem visuellen und oft individuellen Eindruck nach zeigten sich die dürrebedingten Schäden in Buchenbeständen mancherorts in dramatischem Ausmaß. Tatsächlich sind flächige und schwere Schäden in Hessen eher selten. Unsere Untersuchung zeigt weder ein dramatisches Absterben noch einen negativen Einfluss der Waldbewirtschaftung auf die Sterblichkeitsrate. Allerdings ist das Absterberisiko für ältere Bäume des Hauptbestandes in bewirtschafteten Beständen tendenziell erhöht. In Totalreservaten sterben zwar mehr Bäume ab, dies betrifft aber eher unterdrückte Bäume, die der verschärften Konkurrenz durch Nachbarbäume in Dürrejahren nicht mehr gewachsen sind (Abb. 8). Das Zusammenwirken der zahlreichen Einflussfaktoren auf Buchenschäden und Baummortalität ist komplex und bisher nur zum Teil verstanden. Nach derzeitigem Wissensstand ist zu empfehlen, nach Dürreereignissen keine stärkeren Eingriffe in überwiegend geschlossenen Altbeständen vorzunehmen. Unsere Untersuchung zur Mortalität der Buche in hessischen Naturwaldreservaten wird fortgesetzt, um auch die längerfristigen Effekte der Dürre aufzudecken.

Kontakt

Tobias Hoppmann, Dr. Andreas Mölder,
Dr. Peter Meyer
Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt
Abteilung Waldnaturschutz
Prof.-Oelkers-Straße 6
34346 Hann. Münden
Tobias.Hoppmann@nw-fva.de
Andreas.Moelder@nw-fva.de
Peter.Meyer@nw-fva.de
www.nw-fva.de

Literatur

- ANONYMUS (1858): [Briefe] Marburg in Kurhessen, im November 1857 (Witterung des Sommers 1857. Einfluß der Dürre auf den Holzwuchs. Fouragemangel. Waldbränne. Holzverwertung.). Allg. Forst-Jagdztg. 34: 105–108.
- ANONYMUS (1860): [Briefe] Marburg in Kurhessen, im Oktober 1860 (... Dürre der Sommer in den Jahren 1858 und 1859...). Allg. Forst- Jagdztg. 36: 485–487.
- AUSSENAC, G.; GRANIER, A. (1988): Effects of thinning on water stress and growth in Douglas-fir. Can. J. For. Res. 18(1): 100–105, DOI: 10.1139/x88-015
- BORGGREVE, B. (1891): Die Holzzucht – Ein Grundriss für Unterricht und Wirtschaft. 2. Aufl. Berlin. 363 S.
- BRÉDA, N.; GRANIER, A.; AUSSENAC, G. (1995): Effects of thinning on soil and tree water relations, transpiration and growth in an oak forest (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.). Tree Physiol. 15(5): 295–306, DOI: 10.1093/treephys/15.5.295
- BROOKS, J. R.; MITCHELL, A. K. (2011): Interpreting tree responses to thinning and fertilization using tree-ring stable isotopes. New Phytol. 190(3): 770–782, DOI: 10.1111/j.1469-8137.2010.03627.x
- DIACONU, D.; KAHLE, H.-P.; SPIECKER, H. (2017): Thinning increases drought tolerance of European beech: a case study on two forested slopes on opposite sides of a valley. Eur. J. For. Res. 136(2): 319–328, DOI: 10.1007/s10342-017-1033-8
- DIELER, J.; PRETZSCH, H. (2013): Morphological plasticity of European beech (*Fagus sylvatica* L.) in pure and mixed-species stands. For. Ecol. Manage. 295: 97–108, DOI: 10.1016/j.foreco.2012.12.049
- GERHARDT, M.; KOHLER, M.; SOHN, J.; BAUHUS, J. (2016): Kann die Trockenstresstoleranz von Buchen über Durchforstungseingriffe erhöht werden? Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, Karlsruhe. 38 S.
- GILLNER, S.; RÜGER, N.; ROLOFF, A.; BERGER, U. (2013): Low relative growth rates predict future mortality of common beech (*Fagus sylvatica* L.). For. Ecol. Manage. 302: 372–378, DOI: 10.1016/j.foreco.2013.03.032
- HERBETTE, S.; WORTEMANN, R.; AWAD, H.; HUC, R.; COCHARD, H.; BARIGAH, T. S. (2010): Insights into xylem vulnerability to cavitation in *Fagus sylvatica* L.: phenotypic and environmental sources of variability. Tree Physiol. 30(11): 1448–1455, DOI: 10.1093/treephys/tpq079
- HESS, R. (1900): Der Forstschutz. Zweiter Band: Der Schutz gegen Laubholzinsekten, Forstunkräuter, Pilze, atmosphärische Einwirkungen und außerordentliche Naturereignisse. 3. vermehrte und verbesserte Auflage. Leipzig. 608 S.
- LANGER, G. (2019): Komplexe Erkrankungen bei älteren Rotbuchen. AFZ/Wald 74(24): 30–33.
- LANGER, G.; BUSSKAMP, J.; LANGER, E. J. (2020): Absterbeerscheinungen bei Rotbuche durch Trockenheit und Wärme. AFZ/Wald 75(4): 24–27.
- LAUPRECHT, G. (1868): Ein Buchen-Plänterwald. Krit. Bl. Forst- Jagdwiss. 51(1): 206–219.
- MAYER, H. (1984): Waldbau auf soziologisch-ökologischer Grundlage. 3. Aufl. Stuttgart, New York. 522 S.
- MEYER, P.; BRÖSSLING, S.; BEDARFF, U.; SCHMIDT, M.; FRICKE, C. (2018): Monitoring von Waldstruktur und Vegetation in hessischen Naturwaldreservaten. Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt, Göttingen. 63 S.
- MEYER, P.; SPÏNU, A. P.; MÖLDER, A.; BAUHUS, J. (2022): Management alters drought-induced mortality

patterns in European beech (*Fagus sylvatica* L.) forests. Plant Biol. 24, DOI: 10.1111/plb.13396

MISSON, L.; NICAULT, A.; GUIOT, J. (2003): Effects of different thinning intensities on drought response in Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.). For. Ecol. Manage. 183(1): 47–60, DOI: 10.1016/S0378-1127(03)00098-7

NW-FVA; HMUKLV (Hrsg.) (2021): Waldzustandsbericht 2021 für Hessen. Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (NW-FVA) und Hessisches Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (HMUKLV), Göttingen und Wiesbaden. 44 S.

OBLADEN, N.; DECHERING, P.; SKIADARESI, G.; TEGEL, W.; KESSLER, J.; HÖLLERL, S.; KAPS, S.; HERTEL, M.; DULAMSUREN, C.; SEIFERT, T.; HIRSCH, M.; SEIM, A. (2021): Tree mortality of European beech and Norway spruce induced by 2018–2019 hot droughts in central Germany. Agric. For. Meteorol. 307: 108482, DOI: 10.1016/j.agrfor.2021.108482

PAAR, U.; DAMMANN, I.; WEYMAR, J.; SPIELMANN, M.; EICHHORN, J. (2020): Waldzustandsbericht 2020. Hessisches Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, Wiesbaden. 39 S.

SAUER, E. (1952): Erfahrungen in der waldbaulichen Behandlung von Muschelkalkböden unter besonderer Berücksichtigung flachgründiger Standorte. Allg. Forst- Jagdztg. 127(8): 235–244.

SCHMIDT, M.; DIETZ, M.; EVERS, J.; HÖVELMANN, T.; PAAR, U.; SCHILLING, T.; MEYER, P. (2019): Hessische Naturwaldreservate im Portrait: Waldgebiet östlich Oppershofen. Hessische Naturwaldreservate im Portrait 14: 1–35.

SCHULDT, B.; BURAS, A.; AREND, M.; VITASSE, Y.; BEIERKUHNLEIN, C.; DAMM, A.; GHARUN, M.; GRAMS, T. E. E.; HAUCK, M.; HAJEK, P.; HARTMANN, H.; HILTBRUNNER, 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(6): 86–103, DOI: 10.1016/j.baec.2020.04.003

SOHN, J. A.; SAHA, S.; BAUHUS, J. (2016): Potential of forest thinning to mitigate drought stress: a meta-analysis. For. Ecol. Manage. 380: 261–273, DOI: 10.1016/j.foreco.2016.07.046

THURM, E. A.; JANSEN, M.; JÜTTE, K.; MARTIN, J.; VOTH, W.; WIRNER, M.; GEHLHAR, U. (2022): Die Buchenvitalitätsschwäche in Mecklenburg-Vorpommern. AFZ/Wald 77(11): 19–23.

UBA (Hrsg.) (2022): Trockenheit in Deutschland – Fragen und Antworten. Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/trockenheit-in-deutschland-fragen-antworten>, aufgerufen am 27. Juli 2022.

WAGENHOFF, A.; WAGENHOFF, E. (1975): Verlauf und Auswirkungen des Buchenrindensterbens im Forstamt Bovenden in den Jahren 1959 bis 1965. Aus d. Walde 24: 110–168.

WAGNER, M.; SUTMÖLLER, J.; MEESENBERG, H.; EICHHORN, J. (2015): Trockenstresstisiko der Buche in Hessen. In: Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt; Hessisches Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (Hrsg.): Waldzustandsbericht 2015 für Hessen. Göttingen, Wiesbaden, S. 22–23.

WITZLEBEN, F. L. VON (1805): Ueber die rechte Behandlung der Rothbuchen-Hoch- oder Samen-Waldung. 2. Aufl. Leipzig. 190 S.