



Einfluss des Klimawandels auf pilzliche und komplexe Erkrankung von Waldbäumen

Gitta Jutta Langer

Einleitung Pilze

Echte Pilze (*Eumycota*) gehören zum Reich der Pilze (*Fungi*) und umfassen eukaryotische, ein oder vielzellige Organismen. Wie Tiere sind sie heterotroph und ernähren sich durch die Aufnahme von organischen Substanzen, die sie in gelöster Form aus der Umgebung aufnehmen. Sie wachsen entweder als Hefen oder fädig (trichal), mit langgestreckten Zellen (Hyphen) und bilden Myzelien (Thalli) sowie Pseudogewebe in ihren Fruchtkörpern aus. Chemisch lassen sich Pilze durch ihre Zellwandbestandteile wie Chitin ^[1] charakterisieren. Im Gegensatz zu Pflanzen fehlt ihnen das Polysaccharid Cellulose ^[2]. Als Reservestoffe dienen ihnen Speicherkohlenhydrate wie Zuckeralkohole, Disaccharide oder Polysaccharide (z. B. Glykogen). Zu den Echten Pilzen gehören unter anderen die *Glomeromycota* (u. a. Arbuskuläre Mykorrhizapilze) und die *Dikarya*. Letztere umfassen Schlauchpilze (*Ascomycota*) und Ständerpilze (*Basidiomycota*). Nicht zu den Pilzen gehören pilzähnliche Organismen wie die Echten Schleimpilze (*Eumycetozoa*) oder die *Pseudofungi*, zu denen *Phytophthora*-Arten zugeordnet werden ^[3].

Die klassische Einteilung pilzlicher Lebensweisen in Symbionten (z. B. Flechten, Mykorrhiza), Parasiten (z. B. Brand- und Rostpilze) und Saprobionten (Abbauer von abgestorbenem Material) wurde um die Endophyten ergänzt. Als Endophyten werden solche Pilze betrachtet, die einen erheblichen Teil ihres Lebenszyklus im Gewebe ihrer Wirtspflanze verbringen ohne dort Symptome zu verursachen ^[4-7]. Veränderungen

von Umweltbedingungen können eine Änderung der Lebensweise von endophytisch zu pathogen^[7] oder zu saprob bewirken^[8]. Endophytische Pilze können bei für sie günstigen Bedingungen, wenn zum Beispiel ihr Wirtsbaum unter Stress gerät oder hohe Sommertemperaturen vorliegen, zu einer pathogenen Lebensweise übergehen^[9,10]. Viele pilzliche Krankheitserreger, abgesehen von obligaten Parasiten (z. B. Rostpilze), können neben ihrer parasitischen, phytopathogenen Phase auch eine endophytische Lebensphase aufweisen. Sie werden daher auch als latente Pathogene bezeichnet. Manche dieser Pilze können in einer Baumart nur endophytisch vorkommen und in einer anderen Baumart pathogen sein.^[8,11,12]

Haupttreiber für Erkrankungen der Waldbäume

Eine Pflanzen- bzw. Baumkrankheit kann als eine Funktionsstörung von Wirtszellen und -geweben der Pflanze, die aus einer anhaltenden Reizung durch einen Krankheitserreger oder einen Umweltfaktor resultiert und zur Entwicklung von Symptomen führt, definiert werden^[55]. Als krank gelten Pflanzen, die anormale Veränderungen der Form, Physiologie, Integrität oder des Verhaltens aufweisen. Diese Veränderungen können zu einer teilweisen Schädigung oder zum Absterben der Pflanze oder ihrer Teile (Kompartimente) führen. Neben abiotischen Faktoren wie Wind, Trockenheit und Feuer sind auch biotische Faktoren wie Insekten und Mikroorganismen für das Absterben von Bäumen und deren Erkrankungen verantwortlich. Vereinfacht können Pflanzenkrankheiten als komplexe Interaktionen zwischen Pflanzen, Pflanzenpathogenen oder Schädlingen und ihrer Umwelt beschrieben^[13] und im sogenannten Krankheitsdreieck^[11,14–16] dargestellt werden. Treffen mindestens folgende drei Faktoren zusammen, 1) das Vorhandensein eines Krankheitserregers, 2) eine anfällige Wirtspflanze und 3) geeignete Umweltbedingungen, kann eine Erkrankung ausgelöst werden. Pilzkrankheiten gehören zu den wichtigsten Faktoren, die die Gesundheit der Bäume beeinträchtigen. Krankheitsprozesse werden häufig durch Pilze, die holzige Gewebe von Bäumen besiedeln, ausgelöst. Da viele pilzliche Pathogene auch eine endophytische, latente Phase haben können, ergänzten Schulz und Boyle (2005)^[17] das grundlegende Konzept des Krankheitsdreiecks um die Hypothese des „Endophytischen Kontinuums“. Letzteres bedeutet, dass ein Gleichgewicht des

Antagonismus zwischen der Virulenz eines pilzlichen Endophyten oder latenten Pathogens und der Abwehrreaktion der Pflanze zu einer asymptomatischen Besiedlung der Wirtspflanze führt.

Grundlegende Konzepte für komplexe Krankheiten von Bäumen und Sträuchern wurden schon von Sinclair, Lyon und Johnson (1987) ^[18] und Manion (1981 und 1991) ^[11,14] erarbeitet. Manion (1991) ^[14] hat dies sehr eindrücklich in seiner „Disease decline spiral“ („Spirale des Todes“) skizziert. Entscheidend im Erkrankungsprozess sind dabei prädisponierende, auslösende und begleitende bzw. nachfolgende Faktoren. Faktoren, die einen Baum für eine Erkrankung prädisponieren, können entweder biotisch oder abiotisch sein und den Wirtsbaum unter Stress setzen oder vorschädigen. Auch der Wirtsbaum selbst kann in seiner Fähigkeit eingeschränkt sein, auf günstige Umweltfaktoren zu reagieren. Hat der auslösende Faktor (z. B. Wassermangel) einen Krankheitsprozess in Gang gesetzt, können opportunistische Pathogene (z. B. Rinden- oder Holzfäulepilze) und sekundäre Insekten den Schadensverlauf beschleunigen und irreversibel machen. Die chronische und kumulative Wirkung verschiedener Schadfaktoren und ihrer Schadsymptome kann schließlich zum irreversiblen Absterben einzelner Baumkompartimente oder des gesamten Baumes führen. Selbst wenn der anfänglich, auslösende Stressfaktor (z. B. Hitze und Dürre) verschwindet, können die sekundären Faktoren (z. B. holzerstörende Pilze sowie rinden- und holzbrütende Insekten) die fortschreitenden Absterberscheinungen aufrechterhalten ^[18].

Die bei vielen holzerstörenden Pilzen nachgewiesene vorübergehende endophytische, latente Lebensweise ^[7,19–22] dient wahrscheinlich der Vorbereitung auf das spätere saprobiontische Lebensstadium ^[70,71]. Ein Beispiel hierfür ist der Zunderschwamm (*Fomes fomentarius* (L.) Fr) ^[23]. Dieser Weißfäulepilz ist in den Laubwäldern der Nordhemisphäre weit verbreitet und befällt vornehmlich Rotbuchen und Birken. Er besiedelt als Xylem-Endophyt über die Leitgefäße das Holz lebender Bäume und führt später als Parasit und Zersetzer zur Holzfäule ^[7,22].

Neben dem Welthandel wird der Klimawandel bzw. die Klimaveränderung als wichtigste Triebkraft und Hauptursache für das Auftreten neuer Pilzkrankheiten an Bäumen angesehen. Weitere wichtige Treiber sind das Auftreten von invasiven,

gebietsfremden Arten, Quarantäneschädlingen, neuen virulenteren oder aggressiveren, latenten und kryptischen Pilzen, neuen Pilzhybriden sowie die Bildung neuer Pathogen-Vektor-Kombinationen, der Anbau neuer Waldbaumarten und Änderungen in der Waldbewirtschaftung ^[24].

Klima – Witterung als auslösende Faktoren für Erkrankungen an Bäumen

Der Begriff Klimawandel wird oft mit dem aktuellen Schlagwort „globale Erwärmung“ gleichgesetzt. Grundsätzlich sind unter „Klimawandel“ jedoch die langfristigen Veränderungen der Temperaturen und Wettermuster auf der Erde zu verstehen, so das Regionale Informationszentrum der Vereinten Nationen (UNRIC) (<https://unric.org/de/klimawandel/>). Klimawandel beschreibt sowohl die Erwärmung als auch die Abkühlung des Klimas auf der Erde über einen langen Zeitraum seit ihrer Entstehung vor 4,6 Milliarden Jahre ^[25,26]. Die globale Bodenoberflächentemperatur der Erde sank bis vor 1,2 Millionen Jahren und verblieb seitdem unterbrochen von kurzfristigen Schwankungen auf einem stabilen Niveau. Warm- und Eiszeiten wechselten sich in der Erdgeschichte mehrfach ab und aktuell befinden wir uns in einer Warmzeit der jüngsten Eiszeit, die vor 2,6 Millionen Jahren begonnen hat. Warmzeiten wie das „Optimum der Römerzeit“ und Kaltphasen wie vor 100 000 Jahren, bei denen weite Teile Europas vergletschert waren oder die sogenannte „Kleine Eiszeit“ nach dem Mittelalter stellen dabei erdgeschichtlich nur kurzfristige Schwankungen dar ^[27].

Der Begriff Klima als Wettergesamtheit ^[28] ist nicht mit den Bezeichnungen Wetter und Witterung zu verwechseln, denn er beschreibt nach dem zwischenstaatlichen Ausschuss für Klimaänderungen (Intergovernmental Panel on Climate Change = IPCC) das durchschnittliche Wetter mit den Klimaelementen (z. B. Temperatur, Niederschlag, Sonnenscheindauer, Strahlung und Wind) im Bereich von Monaten bis zu Tausenden oder Millionen von Jahren. Der Deutsche Wetterdienst (DWD) definiert den Begriff Klima jedoch enger als „die Zusammenfassung der Wettererscheinungen, die den mittleren Zustand der Atmosphäre an einem bestimmten Ort oder in einem mehr oder weniger großen Gebiet“ beschreibt ^[29]. Als Zeitraum zur Erfassung des

Klimas und seiner Änderungen wird von der Weltorganisation für Meteorologie (WMO) eine statistische Auswertung der Klimatelemente über 30 Jahre empfohlen. Witterung hingegen beschreibt atmosphärische Prozesse über einen Zeitraum von bis zu einer Woche, seltener einem Monat oder einer Jahreszeit. Wetter beschreibt diese Vorgänge in einem Zeitrahmen von Stunden bis wenigen Tagen in einem bestimmten Gebiet ^[29]. Zur Bewertung des Klimawandels wird als Standard die WMO-Referenzperiode bzw. Klimanormalperiode 1961-1990 verwendet und mit Messdaten der jüngeren Zeit verglichen. Klimaveränderungen können sowohl auf natürliche (z. B. Schwankungen in der Sonnenaktivität) als auch auf menschliche Einflüsse zurückgeführt werden. So kann das natürliche Gleichgewicht des Weltklimasystems durch die Emission anthropogener Treibhausgase (z. B. CO₂, Methan) gestört werden ^[30]. Klimawandel wird daher aktuell meist als Auswirkung menschlicher Tätigkeiten, insbesondere der Verbrennung fossiler Brennstoffe wie Kohle, Erdöl und Erdgas, seit dem 19. Jahrhundert diskutiert. Klimaveränderungen wirken sich auf die Ökosysteme unserer Erde aus, da sie zum Beispiel Veränderung der Niederschlagsverteilung oder eine Verschiebung von Vegetationszonen oder Verbreitungsarealen von Organismen verursachen können.

Für den Sachstandsbericht des IPCC wurden verschiedene Emissions- und Landnutzungsszenarien, so genannte „repräsentative Konzentrationspfade“ (RCPs) ^[31], berechnet, um die Klimatrends der nächsten Jahrzehnte und Jahrhunderte unter Berücksichtigung des menschlichen Einflusses und der Treibhausgaskonzentrationen abzuschätzen. Zwei der meist diskutierten Szenarien sind das RCP2.6 („Klimaschutz-Szenario“) und das RCP8.5 („Weiter-wie-bisher-Szenario“). RCP2.6 zeigt eine Entwicklung der Welt auf, bei der die Klimaerwärmung global auf unter 2 °C gegenüber dem vorindustriellen Temperaturniveau beschränkt wird. RCP8.5 beschreibt eine Klimaentwicklung, wenn die Energieversorgung der Welt im Wesentlichen weiterhin auf der Nutzung fossiler Energie basiert ^[32]. Viele dieser berechneten Klimaszenarien haben gemeinsam, dass in Mitteleuropa ein Anstieg der Temperaturen zu erwarten ist, welcher zu wärmeren Sommern, wärmeren/milderen Wintern und zu verlängerten Vegetationsperioden führt. Zudem soll eine veränderte Niederschlagsverteilung zu trockeneren Sommern und feuchteren Wintern führen. Außerdem wird die Wahr-

scheinlichkeit für häufiger auftretende Witterungsextreme wie Dürre, Starkregen oder Stürme erhöht ^[32-35].

Als Folge der globalen Erwärmung ist auch in Deutschland ein allgemeiner Trend zu höheren Temperaturen zu beobachten ^[36,37]. Die absolute Jahresmitteltemperatur nach der Berkeley-Earth-Mittelungsmethode lag in Deutschland bei 8,3 °C. Seit Beginn der Witterungsaufzeichnungen 1881 ist die Jahresmitteltemperatur der Luft in Deutschland bis 2021 statistisch abgesichert um 1,6 Grad angestiegen ^[30]. Seit 2018 waren die Jahre bis 2023, abgesehen von 2021, von Witterungsanomalien und extremer Hitze- und teilweise Dürreperioden gezeichnet ^[38,39]. Das Jahr 2023 war mit einer Mitteltemperatur von 10,6 °C das wärmste in Deutschland aufgezeichnete Jahr seit 1881 ^[40], gefolgt von den Jahren 2018 und 2022 mit einer Mitteltemperatur von 10,5 °C ^[36,39], 2020 mit 10,4 °C ^[38] und 2019 mit 10,3 °C ^[37]. Im Vergleich zur internationalen Referenzperiode 1961-1990 war die Jahresmitteltemperatur 2018 um 2,4 Grad höher ^[36]. Die Jahre 2018 bis 2020 waren zudem durch eine ausgeprägte Frühjahrstrockenheit gekennzeichnet ^[38], die zusammen mit den außergewöhnlichen Witterungsbedingungen in den meisten Monaten zu Defiziten bei der Bodenfeuchte und der Wasserspeicherung im Wurzelraum führte ^[41,41,42]. Nach Angaben des DWD lag die Jahresniederschlagssumme 2018 in Deutschland bei 590 l/m² mit regionalen Schwankungen zwischen 250 und 1800 l/m². Die Niederschlagssumme im Jahr 2018 betrug daher deutschlandweit nur 75 % des langjährigen Mittels (789 l/m²) bezogen auf den Referenzzeitraum. Im Allgemeinen können Trockenstressperioden für Pflanzen und Bäume und die damit verbundenen negativen Auswirkungen auf Wachstum und Gesundheit länger andauern als die meteorologische Bodentrockenheit, die sie verursacht. ^[41,42].

Die Verbreitung und das Wachstum pilzlicher Schadorganismen ^[19,43] sowie das Auftreten von pilzlichen und komplexen Krankheiten an Wald- und Parkbäumen ^[44-49] werden durch häufiger auftretende hohe Temperaturen und längere Trockenperioden als Folge des Klimawandels begünstigt. Der durch die außergewöhnlichen Witterungsbedingungen in den Jahren 2018 bis 2020 entstandene Wassermangel im Boden hat zu Stresserscheinungen, Vitalitätsverlusten sowie Pilz- und Komplexkrankheiten bei Waldbäumen geführt ^[21,50-55]. Die Folgen waren Wachstumsrückgang ^[56,57],

frühzeitiger Blattabwurf und -verfärbung sowie großflächige Kronenverlichtung [21,48,58–61]. Bei Erkrankungsprozessen spielten Rinden-, Triebsterben- und Holzfäulepilze eine erhebliche Rolle und waren wichtige Faktoren bei der Verminderung der Stand- und Bruchsicherheit von Bäumen [48,49,55]. Auch der Bergahorn (*Acer pseudo-platanus* L.) zeigte ebenso, wie die in Deutschland am häufigsten vorkommenden Waldbaumarten (Rotbuche (*Fagus sylvatica* L.), Eichen (*Quercus* spp.), Gemeine Waldkiefer (*Pinus sylvestris* L.) und Gemeine Fichte (*Picea abies* (L.) H. Karst.)), auch in anderen Teilen Europas eine erhöhte Mortalität [56,62–66]. Die betroffenen Bäume wiesen meist eine intensive Holzfäule im Stamm- und Kronenbereich auf und es konnte ein plötzliches Absterben von Ästen und Kronenteilen beobachtet werden [48,66]. Oftmals kam es zum Ausbrechen noch belaubter Äste, dem sogenannten Grünholzbruch bzw. Sprödbbruch [48,66,67]. Eine besondere Rolle spielten dabei wärmeliebende Pilze aus der Verwandtschaft der Holzkeulenartigen (*Xylariales*), wie zum Beispiel *Biscogniauxia nummularia* (Bull.) Kuntze (Pfenning-Kohlenkruste, Rotbuchen- oder Münzenförmiger Rindenkugelpilz, **Abb. 1c-f**) [48,68], *Jackrogersella cohaerens* (Pers.) L. Wendt, Kuhnert & M. Stadler (Zusammengedrängte oder Schwarze Buchenkohlenbeere) [46] oder *Cryptostroma corticale* (Ellis & Everh.) P.H. Greg. & S. Waller (**Abb. 1g-i**) [54,69]. Diese parasitären, holzabbauenden *Xylariales* besiedeln ihre lebenden Wirtsbäume, können aber nach der Infektion zunächst in einem endophytischen Stadium im Holzgewebe überdauern. Eine Erklärung hierfür könnte sein, dass sich holzabbauenden Pilze durch ihr endophytisches Stadium ihre Nische im Wirt sichern, bevor die Holzersetzung beginnt [20,70]. Die frühen Stadien der Holzfäule werden meist durch endophytische Ascomycota, die in ihre parasitische Phase übergehen, eingeleitet [20]. Oft sind dies Moderfäulepilze, die Zellulose in holzigen Geweben enzymatisch abbauen und innerhalb von Zellwänden ihrer Wirte wachsen [71]. Sie können Holz unter Bedingungen besiedeln, die zu nass, heiß, kalt oder zu sauerstoffarm für Braun- oder Weißfäulepilze sind [72]. Danach folgt das Wachstum von Basidiomyceten, wie Weißfäule- und/oder Braunfäulepilzen und anderer *Ascomycota* [73].

Aktuelle pilzliche und komplexe Erkrankungen in Nordwestdeutschland

Diplodia-Triebsterben der Koniferen

Bei vielen Koniferenarten kann Diplodia-Triebsterben durch *Diplodia sapinea* (Fr.) Fuckel ≡ *Sphaeropsis sapinea* (Fr.) Dyko & B. Sutton (**Abb. 1a-b**) hervorgerufen werden ^[74]. *Diplodia sapinea* hat eine weltweite Verbreitung mit bevorzugtem Vorkommen in wärmeren Klimaten. Diese Schlauchpilzart aus der Verwandtschaft der *Botryosphaeriales* wurde erstmals 1823 in Europa beschrieben ohne jedoch als bedeutender Schaderreger aufzutreten. Seit längerem sind allerdings massive Schäden verursacht durch diesen Pilz in Kiefernplantagen auf der Südhalbkugel bekannt ^[75–77]. In Mitteleuropa werden Schäden durch das Diplodia-Triebsterben seit den 1980er und 1990er Jahren, besonders an Schwarzkiefer (*Pinus nigra* J.F.Arnold) und Gemeiner Waldkiefer, verzeichnet ^[78]. In Deutschland wird ein verstärktes Auftreten dieser komplexen Erkrankung seit den 1990er Jahren verzeichnet ^[79]. Seit den Hitze- und Trockenjahren ab 2018 wurden durch sie verursachte Absterbeerscheinungen von Einzelbäumen bis hin zu ganzen Kiefernbeständen beobachtet (**Abb. 1 a.**). Bußkamp et al. 2020 zeigten, dass dieses Pathogen in Deutschland weit verbreitet ist und nahezu in allen untersuchten Kiefern endophytisch vorkommt ^[19]. *Diplodia sapinea* kann bei Vitalitätsverlusten seiner Wirtsbäume als Wund- und Schwächeparasit auftreten und es werden alle Altersklassen befallen. Dieser Pilz geht dann in eine parasitische Phase über und wird zum Krankheitserreger, wenn sein Wirtsbaum gestresst oder vorgeschädigt ist ^[19,80,81]. Das typische Schadbild der Erkrankung umfasst ein Triebsterben, das oft mit einer plötzlichen, rotbräunlichen Verfärbung der Nadeln oder ganzer Kronenteile, Kümmerwuchs, Triebdeformationen, traumatischem Harzfluss, Verkienung, Rindennekrosen an Stamm- und Ästen sowie Zuwachsverlusten verbunden ist. Als Folgeerscheinungen treten Befall durch Borken-, Pracht- oder Bockkäfer sowie Bläue und Holzfäule durch andere Pilzarten auf, die zur Holzentwertung führen ^[55,74]. Den Einfluss von Hitze und Dürre sowie Wirtswechsel des Pathogens auf dessen Aggressivität stellten Blumenstein et al. (2022) ^[82] am Beispiel des Pathosystems Kiefer und *Diplodia sapinea* in spezifischen Krankheitsdreiecken dar.

Buchen-Vitalitätsschwäche

Als Folge der Trockenheit und Hitze waren ab Herbst 2018 massive Absterbeerscheinungen an der Rotbuche zu verzeichnen, die überwiegend der komplexen Erkrankung Buchen-Vitalitätsschwäche zugeordnet werden können ^[67]. Zunächst waren nur ältere Bäume auf prädisponierten Standorten oder Bäume mit Vorschädigungen in Mitteldeutschland betroffen ^[48,83]. In den folgenden Jahren kam es zu einer Ausweitung der Absterbeerscheinungen in andere Regionen Deutschlands, abgesehen von Schleswig-Holstein ^[48,67,84–86]. Die Buchen-Vitalitätsschwäche wird in der Regel im Gegensatz zu anderen bedeutsamen komplexen Erkrankungen der Rotbuche (Buchen-Rindennekrose, Befall mit *Phytophthora* und seinen Folgeerscheinungen) durch abiotische Faktoren wie Niederschlagsdefizite und Hitze ausgelöst ^[67,87]. Die dadurch unter Wassermangel, Sonnenbrand und Embolien leidenden Rotbuchen bekommen Rindenrisse und sind anfällig für das Wachstum von Rindenpilzen, die zum Teil bereits latent als Endophyten im holzigen Gewebe ihrer Wirtsbäume vorhanden sind.

Gegenüber sommerlichen Niederschlagsdefiziten gelten Rotbuchen als mäßig sensitiv ^[88]. Da sie allerdings die Spaltöffnungen (Stomata) ihrer Blätter anisohydrisch regulieren ^[89], bleiben die Stomata auch unter Trockenstress lange geöffnet, um die Photosynthese bei Sonneneinstrahlung aufrechtzuerhalten. Dadurch kann jedoch bei Wassermangel der Wasserstrom in den Leitgefäßen abreißen und zu Embolien führen. Letztere können zu Kronenverlichtungen oder zum gänzlichen Absterben des betroffenen Baumes leiten ^[59,90]. In der initialen Phase seit 2018 trat typisch für die Buchen-Vitalitätsschwäche das Scharlachrote Pustelpilzchen (*Neonectria coccinea* (Pers.)) Rossman & Samuels, **Abb. 1j-k**) als Schlüsselpathogen und Rindennekrose-Erreger auf. Begleitend kam oft *Eutypella quaternata* (Pers.) Rappaz, ein holzerstörender Pilz aus der Verwandtschaft der *Xylariales*, vor. Letzterer verfärbte die Borke betroffener Bäume grau bis orange und fruchtete stark mit seiner orange leuchtenden Nebenfruchtform (*Libertella faginea* Desm.). Weitere Rindenpilze wurden unerwartet aus den Rindennekrosen betroffener Rotbuchen isoliert. Beispiele hierfür sind Arten der *Botryosphaerales*-Verwandtschaft wie *Botryosphaeria dothidea* (Moug.) Ces. & De Not = *Fusicoccum aesculi* Corda, *Diplodia corticola* A.J.L. Phillips, A. Alves & J. Luque (**Abb. 1l-m**), *D. fraxini* (Fr.) Fr., *D. mutila* (Fr.) Mont. = *Botryosphaeria*

stevensii Shoemaker und *D. sapinea* (Fr.) Fuckel ≡ *Sphaeropsis sapinea* (Fr.) Dyko & B. Sutton)^[21,91]. Der Wasser- und Nährstoffhaushalt der betroffenen Rotbuchen war durch den Befall dieser Rindenpilze zusätzlich gestört. Rindenrisse führen zum Luft-eintritt in das Holz. Dadurch kam es zu spritzkernartigen Verfärbungen und zum Wachstum von Holzfäuleerregern im Holz. Bereits endophytisch vorkommende Holzfäulepilze gingen, sobald der für ihr Wachstum im Holz notwendige Sauerstoffgehalt erreicht war, in ihre schwächeparasitische Phase über (vgl. ^[92]). Parallel wurden die betroffenen Bäume oft von rindenbrütende Insekten befallen ^[21]. In den durch Sonnenbrand geschädigten Stammbereichen kam es zum Wachstum und zur Fruktifikation von Austernseitlingen (*Pleurotus ostreatus* (Jacq.) P. Kumm.) und Spaltblättlingen (*Schizophyllum commune* Fr.), beides Weißfäulepilze. Im fortgeschrittenen Schadensverlauf wurden die stark geschwächten Bäume von holzeretzenden Pilzen und holzbrütenden Insekten besiedelt, die die Holzqualität erheblich minderten und die Stand- und Bruchsicherheit stärker gefährdeten. Langer & Bußkamp 2023 ^[21] zeigten, dass in 58 % der untersuchten Fallstudien zur Buchen-Vitalitätsschwäche von 2018-2019 holzerstörende bzw. holzabbauende Pilzen involviert waren. Sie wiesen unter anderen *Armillaria* spp., *Biscogniauxia mediterranea* (De Not.) Kuntze, *B. nummularia* (**Abb. 1c-f**), *Eutypa spinosa* (Pers.) Tul. & C. Tul., *Diatrype stigma* (Hoffm.) Fr., *Fomitopsis pinicola* (Sw.) P. Karst., *Hypoxylon fragiforme* (Pers.) J. Kickx f., *Kretschmaria deusta* (Hoffm.) P.M.D. Martin und *Xylaria corniformis* (Fr.) Fr. nach. Viele weitere holzabbauende Basidiomycota wie zum Beispiel der Zunderschwamm fruchteten meist erst im fortgeschrittenen Krankheitsverlauf. Intensive Studien zu den assoziierten pilzlichen Pathogenen und Endophyten bei Rotbuche im Zusammenhang mit den aktuellen Klimaveränderungen werden im Verbundprojekt „Buchenkalamitäten im Klimawandel – Ursachen, Folgen, Maßnahmen“ (BucheAkut, Förderkennzeichen: 2220WK10A1 bis B1, siehe auch <https://www.nw-fva.de/forschen/projekte/buche-akut>), gefördert im Rahmen des Waldklimafonds der Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe e.V., untersucht. Dabei wurde festgestellt, dass besonders der Moderfäuleerreger *B. nummularia*, mit erheblichem Abbauvermögen von Lignin, häufig in seiner anamorphen Phase seit 2019 fruchtete und zu erheblichen Schäden und Holzfäule, Stammkrebsen und

Grünholzbruch führte. In-vitro zeigten sich für verschiedene Stämme dieser Art bei Raumtemperatur unterschiedliche Holzabbaupotentiale, die vergleichbar mit jenen von *P. ostreatus* (Weißfäulepilz) waren. Allerdings war die Abbauleistung deutlich geringer als bei *K. deusta* (Moderfäuleerreger) und *Trametes versicolor* (L.) Lloyd (Weißfäuleerreger) ^[49]. Diese Ergebnisse ließen darauf schließen, dass *B. nummularia* die Holzqualität sowie die Bruch- und Standsicherheit vorgeschädigter Rotbuchen stark mindern kann. Wie schnell die Holzqualität bzw. die Stand- und Bruchsicherheit durch *B. nummularia* reduziert wird, ist sicher auch von den weiteren assoziierten Holzfäulepilzen, der Aggressivität der beteiligten *B. nummularia*-Stämme, dem Abwehrvermögen des Wirtsbaumes und den Witterungsbedingungen beeinflusst. Insbesondere hohe sommerliche Temperaturen scheinen dabei entscheidend zu sein, da *B. nummularia* bei Temperaturen >25 °C deutlich konkurrenzfähiger als andere Holzfäulepilze ist und auch noch bei Temperaturen von 30 °C gut wächst ^[93].

Rußbrindenerkrankung des Ahorns

Cryptostroma corticale verursacht die Rußbrindenerkrankung des Ahorns ^[94,95], welche seit 2018 zunehmend in Deutschland beobachtet wird ^[54,96–100]. Der letale Krankheitsverlauf ^[100] kann komplex sein und geht mit einer Holzentwertung einher, die die Bruch- und Arbeitssicherheit beeinträchtigt. *Cryptostroma corticale* infiziert seine Wirtsbäume meist über frische Wunden ^[101,102] und verursacht starke Verfärbungen sowie Moderfäule im befallenen Gewebe ^[103,104]. In Deutschland befällt dieser invasive Schlauchpilz meist Bergahorn und seltener andere Ahornarten ^[66,105]. Kürzlich wurde dieser Schaderreger auch als Opportunist in erkranktem Eschengewebe (*Fraxinus excelsior* L.) festgestellt ^[106] und als Schaderreger bei Rosskastanie (*Aesculus hippocastanum* L.) nachgewiesen ^[107]. In seiner natürlichen Heimat Nordamerika gibt es auch Nachweise an *Carya tomentosa* (Lam.) Nutt. (Spottnuss-Hickory), *Tilia* sp. (Linden) ^[108] und *Betula* spp. (Birken). Gemeiner Schneeball (*Viburnum opulus* L.), Hybridbalsampappel (*Populus tacamahaca x trichocarpa*), Korbweide (*Salix viminalis* L.) und Spindelstrauch (*Euonymus europaeus* L.) konnten künstlich mit *C. corticale* infiziert werden. Der Schaderreger konnte danach zwar aus diesen Baumarten re-isoliert werden, verursachte jedoch wie auch wie bei Esche ^[106] keine typischen Holzverfärbungen ^[102].

Beim Ausbruch der Rußrindenerkrankung zeigen sich ähnliche Symptome wie beim Auftreten der Nebenfruchtform von *B. nummularia* an Rotbuche (**Vergleiche Abb. 1c-d mit 1g-h**). *C. corticale* ist bisher nur in einer Nebenfruchtform bekannt, und vergleicht man diese mit der von *B. nummularia*, so sind sie sich in Habitus, Vorkommen und ökologischer Nische sehr ähnlich, abgesehen von der bevorzugten Hauptwirtsbaumart und der Farbe des Sporenpulvers. Wie auch *B. nummularia* kann *C. corticale* sowohl endophytisch ^[69] als auch parasitisch und später saprob in den Wirten vorkommen. Als wärmeliebende Art mit einer optimalen Wachstumstemperatur von 25 °C ^[100,102] kann *C. corticale* von der symptomlosen in die parasitische Phase übergehen, wenn die Wirtsbäume vitalitätsgeschwächt sind. Erste sichtbare Symptome sind das Aufwölben (**Abb. 1g**) und anschließende Aufplatzen und Abblättern der Rinde im unteren Stammbereich des Wirtsbaums (**Abb. 1h**). Dadurch werden die namensgebenden schwarzen, rußartigen Konidienlager des Erregers sichtbar.

Fazit und Ausblick

Die Sommertrockenheit in den Jahren 2003, 2013, 2015, 2018, 2019 und 2022 verdeutlichen, dass die Häufung und Intensität extremer Trockenheitsereignisse durch den Klimawandel wahrscheinlich deutlich ansteigen werden. Waldbäume sind durch direkte Trockenschäden und eine verminderte Verteidigungsmöglichkeit gegenüber Schaderregern gefährdet. Die Trockenheit 2018 und 2019 löste in weiten Teilen Deutschlands pilzliche und komplexe Erkrankungen aus, die teilweise zum Absterben von Einzelbäumen und ganzen Beständen geführt haben. Besonders gravierend wirkten sich die Niederschlagsdefizite und die langanhaltende Wärmeperiode in den Jahren 2018 und 2019 auf Kiefern-, Rotbuchen und Ahornbestände aus. Wärmeliebende Rinden- und Holzfäulepilze spielten eine maßgebliche Rolle im Schadprozess und bei der Holzentwertung. Beispiele hierfür sind heimische, latente Pathogene wie *B. nummularia*, *D. sapinea*, *F. fomentarius* oder *N. coccinea*, aber auch invasive Arten wie "*C. corticale*" und die erstmals in Deutschland nachgewiesene Art *D. corticola*. Die veränderten Klimabedingungen bzw. die besonderen Witterungsverhältnisse führten bei den betroffenen Bäumen zu einem Vitalitätsverlust,

● Einfluss des Klimawandels auf Erkrankung von Waldbäumen

machten sie einerseits anfällig für Infektionen durch holzerstörende Pilze und begünstigten andererseits den Übergang von endophytischen, potenziell pathogenen bzw. holzerstörenden Pilzen in ihre parasitische Lebensphase. Sowohl bei Bäumen im kommunalen, urbanen oder forstlichem Grün führten die witterungs- bzw. klimabedingten Veränderungen im Schadensprozess der Rinden- und Holzfäulepilze zu einem Mehraufwand bei der Arbeits- und Verkehrssicherheit sowie Baumpflege.

● **Abbildung 1:**

a-b: **Kiefern-Triebsterben verursacht durch *DIPLODIA SAPINEA*:**

a) betroffener Kiefernbestand,

b) Reinkultur von *D. sapinea* auf Malz-Hefe-Pepton-Agar nach einer Woche Wachstum;

c-f) ***BISCOGNIAUXIA NUMMULARIA*:**

c) sich bildende Nebenfruchtform unter der aufgewölbten Rinde (rote Pfeile) von Rotbuche,

d) Nebenfruchtform unter der aufgeplatzten Rinde von Rotbuche,

e) Nebenfruchtform mit zum Teil abgedrifteten Konidien,

f) Reinkultur auf Malz-Hefe-Pepton-Agar nach einer Woche Wachstum;

g-i) ***CRYPTOSTROMA CORTICALE*:**

g) sich bildende Konidienlager unter der aufgewölbten Rinde (rote Pfeile) von Bergahorn,

h) RuBrinden-Konidienlager unter der abgeplatzten Rinde von Bergahorn,

i) Reinkultur auf Malz-Hefe-Pepton-Agar nach einer Woche Wachstum;

j-k) ***NEONECTRIA COCCINEA*:**

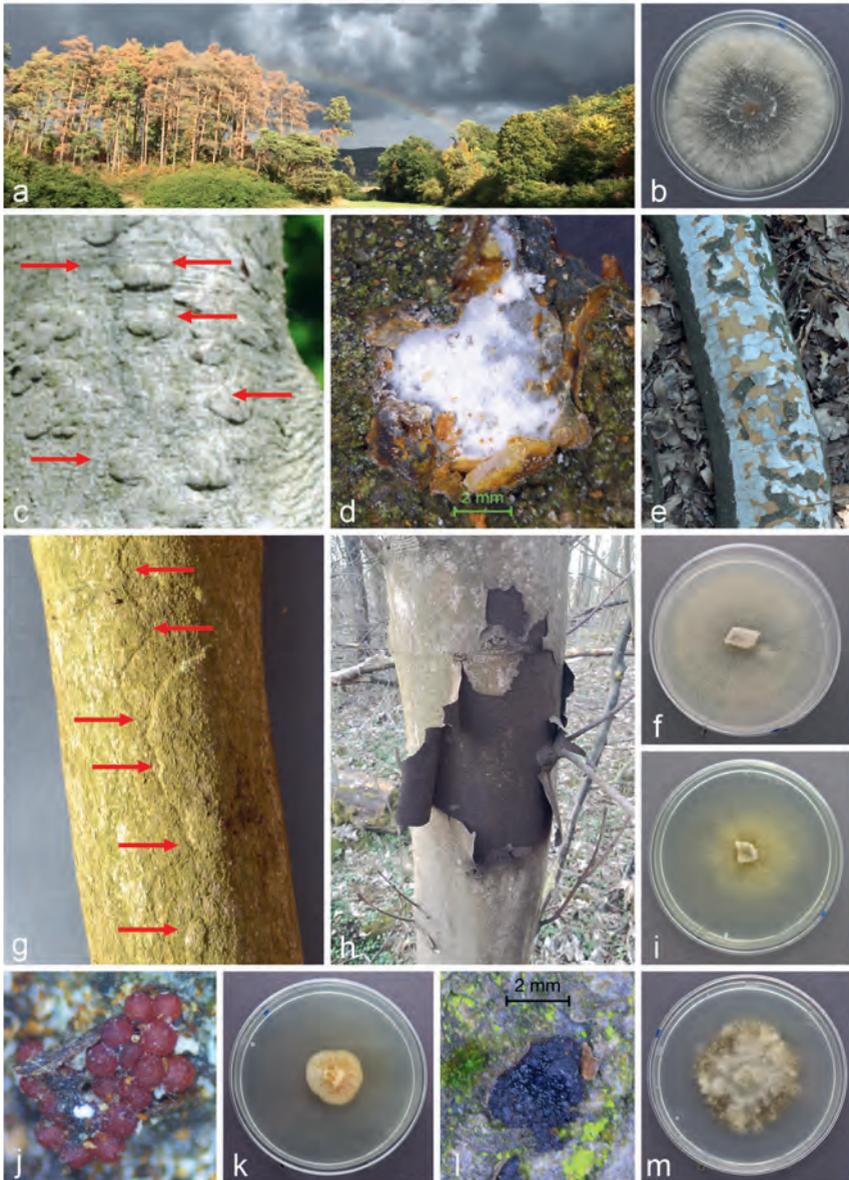
j) Hauptfruchtform,

k) Reinkultur auf Malz-Hefe-Pepton-Agar nach einer Woche Wachstum;

l-m) ***DIPLODIA CORTICOLA*:**

l) Fruchtkörper,

m) Reinkultur auf Malz-Hefe-Pepton-Agar nach einer Woche Wachstum.



Quellen

1. Bowman SM, Free SJ (2006) The structure and synthesis of the fungal cell wall. *Bioessays* 28: 799–808.
2. Alexopoulos CJ, Mims CharlesW, Blackwell MM (1996) *Introductory Mycology*, 4th Edition |, Wiley and Sons.
3. Piepenbring M (2015) *Introduction to Mycology in the Tropics*, St. Paul, MN 55121 USA, The American Phytopathological Society (APS).
4. Petrini O (1991) Fungal Endophytes of Tree Leaves, In: Andrews HJ, Hirano SS (Eds.), *Microbial Ecology of Leaves*, New York and Berlin, Springer-Verlag, 179–197.
5. Saikkonen K, Faeth SH, Helander M, et al. (1998) Fungal endophytes: A continuum of interactions with host plants. *Annual Review of Ecology and Systematics* 29: 319–343.
6. Arnold AE, Lutzoni F (2007) Diversity and Host Range of Foliar Fungal Endophytes: Are Tropical Leaves Biodiversity Hotspots? *Ecology* 88: 541–549.
7. Sieber TN (2007) Endophytic fungi in forest trees: are they mutualists? *Fungal Biology Reviews* 21: 75–89.
8. Sun X, Guo LD, Hyde KD (2011) Community composition of endophytic fungi in *Acer truncatum* and their role in decomposition. *Fungal Diversity* 47: 85–95.
9. Ragazzi A, Moricca S, Capretti P, et al. (2003) Differences in composition of endophytic mycobiota in twigs and leaves of healthy and declining *Quercus* species in Italy. *Forest Pathol* 33: 31–38.
10. Sanz-Ros AV, Müller MM, San Martín R, et al. (2015) Fungal endophytic communities on twigs of fast and slow growing Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in northern Spain. *Fungal Biology* 119: 870–883.
11. Manion PD (1981) *Tree disease concepts*, Prentice-Hall.
12. Saikkonen K, Saari S, Helander M (2010) Defensive mutualism between plants and endophytic fungi? *Fungal Diversity* 41: 101–113.
13. Agrios G (2005) *Plant Pathology - 5th Edition*, Academic Press.
14. Manion PD (1991) *Tree disease concepts*, Englewood Cliffs, New Jersey., Prentice-Hall, Inc.
15. McNew GL (1960) The nature, origin and evolution of parasitism, In: Horsfall JG, Dimond AE (Eds.), *Plant pathology: an advanced treatise*, New York, Academic Press, 19–69.
16. Tjosvold SA (2018) University of California Agriculture and Natural resources (UCANR), The Disease Triangle: Fundamental Concept for Disease Management., 2018. Available from: <https://ucanr.edu/blogs/blogcore/postdetail.cfm?postnum=28785>.
17. Schulz B, Boyle C (2005) The endophytic continuum. *Mycological Research* 109: 661–686.
18. Sinclair WA, Lyon HH, Johnson WT (1987) *Diseases of Trees and Shrubs - Second Edition*, Cornell University Press.
19. Bußkamp J, Langer GJ, Langer EJ (2020) Sphaeropsis sapinea and fungal endophyte diversity in twigs of Scots pine (*Pinus sylvestris*) in Germany. *Mycological Progress* 19: 985–999.
20. Langer GJ, Bußkamp J, Terhonen E, et al. (2021) Chapter 10 - Fungi inhabiting woody tree tissues, In: Asiegbu FO, Kovalchuk A (Eds.), *Forest Microbiology*, Academic Press, 175–205.
21. Langer GJ, Bußkamp J (2023) Vitality loss of beech: a serious threat to *Fagus sylvatica* in Germany in the context of global warming. *J Plant Dis Prot*.
22. Schwarze F (2007) Wood decay under the microscope. *Fungal Biology Reviews* 21.
23. Wasko SJ, Brenner MV, Cartier SF (2014) Crystalline Metabolites of the Tinder Polypore (*Fomes fomentarius*). *Journal of North Carolina Academy of Science* 130: 16–22.
24. Ghelardini L, Pepori AL, Luchi N, et al. (2016) Drivers of emerging fungal diseases of forest trees. *Forest Ecology and Management* 381: 235–246.
25. Dalrymple G (2001) The age of the Earth in the twentieth century: A problem (mostly) solved. *Geological Society, London, Special Publications* 190: 205–221.
26. Manhès G, Allègre CJ, Dupré B, et al. (1980) Lead isotope study of basic-ultrabasic layered complexes: Speculations about the age of the earth and primitive mantle characteristics. *Earth and Planetary Science Letters* 47: 370–382.
27. Snyder CW (2016) Evolution of global temperature over the past two million years. *Nature* 538: 226–228.
28. Fedorov EE (1927) Das Klima als Wettergesamtheit (Climate as totality of the weather). *Monthly Weather Review* 55: 401–403.
29. DWD Wetter und Klima - Deutscher Wetterdienst - Glossar - K - Klima. Available from: <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?nn=103346&lv2=101334&lv3=101462>.

30. DWD Wetter und Klima - Deutscher Wetterdienst - Basisfakten zum Klimawandel. Available from: https://www.dwd.de/DE/klimawandel/klimawandel/klimawandel_node.html.
31. Kriegliger K Klimanavigator, Die neuen RCP-Szenarien für den aktuellen 5. IPCC-Sachstandsbericht. Available from: <https://www.klimanavigator.eu/dossier/artikel/012038/index.php>.
32. IPCC (2015) Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)], Geneva, Switzerland, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).
33. IPCC (2021) Summary for Policymakers. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge, Cambridge University Press.
34. Böckmann T, Buresch M, Evers J, et al. (2024) Entscheidungshilfen zur klimaangepassten Baumartenwahl in Schleswig-Holstein, Göttingen, Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt.
35. Döbbeler H, Buresch M, Heitkamp F, et al. (2020) Entscheidungshilfen zur klimaangepassten Baumartenwahl in Hessen - Ergebnisse aus dem Integrierten Klimaschutzplan Hessen 2025: Projekt L-12 „Klimarisiko- und Zielbestockungskarten Forst“, Göttingen, Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt.
36. Friedrich K, Kaspar F (2019) Rückblick auf das Jahr 2018 – das bisher wärmste Jahr in Deutschland, DWD Abteilung Klimaüberwachung.
37. Kaspar F, Friedrich K (2020) Rückblick auf die Temperatur in Deutschland im Jahr 2019 und die langfristige Entwicklung, DWD Abteilungen für Klimaüberwachung und Agrarmeteorologie.
38. Imbery F, Kaspar F, Friedrich K, et al. (2021) Klimatologischer Rückblick auf 2020: Eines der wärmsten Jahre in Deutschland und Ende des bisher wärmsten Jahrzehnts, DWD (Deutscherwetterdienst).
39. Imbery F, Friedrich K, Fleckenstein R, et al. (2023) Klimatologischer Rückblick auf 2022: Das sonnenscheinreichste und eines der beiden wärmsten Jahre in Deutschland. Abteilungen für Klimaüberwachung, Hydrometeorologie und Agrarmeteorologie, Deutscher Wetterdienst (DWD): Hamburg, Germany.
40. DWD (2024) Deutschlandwetter im Jahr 2023, 2024. Available from: https://www.dwd.de/DE/presse/pressemitteilungen/DE/2023/20231229_deutschlandwetter_jahr2023_news.html.
41. Eichhorn J, Johannes Suttmöller, Scheler B, et al. (2020) Folgen von Trockenheit und Stürmen in den Wäldern Nordwestdeutschlands. AFZ - Der Wald 75: 26–30.
42. Tijdeman E, Menzel L (2021) The development and persistence of soil moisture stress during drought across southwestern Germany. Hydrology and Earth System Sciences 25: 2009–2025.
43. Schumacher J (2012) Auftreten und Ausbreitung neuartiger Baumkrankheiten in Mitteleuropa unter Berücksichtigung klimatischer Aspekte, Stuttgart, Ulmer.
44. Wulf A, Leonhard S, Schumacher J (2009) Pilzkrankheiten am Bergahorn., LWF Wissen 62: 41–44.
45. Schumacher J, Leonhard S, Wulf A, et al. (2006) Bemerkenswerte Vitalitätsschwächung und Holzersetzung an Rot-Buchen (*Fagus sylvatica*) durch den weitgehend unbekanntem Schlauchpilz *Hypoxylon cohaerens*. Gesunde Pflanzen 58: 225–230.
46. Schumacher J, Leonhard S, Wulf A, et al. (2006) Die Schwarze Buchenkohlenbeere als Parasit und Holzfäuleerreger an Rot-Buchen - ein Doppelgänger des Brandkrustenpilzes? Forst und Holz 61: 369–372.
47. Langer GJ, Bresslem U, Habermann M (2013) Vermehrt Pilzkrankheiten an Bergahorn in Nordwestdeutschland. AFZ-Der Wald 6: 22–26.
48. Langer GJ, Bußkamp J, Langer EJ (2020) Absterbeerscheinungen bei Rotbuche durch Wärme und Trockenheit. AFZ - Der Wald 4/2020: 24–27.
49. Tropf J, Bien S, Eurich L, et al. (2022) Pilzliche Schäden an der Rotbuche. AFZ - Der Wald 177: 32–35.
50. NW-FVA (2019) Waldschutzinfo Nr. 1/ 2019 - Witterung 2018, Göttingen, Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt.
51. NW-FVA (2019) Waldschutzinfo_06-2019_Komplexe_Schaeden_an_Buche.pdf.
52. NW-FVA (2019) Waldschutzinfo Nr. 09 / 2019 Zunahme von Schäden an Laubbaumarten vom 03.09.2019.
53. NW-FVA (2021) Waldschutzinfo Nr. 1 / 2021 Witterung 2020, Göttingen, Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt.
54. Schlößer R, Langer G (2021) Verbreitung der Rußrindkrankheit des Ahorns in Deutschland. AFZ - Der Wald 24: 28–32.
55. Langer G, Hartung T, Bußkamp J (2023) Pilzliche und komplexe Schäden an Douglasie. AFZ-DerWald 78: 26–29.
56. Scharmweber T, Smljjanic M, Cruz-Garcia R, et al. (2020) Tree growth at the end of the 21st century-the extreme years 2018/19 as template for future growth conditions. Environmental Research Letters 15: 1–10.

Einfluss des Klimawandels auf Erkrankung von Waldbäumen

57. Leuschner C, Weithmann G, Bat-Enerel B, et al. (2023) The Future of European Beech in Northern Germany—Climate Change Vulnerability and Adaptation Potential. *Forests* 14: 1448.
58. Purahong W, Tanunchai B, Wahdan SFM, et al. (2021) Molecular Screening of Microorganisms Associated with Discolored Wood in Dead European Beech Trees Suffered from Extreme Drought Event Using Next Generation Sequencing. *Plants* 10: 2092.
59. Arend M, Link RM, Zahnd C, et al. (2022) Lack of hydraulic recovery as a cause of post-drought foliage reduction and canopy decline in European beech. *New Phytologist* 234: 1195–1205.
60. Nussbaumer A, Meusbürger K, Schmitt M, et al. (2021) Verfrühter Fruchtabwurf in Schweizer Buchenbeständen im Hitze- und Trockensommer 2018. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen* 172: 166–175.
61. Bigler C, Vitasse Y (2021) Premature leaf discoloration of European deciduous trees is caused by drought and heat in late spring and cold spells in early fall. *Agricultural and Forest Meteorology* 307: 108492.
62. BMEL (2020) Forstliches Umweltmonitoring in Deutschland - Durchführungskonzept Forstliches Umweltmonitoring, Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft.
63. Penuelas J, Lloret F, Montoya R (2001) Severe drought effects on Mediterranean woody flora in Spain. *Forest Science* 47: 214–218.
64. Scharnweber T, Manthey M, Criegee C, et al. (2011) Drought matters-Declining precipitation influences growth of *Fagus sylvatica* L. and *Quercus robur* L. in north-eastern Germany. *Forest Ecology and Management* 262: 947–961.
65. Breda N, Huc R, Granier A, et al. (2006) Temperate forest trees and stands under severe drought: A review of ecophysiological responses, adaptation processes and long-term consequences. <http://dx.doi.org/101051/forest:2006042> 63.
66. Schlöber R, Bien S, Langer GJ, et al. (2023) Fungi associated with woody tissues of *Acer pseudoplatanus* in forest stands with different health status concerning sooty bark disease (*Cryptostroma corticale*). *Mycol Progress* 22: 13.
67. Kehr R, Dujesiefken D, Stobbe H, et al. (2014) Neuartige Komplexschäden an Buche mit Astbruchgefahr, *Jahrbuch der Baumpflege*, 121–135.
68. Langer GJ (2019) Komplexe Erkrankungen bei älteren Rotbuchen. *AFZ - Der Wald* 32–35.
69. Niesar M, Kehr R, Danescu A, et al. (2014) Neue Komplexschäden an Buche führen zu erheblicher Bruchgefahr. *AFZ Der Wald* 15: 16–21.
70. Whalley AJS (1996) The xylariaceous way of life. *Mycological Research* 100: 897–922.
71. Schwarze F, Engels J, Mattheck C (2000) *Fungal Strategies of Wood Decay in Trees*, Freiburg, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
72. Stokland J, Siitonen J, Jonsson B (2012) *Biodiversity in Dead Wood (Ecology, Biodiversity and Conservation)*, Cambridge, Cambridge University Press.
73. Chapela IH, Boddy L (1988) Fungal colonization of attached beech branches II. Spatial and temporal organization of communities arising from latent invaders in bark and functional sapwood, under different moisture regimes. *New Phytologist* 110: 47–57.
74. Schumacher J, Bußkamp J, Langer GJ (2022) Stellt das *Diplodia*-Triebsterben der Kiefern (Erreger: *Sphaeropsis sapinea*) einen beeinträchtigenden Faktor für die zukünftige Baumartenwahl im Klimawandel dar? Does *Diplodia* blight of pines (causal agent: *Sphaeropsis sapinea*) represent an interfering factor in future tree species selection under conditions of climate change?, In: Dujesiefken D (Ed.), *Jahrbuch der Baumpflege* 2022, 14.
75. Wet J, Burgess T, Slippers B, et al. (2003) Multiple gene genealogies and microsatellite markers reflect relationships between morphotypes of *Sphaeropsis sapinea* and identify a new species of *Diplodia*. *Mycological Research* 107: 557–566.
76. Burgess TI, Gordon TR, Wingfield MJ, et al. (2004) Geographic isolation of *Diplodia scrobiculata* and its association with native *Pinus radiata*. *Mycological Research* 108: 1399–1406.
77. Burgess TI, Wingfield MJ, Wingfield BD (2004) Global distribution of *Diplodia pinea* genotypes revealed using simple sequence repeat (SSR) markers. *Australasian Plant Pathology* 33: 513–519.
78. Swart WJ, Wingfield MJ (1991) Biology and Control of *Sphaeropsis sapinea* on *Pinus* Species in South Africa. *Plant Disease* 75: 761–766.
79. Bußkamp J (2018) Schadenserhebung, Kartierung und Charakterisierung des „*Diplodia*-Triebsterbens“ der Kiefer, insbesondere des endophytischen Vorkommens in den klimasensiblen Räumen und Identifikation von den in Kiefer (*Pinus sylvestris*) vorkommenden Endophyten.
80. Stanosz GR, Blodgett JT, Smith DR, et al. (2001) Water stress and *Sphaeropsis sapinea* as a latent pathogen of red pine seedlings. *New Phytologist* 149: 531–538.

81. Oliva J, Ridley M, Redondo M, et al. (2020) Competitive exclusion amongst endophytes determines shoot blight severity on pine. *Functional Ecology*.
82. Blumenstein K, Bußkamp J, Langer GJ, et al. (2022) Diplodia tip blight pathogen's virulence empowered through host switch. *Front Fungal Biol* 3.
83. Langer G (2019) Buchen-Vitalitätsschwäche - eine Auswirkung der Wetteranomalien in den Jahren 2018 und 2019. *ImDialog* 04/2019: 4–6.
84. Schißlbauer J, Bork K, Muser M, et al. (2022) Waldschutzfragen und Aktuelles zur Vitalität der Buche in Bayern. *LWF Wissen* 86: 45–56.
85. Thurm EA, van der E, van der Maaten-Theunissen M, et al. (2024) Buchenvitalitätsschwäche – Totgesagte leben länger! - *AFZ DerWald* 6-2024. *AFZ - Der Wald* 36-39.
86. Klemmt H-J, Eusemann P, Grüner J, et al. (2023) Die Zukunft der Rotbuche in Mitteleuropa. *AFZ - DerWald* 12–16.
87. Asche N (2016) Buchenschäden auf exponiertem Standort – eine Folge des Klima-(Witterungs-)wandels?, Gefährdungen der Ökosystemdienstleistungen von Wäldern., Universitätsdrucke Göttingen, 15–22.
88. Leuschner C (2020) Drought response of European beech (*Fagus sylvatica* L.)—A review. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics* 47: 125576.
89. Leuschner C, Schipka F, Backes K (2021) Stomatal regulation and water potential variation in European beech: Challenging the iso/anisohydry concept. *Tree Physiology* 42.
90. Walthert L, Ganthaler A, Mayr S, et al. (2021) From the comfort zone to crown dieback: Sequence of physiological stress thresholds in mature European beech trees across progressive drought. *Science of The Total Environment* 753: 141792.
91. Langer GJ, Bußkamp J, Blumenstein K, et al. (2021) Fungi inhabiting woody tree tissues – stems, branches, and twigs, *Forest Microbiome*, London, San Diego, Cambridge, Oxford, Elsevier, 175–205.
92. Parfitt D, Hunt J, Dockrell D, et al. (2010) Do all trees carry the seeds of their own destruction? PCR reveals numerous wood decay fungi latently present in sapwood of a wide range of angiosperm trees. *Fungal Ecology* 3: 338–346.
93. Hendry SJ (1993) Strip-cankering in relation to the ecology of Xylariaceae and Diatrypaceae in beech (*Fagus sylvatica* L.).
94. Ellis JB, Everhart, BM (1889) New species of hyphomycetes fungi. *Journal of Mycology* 5: 68–72.
95. Gregory PH, Waller S (1951) *Cryptostroma corticale* and sooty bark disease of sycamore (*Acer pseudoplatanus*). *Transactions of the British Mycological Society* 34: 579–597.
96. Bork K (2018) Rußrindkrankheit an Ahorn – Erstfund in Bayern. *AFZ - Der Wald* 20: 40–41.
97. Rohde M, Langer G, Hurling R, et al. (2019) Waldschutzsituation 2018 in Nordwestdeutschland. *AFZ - Der Wald* 74: 38–41.
98. Wenzel A, Thiel J, Stürtz M (2019) Waldschutzsituation 2018/19 in Thüringen. *AFZ-Der Wald* 74: 26–29.
99. Delb H, Grüner J, John R, et al. (2019) Waldschutzsituation 2018/2019 in Baden-Württemberg. *AFZ - Der Wald* 74: 14–17.
100. Enderle R, Riebesehl J, Becker P, et al. (2020) Rußrindkrankheit an Ahorn - Biologie, Pathologie und Entsorgung von Schadholz, In: Dujesiefken D (Ed.), *Jahrbuch der Baumpflege 2020*, Braunschweig, Haymarket Media, 85–100.
101. Townrow JA (1953) *The Biology of Cryptostroma corticale and the Sooty Bark Disease of Sycamore*, Report on Forest Research, London, 118–120.
102. Dickenson SJ (1980) *Biology of Cryptostroma corticale and the sooty bark disease of sycamore*.
103. Worrall JJ, Anagnost SE, Zabel RA (1997) Comparison of wood decay among diverse lignicolous fungi. *Mycologia* 89: 199–219.
104. Schwarze FWMR (2018) *Diagnose und Prognose der Fäule dynamik in Stadtbäumen*, ST. Gallen, MycoSolutions AG.
105. Koulouk O, Kelnarová I, erný K (2014) Recent observations of sooty bark disease of sycamore maple in Prague (Czech Republic) and the phylogenetic placement of *Cryptostroma corticale*. *Forest Pathology* 45: 21–27.
106. Langer GJ, Peters S, Bußkamp J, et al. (2023) *Cryptostroma corticale* and fungal endophytes associated with *Fraxinus excelsior* affected by ash dieback. *J Plant Dis Prot*.
107. Brenken A-C, Kehr R, Riebesehl J, et al. (2024) First report of *Cryptostroma corticale* on *Aesculus hippocastanum* causing sooty bark disease in Germany. *J Plant Dis Prot*.
108. Sutton BC, Gibson IAS (1977) *Cryptostroma corticale*. *CMI Descriptions of Pathogenic Fungi and Bacteria* 539.

Nordwestdeutsche Forstliche
Versuchsanstalt (NW-FVA),
Abteilung Waldschutz,
Sachgebiet Mykologie und
Komplexerkrankungen,
Grätzelstraße 2,
D-37079 Göttingen.
Tel.: 0551 69401 129,
gitta.langer@nw-fva.de

Finanzielle Förderung

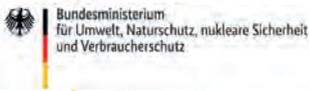
Förderkennzeichen: 2220WK10B1 (BucheAkut) und FKZ: 2220WK92A4 (TroWaK)
Die Projekte werden aus Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) und des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) durch die Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR) im Rahmen des Waldklimafonds gefördert.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

