

Schlussbericht

zum Verbundvorhaben 5 FraxSilva

(Waldbau)

Thema:

Erhalt der Gemeinen Esche (FraxForFuture)

Verbundvorhaben 5: Waldbau (FraxSilva)

Akronym:

FraxSilva

Zuwendungsempfänger:

Teilvorhaben 1: Dr. Ralf-Volker Nagel, Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt

Implikationen des Eschentriebsterbens auf Bestandesdynamik und Waldstrukturen:
Ableitung waldbaulicher Steuerungsmöglichkeiten zur Schadensbegrenzung und
Stärkung von Anpassungspotenzialen natürlicher Eschen-Populationen (**FraxSilvReact**)

**Teilvorhaben 2: Dr. Holger Fischer, Institut für Waldbau und Waldschutz
Professur für Waldbau**

Bedeutung von Strukturmerkmalen der Mischung für das Infektionsrisiko mit
Eschentriebsterben an Eschen-Naturverjüngung (**MischFraxNat**)

Förderkennzeichen:

Teilvorhaben 1: 2219WK23A4 (TV 5.1 FraxSilvReact)

Teilvorhaben 2: 2219WK23B4 (TV 5.2 MischFraxNat)

Laufzeit:

01.09.2020 bis 28.02.2024

Monat der Erstellung:

06/2024

Datum der Veröffentlichung:

10.02.2025



Gefördert durch:



Bundesministerium
für Ernährung
und Landwirtschaft



Bundesministerium
für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit
und Verbraucherschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages mit Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) und des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMU) über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) als Projektträger des Waldklimafonds unterstützt. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der Autorenschaft.

Inhaltsverzeichnis

I	Ziele	1
1.	Aufgabenstellung	1
2.	Stand der Technik	3
3.	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	5
II	Ergebnisse	5
1.	Erzielte Ergebnisse	5
1.1	AP1: Zusammenhänge zwischen Waldstruktur und Infektion mit ETS	6
1.2	AP 2: Eschennaturverjüngung unter dem Einfluss des ETS	14
1.3	AP 3: Konsolidierung und Weiterentwicklung ETS-geschädigter Waldbestände	21
1.4	AP 4: Deskriptive Epidemiologie / Einzelbaumeffekte	25
1.5	AP 5: Analytische Epidemiologie in situ	33
1.6	AP 6: Experimentelle Epidemiologie ex situ	35
1.7	Handlungsempfehlung zum forstbetrieblichen Umgang mit dem ETS	43
2.	Verwertung	44
3.	Erkenntnisse von Dritten	46
4.	Veröffentlichungen	46
III	Quellenverzeichnis	47

I Ziele

1. Aufgabenstellung

Das Verbundvorhaben 5, Waldbau (FraxSilva) ist ein Teil des Demonstrationsprojekts Erhalt der Gemeinen Esche (FraxForFuture), welches sich aus fünf Verbünden mit Projektpartnern aus allen relevanten Fachdisziplinen zusammensetzt.

Der ursprüngliche Planzeitraum des Verbundprojektes FraxSilva (01.04.2020 bis 31.03.2023) im Rahmen des Demonstrationsprojekts FraxForFuture hatte sich aufgrund des späteren Bewilligungszeitpunktes verschoben. Die neue Gesamtlaufzeit für die neun verschiedenen Teilvorhaben von FraxPath startete ab dem 01.11.2020 und verzögerte sich bedingt durch Schwierigkeiten in der Personalgewinnung durch die COVID-19-Pandemie (erschwerende Bedingungen bei den Einstellungsverfahren, spätere Startzeiten, durch die Verschiebung des Projektstarts ungünstige Witterungsbedingungen außerhalb der Vegetationsperiode, verspätete Anlage der Experimente und der Intensivbeobachtungsflächen (IBF) des Gesamtverbundes, keine Erlaubnis für Dienstreisen etc.). Eine Laufzeitverlängerung bis teilweise zum 31.05.2024 erfolgte bei den beiden Partnern des Verbundprojekts sachkosten-, jedoch nicht personalkostenneutral.

Der Verlust der Esche aus der ohnehin beschränkten Palette einheimischer Waldbaumarten würde die künftige Risikostreuung einschränken und wäre bei unvermindert fortschreitendem Triebsterben zudem mit einem weitgehenden Verlust der auf die Esche spezialisierter Arten- und Lebensgemeinschaften verbunden. Im **Verbundvorhaben 5 FraxSilva** sollen deshalb wissenschaftlich fundierte Waldbausysteme evaluiert werden, die zum einen die Forstbetriebe bei der Schadensbegrenzung unterstützen, für Baumartenwahl und Waldbauverfahren rationelle Alternativen bereithalten und gleichzeitig dem erklärten Ziel einer Erhaltung, Stärkung und Anpassung der in den Waldbeständen vorhandenen Eschen nachkommen. Bereits bestehende, weitgehend auf Beobachtung und Erfahrungswissen beruhende Praxisempfehlungen zur waldbaulichen Konsolidierung bzw. Sanierung geschädigter Bestände werden in diesem Sinne der notwendigen wissenschaftlichen Überprüfung und expliziten Erweiterung um die Aspekte der Erhaltung, Einbeziehung und ggf. aktiven Wiedereinbringung von Eschenanteilen in den Waldbeständen unterzogen. Besonders auffällig erscheint die starke Schwächung der Eschennaturverjüngung durch das ETS, wodurch die künftige Etablierung und dauerhafte Behauptung der Baumart in sich natürlich regenerierenden Laub-Mischbeständen infrage steht. Auch und besonders hier müssen veränderte Wirkungsbeziehungen aufgeklärt werden, um Ökosystem-Prozesse zu verstehen und im Sinne der Arterhaltung zu steuern. Damit geht der hier verfolgte Ansatz in der Zielausrichtung über bisher vorliegende waldbauliche Empfehlungen im Zusammenhang mit dem ETS hinaus.

Darüber hinaus sollten Grundlagen für ein abgestimmtes und koordiniertes Vorgehen gegenüber dem Eschentriebsterben unter Einbeziehung aller relevanten Fachdisziplinen geschaffen werden. Basis des gemeinsamen Vorgehens waren die über das gesamte Bundesgebiet verteilten Intensivbeobachtungsflächen (IBF+), die alle relevanten eschengeprägten Waldgesellschaften über einen standörtlichen und klimatischen Transekt repräsentierten. Als gemeinsame Arbeitsplattform der meisten beteiligten Unterverbünde des Demonstrationsvorhabens wurden die IBF unter Anwendung des gesamten Methodenkataloges mit abgestimmten, standardisierten Verfahren wie dem neu entwickelten einheitlichen Boniturschlüssels zur Klassifizierung des Schädigungsgrades durch das Eschentriebsterben an Alteschen (Sommerzustand, Winterzustand) und Jungeschen beforscht (Peters et al. 2021).

Im Unterverbund FraxSilva kamen darüber hinaus Monitoring-Ansätze mit systematischen Stichproben-Designs speziell in Bezug auf die Naturverjüngung der IBF+ zum Einsatz und es wurden waldbauliche „in situ“ und „ex situ“ Experimente angelegt. Außerdem konnte auf bereits bestehende Eschen-Versuchsflächen der NW-FVA auf unterschiedlichen Standorten und in unterschiedlichen Altern zurückgegriffen werden.

Mit dieser Vorgehensweise sollte zum einen ein Gesamtüberblick über das Ausmaß und die Entwicklung des Eschentriebsterbens in Vergangenheit und Gegenwart erzielt werden, aus dem sich eine Zukunftsprognose der Eschenpopulation bei weiterem Fortschritt des ETS ableiten lässt. Neben der Erfassung der Gesamtsituation dienen diese Fläche zum anderen als Ausgangspunkt für die Entwicklung von effizienten Verfahren zur Vitalitätsdiagnostik von Eschen und ihrer Vorkommen. Auf den gemeinsamen Flächen wurden ebenfalls augenscheinlich vitale Eschen ausgewählt und für weiterführende Arbeiten durch vegetative Vermehrung erhalten. Diese Arbeiten schließen auch die Identifizierung von sensitiven Eschen mit ein, die als Referenz vor allem für die Klärung von phytopathologischen Fragestellungen verwendet werden können.

Die systematische Analyse des waldbaulichen Ausgangszustandes von befallenen und weniger befallenen Eschenbeständen der Intensivmonitoringflächen bzw. in deren Umfeld dient als Grundlage für deren weitere waldbauliche Behandlung. Fragen zur Verjüngung und Pflege von befallenen Eschenbeständen einschließlich Erfolg versprechender Umbauverfahren werden ebenso bearbeitet wie Fragen zu den Auswirkungen von Mischung mit anderen Baumarten und die Konkurrenzverhältnisse innerhalb und zwischen den beteiligten Baumarten.

Im Rahmen des Gesamtverbundes strebt der Verbund 5 FraxSilva vor allem die möglichst lange, möglichst umfangreiche „in situ Erhaltung“ der genetischen Ressourcen sowie die Erhaltung und Stärkung der Anpassungspotenziale natürlicher Eschen-Populationen an. Ein besonderes Augenmerk galt dabei der natürlichen Verjüngung als potenziell großer Anpassungschance von Eschenpopulationen an Veränderungen der abiotischen und im Falle des ETS der biotischen Umwelt. Dazu sollten letztlich als wichtigstes Arbeitsergebnis für den praktischen Waldbau relevante Ergebnisse des Demonstrationsvorhabens und dessen Unterverbünden in von FraxSilva federführend erarbeiteten praktischen Handlungsempfehlungen integriert werden (Abb. 1).

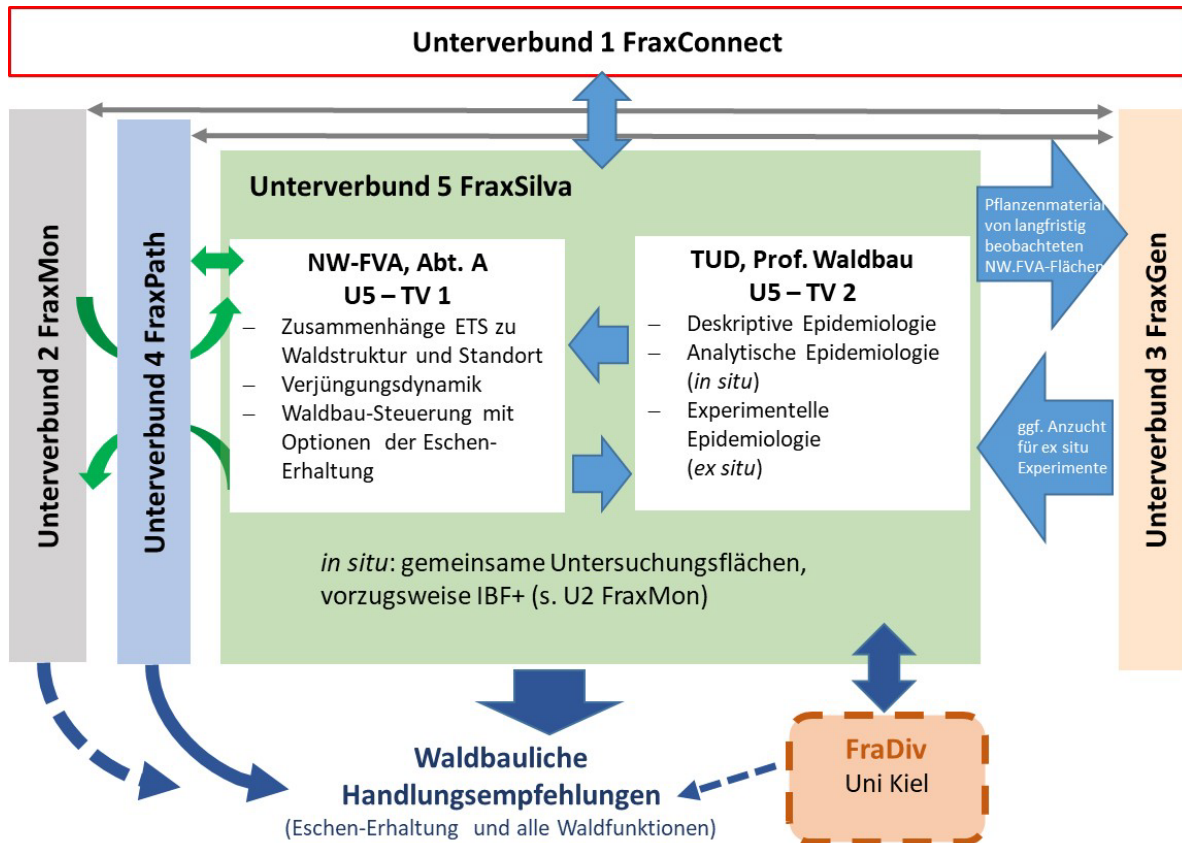


Abbildung 1: Projektstruktur u. Vernetzung des Unterverbundes (U) und der Teilvorhaben (TV) von FraxSilva (Unterverbund 5) im Demonstrationsprojekt Erhalt der Gemeinen Esche (FraxForFuture).

Im Einzelnen wurden die im Folgenden dargestellten fünf Teilaufgaben teils von jeweils einem der beiden Teilverbünde 5.1 (NW-FVA) oder 5.2 (TUD) und teilweise arbeitsteilig von beiden Teilverbünden gemeinsam bearbeitet.

TV5.1 (NW-FVA)

Arbeitspaket 1 Zusammenhänge zwischen Waldstruktur und Infektion mit ETS

Identifikation von Faktoren der Waldstruktur und der Bestandesbehandlung etablierter Eschen-Rein- und Mischbestände (BHD > 7 cm), die im Zusammenhang mit geringerer Schädigung von Einzelbäumen und Beständen stehen. Untersuchung von Wirkungszusammenhängen der Etablierung, des Wachstums und der Konkurrenzfähigkeit von Eschennaturverjüngung in Mischbeständen unter dem Einfluss des ETS

Arbeitspaket 2 Eschennaturverjüngung unter dem Einfluss des ETS

Untersuchung von Wirkungszusammenhängen der Etablierung, des Wachstums und der Konkurrenzfähigkeit von Eschennaturverjüngung in Mischbeständen unter dem Einfluss des ETS

Arbeitspaket 3 Konsolidierung und Weiterentwicklung ETS-geschädigter Waldbestände

Vergleich verschiedener Möglichkeiten zur Konsolidierung und Weiterentwicklung durch das ETS schwer geschädigter Bestände unter Einbeziehung der betroffenen Restbestockung und natürlicher Anpassungsprozesse von Eschen-Populationen

TV5.2 (TU Dresden)**Arbeitspaket 4** Deskriptive Epidemiologie / Einzelbaumeffekte

Beschreibung und Untersuchung ökologischer Grundlagen der Epidemiologie des ETS bei variierender Mischungsart und Mischungsform

Arbeitspaket 5 Analytische Epidemiologie in situ

Einfluss des Mischungsanteils und der Mischungsform von Alteschen im Oberstand auf den Infektionsanteil der Naturverjüngung

Arbeitspaket 6 Experimentelle Epidemiologie ex situ

Das Arbeitspaket „Experimentelle Epidemiologie ex situ“ beschäftigt sich mit dem Effekt, den die Streu von Mischbaumarten auf das Infektionsgeschehen ausübt.

TV 5.1 (NW-FVA) und TV 5.2 (TUD) in Zusammenarbeit mit dem Forschungsvorhaben FraDiV (Uni Kiel) und dem TV FraxConnect:**Arbeitspaket 7** Handlungsempfehlung zum forstbetrieblichen Umgang mit dem ETS

Überprüfung und Überarbeitung bestehender waldbaulicher Empfehlungen zur Behandlung durch das ETS geschädigter Bestände unter Einbeziehung der Ergebnisse von (1) bis (4) sowie der Erkenntnisse der anderen FraxForFuture-Unterverbünde, v.a. UV 2 FraxMon und UV 4 FraxPath, sowie des Projektes FraDiV, v.a. hinsichtlich des Schutzes und der Erhaltung mit der Gemeinen Esche verbundener Arten und Lebensgemeinschaften

2. Stand der Technik

Die Gemeine Esche (*Fraxinus excelsior* L.) ist die wirtschaftlich bedeutendste und flächenmäßig wichtigste Edellaubbaumart in Deutschland (BW13: 2,3% der Holzbodenfläche, entspricht 252.000 ha). In der Regel tritt sie als Misch- bzw. Begleitbaumart in Laubholzbeständen der eutrophen Standorte auf. Bezüglich der Wasserversorgung nimmt sie ein breites Standortspektrum ein, das sich über weite Teile mit dem Herrschaftsbereich der konkurrenzstarken Buche überschneidet. Zudem wurde der Esche in der weiter zurückliegenden Vergangenheit kaum waldbauliche Beachtung geschenkt. Im Gegenteil, teilweise wurde ihr Verjüngungspotenzial („Vereschung“) sogar kritisch gesehen und dessen Eindämmung verfolgt. Das Management von buchengeprägten Beständen im Großschirmschlag war an den ökologischen Ansprüchen der Buche ausgerichtet und zielte auf deren gleichaltrige, dichte und homogene Vorverjüngung und ihre Wuchsüberlegenheit bei wenig diversen Lichtverhältnissen. Gerade in vielen der heute älteren Buchengrundbestände blieben Eschen-Mischungsanteile trotz deren enormen Verjüngungspotenzials deshalb gering oder gar mit wenigen Exemplaren auf die Rolle einer Begleitbaumart beschränkt. Größere Mischungsanteile der Esche konzentrierten sich auf die ökologischen Randbereiche nachlassender Buchendominanz: trocken-warme, flachgründige Standorte (thermophile Orchideen-Buchen-Wälder) oder durch Überschwemmungsdynamik beeinflusste Standorte der Auen bzw. der bachbegleitenden Erlen-Eschen-Wälder.

Dagegen resultieren in der Hauptschicht von Esche dominierte Bestände auf frischen bis nachhaltig frischen, terrestrischen Standorten abgesehen von Pflanzungen in aller Regel aus unplanmäßigen schnellen Räumungen, z. B. durch starkes Auftreten von Buchenschleimfluss bzw. nachkriegsbedingten Abtrieben von Buchenbeständen und der Fähigkeit der Esche, durch ein hohes anemochor verbreitetes Reproduktionspotenzial weniger Samenbäume solche Flächen ebenso rasch zu erobern, wie große Windwurfflächen oder an den Wald angrenzende Sukzessionsflächen. Solche Flächen sind nicht selten und kommen aufgrund ihrer Entstehungsursachen eher regional bzw. sogar betrieblich konzentriert vor.

Eine grundlegende Arbeit von Wagner (1999), der die ökologischen Zusammenhänge der Verjüngungsdynamik der Esche in Eschen-Buchen-Mischbeständen umfassend aufklärte, ist koinzident mit einem Paradigmenwechsel in der waldbaulichen Beurteilung der Esche als einer Baumart mit hoher Wertschätzung bei baumartenspezifischer Behandlung. Stichworte einer nun ausdrücklich auf die Erziehung von Wertholz ausgerichteten waldbaulichen Behandlung waren: Femelwirtschaft oder gar Lochhiebe zur Erzielung und Erhaltung höherer Mischungsanteile, Ausleseläuterungen zur Erhaltung von Qualität und Vitalität in der Hauptphase des Höhenzuwachses sowie frühe und sehr starke Auslesedurchforstungen für einen effektiven Wuchsvorsprung gegenüber später konkurrenzpotenten Schattbaumarten.

Das Auftreten und die rasante Ausbreitung des Eschentriebsterbens in Deutschland seit etwa 10 Jahren stellen die Anwendung dieser Waldbaukonzepte auf die Esche inzwischen komplett infrage und erfordern eine Neubeurteilung der Situation.

Der Erreger des Eschentriebsterbens ist der Askomyzet *Hymenoscyphus fraxineus* (T. Kowal.) Baral et al. (Synonym: *Hymenoscyphus pseudoalbidus*). Dieser Pilz stammt ursprünglich aus Ostasien und wurde

vermutlich unabsichtlich ein oder zwei Jahrzehnte vor dem im Jahre 1992 erstmals dokumentierten Auftreten von Symptomen des Eschentriebsterbens nach Europa eingeführt. In Asien lebt dieser Pilz endophytisch, wahrscheinlich phasenweise parasitisch und allenfalls schwach virulent in den Blättern der dort heimischen Eschenarten *Fraxinus mandshurica* und *F. chinensis*.

Die Fruchtkörper von *H. fraxineus* entstehen in der Zeit von Mai bis September auf mindestens einjährigen Eschenblattstielen in der Bodenstreu. Die so produzierten unzähligen Ascosporen verbreiten sich über den Wind, zum Teil über sehr weite Distanzen und infizieren die Blätter in den Kronen der Eschen (Gross et al. 2012). Hier verursacht der Pilz Blattnekrosen und führt häufig zu einem frühzeitigen Blattfall. Über die Blattstiele kann der Pilz bis in die Triebe vordringen und sie lokal zum Absterben bringen (HaHáková et al. 2017b). Durch die jährlich neuerfolgenden Infektionen kommt es zu einem sukzessiven Zurücksterben der Kronen, was letztlich den Tod des Baumes verursachen kann.

Zusätzlich besiedelt der Pilz auch häufig den Stammfuß der Eschen. Hier kann es zu ausgedehnten Nekrosen und nachfolgend zu starken Holzverfärbungen und -fäulen kommen, wobei auch andere Pilzarten wie der Hallimasch (*Armillaria* spp.) eine entscheidende Rolle spielen (Langer 2017; Enderle et al. 2017). Es gibt starke Indizien, dass *H. fraxineus* ein primärer Verursacher dieser Schäden ist. In Baden-Württemberg waren 2015 etwa ein Viertel aller Eschen von Stammfußnekrosen betroffen (Enderle et al. 2018), in einzelnen Beständen liegt der Befallsgrad bei über 90 %. Die Ätiologie von Stammfußnekrosen ist noch ungewiss und der Infektionsweg nicht völlig geklärt, wenngleich bekannt ist, dass Infektionen prinzipiell über Lentizellen erfolgen können und vermutlich hauptsächlich im Bereich der Rhizosphäre (Wurzeln und Wurzelanläufe) erfolgen (Meyn et al. 2019; Nemesio-Goriz et al. 2019). Stammfußnekrosen sind nicht nur ein wesentlicher Mortalitätsfaktor, sondern verursachen auch große Risiken hinsichtlich der Verkehrs- und Arbeitssicherheit. Sie treten räumlich stark differenziert auf und es gibt deutliche Hinweise auf einen starken Einfluss von Standortsfaktoren, wobei der Wasserhaushalt eine entscheidende Rolle zu spielen scheint. Der pH-Wert und Gehalt an organischer Substanz des Bodens steht hingegen im Zusammenhang mit der Schadintensität in den Eschenkronen (Turczański et al. 2019).

Die einfache Bekämpfung des Erregers im Rahmen eines integrierten Forstschutzes erscheint derzeit unmöglich und ist auch mittelfristig kaum absehbar (Enderle 2018). Durch die Forschung der Phytopathologie werden Infektionswege und Infektionsmechanismen zunehmend verstanden (Harper et al. 2016, Sollars et al. 2017, McMullan et al. 2018, Stocks et al. 2019), sind aber z. B. hinsichtlich der Rolle möglicherweise primärer Stammfußnekrosen, standörtlicher Einflüsse und der Rolle von Epiphyten und potenziellen Antagonisten längst nicht vollständig geklärt (Meyn et al. 2019; Nemesio-Goriz et al. 2019). Im Bereich der Forstgenetik gibt es durch die bisherige Forschung erste Ansätze der Identifizierung und Nutzung möglicher Resistenzen oder zumindest erhöhter Widerstandsfähigkeit. Entsprechende Bemühungen stehen jedoch noch am Anfang und werden von Rückschlägen begleitet (Carrari et al. 2015; Harper et al. 2016).

Forstbetriebe, die Wälder mit höheren Eschenanteilen bewirtschaften und in jüngerer Vergangenheit konsequent in die gezielte Bewirtschaftung der Esche investiert haben, sehen sich in einer schwierigen und sich rasch weiter verschärfenden Situation. Da schnelle Hilfe durch aktive Bekämpfungsmöglichkeiten und züchterische Erfolge kaum in Aussicht stehen, sind sie auf wirksame waldbauliche und betriebliche Entscheidungshilfen zur Schadensbegrenzung und -beherrschung dringend angewiesen.

Inzwischen wurden erste vorläufige waldbauliche Empfehlungen für die verunsicherte Praxis abgeleitet (Metzler et al. 2013), diese sind aber entweder wenig differenziert oder in einer Weise ambitioniert, dass ihre leichte Anwendbarkeit obstruiert ist (s. Forst-BW Praxis 2018). Außerdem basieren viele der vorläufigen Handlungsempfehlungen bislang weniger auf abgesicherten wissenschaftlichen Erkenntnissen als auf ersten Praxiserfahrungen und Prognosen, mithin haben sie noch keine allgemeine Verbreitung erfahren. Angesichts dramatisch fortschreitender Schäden und rasch schwindender Anteile vitaler Eschen in allen Bestandesentwicklungsphasen bleibt die Unsicherheit in der Forstpraxis weiterhin groß.

Resignation und aktives Handeln der Waldbesitzer tragen teilweise zu einer Forcierung des Eschen-Rückgangs bei. Der Entwertung stark geschädigter Eschen zuvorzukommen und die notwendige Verkehrs- und Arbeitssicherheit zu gewährleisten sind zwingende Motive dafür. Teilweise kommen jedoch angesichts guter Preise und Absatzmöglichkeiten für Eschenholz auch bisher relativ widerstands- und reproduktionsfähige, weniger stark geschädigte Altbäume zum Einschlag, bzw. es werden präventive Verkehrssicherungsmaßnahmen ausgeführt. Eschenpflanzungen erfolgen verständlicherweise aufgrund der Infektion des Baumschulmaterials nicht mehr, weder als Haupt- noch als Mischbaumart. Läuterungen bzw. Mischungsregulierung und Durchforstung setzen gezielt auf Alternativ-Baumarten, und stark geschädigte jüngere Eschenbestände werden vollflächig und teilweise unter vollständiger Entnahme aller Eschen in andere Baumarten umgebaut. All diese Maßnahmen, so notwendig und zweckmäßig sie im Einzelfall erscheinen mögen, tragen in ihrer Gesamtheit zu einem beschleunigten Verlust der Gemeinen Esche als Waldbaumart bei. Sie schmälern sowohl die Basis für mögliche natürliche Anpassungsprozesse als auch für eine gezielte Anpassungszüchtung. Gleichzeitig verkürzt sich damit das Zeitfenster für alle wissenschaftlichen Bemühungen mit dem Ziel einer „in situ“-Erhaltung der Baumart.

Seit dem 01.02.2019 werden mit dem Forschungsvorhaben FraDiv – „Bedeutung des Eschentriebsterbens für die Biodiversität von Wäldern und Strategien zu ihrer Erhaltung“ in Schleswig-Holstein vornehmlich die

Auswirkungen des Eschentriebsterbens auf die Biozönosen untersucht. In diesem landesbezogenen, primär naturschutzfachlich ausgerichteten Projekt wird vornehmlich die Biodiversität besonderer, bodenbewohnender Pilzarten als Indikator verwendet. Es werden die Auswirkungen des Eschentriebsterbens und der mögliche Biodiversitätsverlust bei Wegfall der Esche in den durch diese Baumarten geprägten Biozönosen erforscht. Zudem soll mit gezielter Verjüngung mit unterschiedlichen Baumarten der Verlust der Biodiversität eingeschränkt, bzw. vermieden werden (Gespräche mit Herrn Prof. Schrautzer am 26.02.2020 und <https://biologischesvielfalt.bfn.de/index.php?id=29970>).

3. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Förderschwerpunkt „Verantwortungsarten“ des Fördergebers Bundesamt für Naturschutz (BfN) wird seit dem 01.2.2019 das Projekt FraDiv – „Bedeutung des Eschentriebsterbens für die Biodiversität von Wäldern und Strategien zu ihrer Erhaltung“ gefördert. Finanziert wird dies primär naturschutzfachlich ausgerichtete Projekt mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) sowie des Ministeriums für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt, Natur und Digitalisierung in Schleswig-Holstein (MELUND). Projektträger ist die Christian-Albrechts-Universität zu Kiel. FraDiv wird von Herrn Prof. Dr. Joachim Schrautzer und Frau Prof. Dr. Alexandra Erfmeier geleitet. Sowohl das hier beantragte Projekt als auch das Projekt FraDiv haben das Eschentriebsterben zum Forschungsgegenstand. Beide Projekte unterscheiden sich in ihren Forschungszielen und –Ansätzen, ergänzen sich jedoch durchaus in Teilen und boten damit Anknüpfungen im Sinne von Synergien und Kooperationsmöglichkeiten.

Um ihre Forschungsziele zu erreichen sowie die Auswirkungen des Eschentriebsterbens zu messen und zu evaluieren, werden von beiden Arbeitsgruppen standardisierte Schadstufeneinteilungen an betroffenen Eschen vorgenommen. Im Verbundvorhaben 5 FraxSilva sollen wissenschaftlich fundierte Waldbausysteme evaluiert werden, die zum einen die Forstbetriebe bei der Schadensbegrenzung unterstützen, für Baumartenwahl und Waldbauverfahren rationelle Alternativen bereithalten und gleichzeitig dem erklärten Ziel einer Erhaltung, Stärkung und Anpassung der in den Waldbeständen vorhandenen Eschen nachkommen. Damit verfolgt FraxSilva eine möglichst weitgehende in situ Bewahrung von Eschen-Potenzialen im Zuge von waldbaulichen Maßnahmen. Im Sinne einer Eschenerhaltung ist dies eine elementare Voraussetzung zur dauerhaften Bewahrung der Esche, ihres Anpassungspotenzials und der an sie geknüpften Lebensgemeinschaften. Hier besteht ein wesentlicher Unterschied zum Projekt FraDiv: Die Hypothesen von FraxSilva konzentrieren sich auf den Zusammenhang der Erhaltung und Vitalität von Eschen aller Entwicklungsstadien im Hinblick auf Merkmale der Waldstruktur, die im Zuge waldbaulicher Maßnahmen beeinflussbar sind. Hingegen verfolgt das Projekt FraDiv in erster Linie die Erforschung der biologischen Diversität von Eschen-Wäldern und deren Gefährdung durch das Eschentriebsterben, wobei aktive und konservierende Maßnahmen zur Erhaltung ebenfalls eine Rolle spielen. Besonders hinsichtlich des letztgenannten Bereiches wurden absprachegemäß die Erkenntnisse beider Projekte ausgetauscht, verglichen und soweit möglich auch zu Ansätzen gemeinsamer Strategien verbunden, die integrativen Eingang in die „Handlungsempfehlung zum forstbetrieblichen Umgang mit dem Eschentriebsterben“ gefunden haben.

Außerdem erfolgte die Einbeziehung der Praxis vor allem im Zuge einer informellen, aber sehr fruchtbaren Zusammenarbeit mit dem Forstamtsleiter des niedersächsischen Forstamtes Reinhausen, Herrn Axel Pampe, sowie dem damaligen Forstamtsleiter des hessischen Forstamtes Schotten, Herrn Axel Norgall. Diese Zusammenarbeit, reichte von Unterstützung bei der Anlage der Versuchsflächen, über wiederholte fachliche Konsultationen und im Falle von Axel Pampe bis hin zu einer Teilnahme an der Podiumsdiskussion auf der Abschlussveranstaltung des Demonstrationsprojektes im Rahmen der Deutschen Pflanzenschutztag 2023 an der Uni Göttingen sowie einer aktiven Mitarbeit und Evaluierung der Praxisempfehlung zum forstbetrieblichen Umgang mit dem ETS und deren Kurzfassung.

II Ergebnisse

1. Erzielte Ergebnisse

Kurzfassung der wichtigsten Ergebnisse

Es ließen sich Zusammenhänge zwischen Merkmalen der Waldstruktur und der Befall bzw. der Schwere des Befalls mit dem ETS nachweisen. Der Schadverlauf bzw. die Prognose für Eschen im Derbholzbereich ist demzufolge günstiger auf trockeneren Kalkstandorten, je höher die soziale Stellung einer Esche im Bestandesgefüge ist und je geringer der Eschenanteil auf Bestandesebene ist. Letzterer Befund befindet sich in gewisser Übereinstimmung mit den Befunden eines ex situ-Experimentes zur Epidemiologie junger Eschen in Abhängigkeit des Anteils infizierter Eschenstreu an der gesamten Laubstreu. Der jährliche Durchmesserzuwachs adulter Eschen ist mit ihrer ETS-Schadstufe korreliert. Eschen einer geringen Schadausprägung (Schadstufe 1) leisten nach wie vor erhebliche Durchmesserzuwächse, die früheren gesunder Eschen entsprechen. Was die Anzahl verbleibender Eschen angeht, sorgen ETS-bedingte Mortalität

und derzeitiges Nutzungsverhalten zu einem schnellen Rückgang der Anzahl adulter Eschen in den Waldbeständen bei, wie mit einer Überlebenszeitfunktion auf der Grundlage der Daten einer unechten Versuchszeitreihe gezeigt werden konnte. Daraus zu folgern ist im Sinne einer Erhaltung der Eschen im Sinne eines Samen- und Anpassungspotenzials Zurückhaltung geboten. Eine weitere aktive Förderung von Eschen im Zuge von Durchforstungen soll nicht vollständig aufgegeben werden. Kriterium der Förderungswürdigkeit ist die Vitalität, zu beurteilen über die Schadstufe des Kronenzustandes (bis mindestens Schadstufe 2 förderungswürdig) und die Abwesenheit von Stammfußnekrosen als wichtiges zusätzliches Merkmal. Besonders erhaltens- und förderungswürdig zugunsten der Populationserhaltung sind dabei Eschen mit weiblich ausgeprägten Geschlechtsmerkmalen, die nach ihrem Kronenzustand aufgrund eines Samenanhangs oft etwas ungünstiger beurteilt werden.

Bezüglich der Naturverjüngung zeigen die im Projektrahmen erzielten Befunde bei einem vorhandenen Samenpotenzial nach wie hohe Dichten der Eschennaturverjüngung von partiell bis zu 300.000 je ha, die damit jenen vor dem ETS entsprechen. Ein sehr wichtiges Ergebnis ist, dass der Anteil befallener Eschen in der Naturverjüngung stark positiv mit ihrer Höhe korreliert ist. Demnach zeigen sehr kleine Eschen unter 15 cm Höhe noch kaum Befall. Dieser Zusammenhang gilt über alle untersuchten Flächen und ist in seinen Ursachen weiter zu erforschen. Auf jeden Fall erscheint die Erkenntnis relevant für das Verständnis des Selektionsgeschehens in Eschennaturverjüngung unter dem Einfluss des ETS. Zusätzlich bleibt die Wirkung von Licht und Verbiß auf das Wachstum von Eschennaturverjüngung weiterhin relevant. Quantifiziert werden konnten letztere Zusammenhänge jedoch auf den im Projekt neu angelegten Waldbauexperimenten bei Aufnahmen in nur zwei Vegetationsperioden bisher nicht. Sie erscheinen jedoch umso relevanter, als dass sich Höhenzuwachseinbußen und damit ein Verlust von interspezifischer Konkurrenzstärke an ETS-befallenen Jungeschen eindeutig nachweisen ließ. Dieser Umstand in Kombination mit dem Verzicht auf jegliche Maßnahmen zugunsten der Esche im Jungwuchs- und Jungbestandsstadium führt in Mischverjüngungen mit anderen Baumarten unweigerlich zum Zurückbleiben und Überwachsen der Jungeschen, erst recht bei limitiertem Licht. Ein Escheneinwuchs in das Gertenholzstadium findet in der Folge nicht mehr statt und damit fehlt der Lückenschluss zu einer angestrebten „Eschen-Nachhaltigkeit“. Um dem Gegenzusteuern werden Maßnahmen zu einer gezielten Förderung von Eschennaturverjüngung dringend empfohlen. Sie umfassen das Identifizieren und die Annahme von Verjüngungsbereichen mit Eschendominanz, die über Loch- bzw. Femelhiebe in Wachstum und Konkurrenzstärke gefördert werden sollen. Idealerweise wird dieses waldbauliche Vorgehen von einer Mischungs- und Konkurrenzregulierung innerhalb der Verjüngung zugunsten entwicklungsfähiger Eschen sowie der zumindest temporären wirksamen Verbißsenkung flankiert. Diese gezielte Eschenförderung benötigt aufmerksames Beobachten und Kontinuität. Bei erfolgreicher Etablierung ist ein Nachrändeln des Altbestandes unter Entnahme auch beschattenden Unterstandes in den Femelbereichen und ggf. eine Wiederholung der Konkurrenzregulierung im Nachwuchs angezeigt. Das Risiko dieser Maßnahmen liegt hauptsächlich im Aufwand der Maßnahmen selbst. Waldbaulich wird ein Ausfall geförderter Eschen in der Regel durch die Naturverjüngung anderer Baumarten rasch kompensiert.

Die Untersuchungen zur in situ-Epidemiologie ergaben, dass Cluster adulter Eschen in ihrem Umfeld auch zu einem verstärkten Infektionsgeschehen in der Verjüngung beitragen können, jedoch nach den vorliegenden Ergebnissen nicht in ihrer unmittelbaren Nähe sondern in Abständen zwischen 50 bis 80 m. Die Experimente zur in situ-Epidemiologie konnten zeigen, dass die Konzentration von ETS-Sporen und die Infektionswahrscheinlichkeit an gepflanzten jungen Eschen mit dem Anteil von Eschenlaub an der gesamten Laubstreu korreliert ist. Streu welcher anderen Laubbaumarten mit vertreten war, zeigte keinen gesonderten Einfluss. Außerdem stieg auch in diesem Experiment die Infektionswahrscheinlichkeit junger Eschen mit ihrer Größe, was biologisch zunächst mit der vergrößerten Oberfläche und der dadurch steigenden Befallsexposition erklärt wird.

Mit den IB+-Flächen und den Waldbauexperimenten wurde im Rahmen des Projektes eine bedeutende wissenschaftliche Infrastruktur geschaffen, aus der künftig noch ein bedeutender Erkenntnisgewinn zu erwarten ist. Dies trifft insbesondere auf die beiden angelegten Waldbauexperimente zu, die bei längerer Beobachtungszeit weitere Einblicke über die Zusammenhänge zu Wachstum, Selektion und potenziellen Erfolgsfaktoren künftiger Eschennaturverjüngung versprechen. In diesem Sinne sollen die genannten, mit dem Projekt FraxForFuture im Bereich der NW-FVA angelegten Versuche durch deren Abteilung Waldwachstum weitergeführt werden, ebenso wie die unechte Zeitreihe von Versuchen mit Eschenanteilen, im Folgenden als „1000-Eschen-Stichprobe“ bezeichnet.

1.1 AP1: Zusammenhänge zwischen Waldstruktur und der Schadausprägung des ETS

Identifikation von Faktoren der Waldstruktur und der Bestandesbehandlung etablierter Eschen-Rein- und Mischbestände (BHD > 7 cm), die im Zusammenhang mit geringerer Schädigung von Einzelbäumen und Beständen stehen; Diese Untersuchungen werden im Folgenden nach ihrer Untersuchungsgrundlage auch kurz als „1000-Eschen-Stichprobe“ bezeichnet.

Material und Methoden

Die zur Anwendung vorgesehenen statistischen Methoden (Generalized Linear Mixed Models – GLMM; spez. gemischtes logistisches Regressionsmodell) wurden bereits erprobt und auf die wiederholten Aufnahmen

fortgeführter Zeitreihen bestehender Eschenversuche der NW-FVA in unterschiedlichen Altern, auf unterschiedlichen Standorten und in unterschiedlichen Mischungsverhältnissen mit anderen Baumarten angewendet.

In die Untersuchung einbezogen wurden 35 ertragskundliche Versuchsparzellen, die sich auf vier Untersuchungsregionen konzentrieren. Den Kern der Untersuchungsflächen bilden Wuchsreihen (unechte Zeitreihen) in Buchen-Edellaubholz-Mischbeständen in vier Regionen. In der Region Göttinger Wald kommen weitere Ertragsversuche in Beständen vergleichbarer Struktur hinzu. Die Lage der Untersuchungsregionen folgt einem Nord-Süd-Verlauf (s. Abb. 1), der für den Zuständigkeitsbereich der NW-FVA den mutmaßlichen Haupteinwanderungsweg des Pathogens nachzeichnet. Dabei ist die Region Lauenburg im südöstlichen Schleswig-Holstein die einzige im Tiefland gelegene Untersuchungsregion, während es sich bei den anderen um Mittelgebirgsstandorte handelt.



Abbildung 2: Geografische Lage der Regionen der ertragskundlichen Versuchsfelder

Einen kurzen Überblick über die klimatische und standörtliche Einordnung der Untersuchungsregionen vermittelt Tabelle 1. Die Regionen Elm und Göttinger Wald ähneln sich hinsichtlich der edaphischen Verhältnisse. In beiden Regionen bildet der Muschelkalk das Ausgangssubstrat der Bodenbildung, im Elm allerdings mit höheren Lößanteilen, was tendenziell zu einer besseren Wasserspeicherkapazität der Böden führt. Klimatisch dagegen ist der Elm die trockenste der Regionen, die im südlichen Vogelsberg gelegene Region Schotten die feuchteste. Hinsichtlich der Nährstoffausstattung sind die Böden aller Regionen als eutroph zu kennzeichnen und genügen damit den hohen Trophieansprüchen der Esche.

Tabelle 1: Klimatische und standörtliche Charakterisierung der Versuchsregionen

	Lauenburg	Elm	Göttinger Wald	Schotten
mittl. Jahrestemp. [°C] ¹	8,3	8,8	8,0	8,4
Niederschlag [mm] ¹	690	620	740	870
Substrat	Lehm bzw. Geschiebemergel	Muschelkalk, deutlicher Lösseinfluss	Muschelkalk, geringerer Lösseinfluss	Basalt, Löss beeinflusst
Trophie	eutroph Carbonat im Unterboden	kalkeutroph	kalkeutroph	eutroph
Wasserhaushalt	staufrisch bis vorratsfrisch	frisch	mäßig frisch bis frisch	frisch bis betont frisch

Tabelle 2 zeigt die Gesamtzahl der in die Untersuchung einbezogenen Versuchsparzellen und Einzelbäume zu Beobachtungsbeginn sowie deren Verteilung auf die vier Regionen. Drei Versuchsparzellen, eine in Lauenburg und zwei im Göttinger Wald, weisen ein deutlich zweischichtiges Bestandesprofil mit beobachteten Eschen im Ober- und Unterstand auf, die somit durch deutlich abweichende Alter und eine auf ihre jeweilige Bestandesschicht bezogen unterschiedliche Konkurrenzsituation zu charakterisieren sind. Diese Bäume werden durch die Trennung von Ober- und Unterstand in der Folge als verschiedenen „Populationen“ angehörig betrachtet, sodass insgesamt Eschen aus 38 „Populationen“ beobachtet wurden.

Tabelle 2: Gesamtanzahl und regionale Verteilung der Beobachtungsflächen und Einzelbäume (sogenannte „1000-Eschen-Stichprobe“ mit Bezug auf die Ausgangszahl beobachteter Eschen)

Region	Lauenburg	Elm	Göttinger Wald	Schotten	
N Vers'felder	6 (+1)	7	16 (+2)	6	35 (38)
N Einzelbäume	220	116	319	357	1012

Schadbonitur zum Eschentriebsterben

Eine Schadbonitur an den Eschen der Baumklassen 1 bis 3 der Versuchsparzellen (Herrschender Bestand) nach den Baumklassen des VdFV (1902) erfolgte jährlich. Grundlage der Ansprache waren Schadstufen entsprechend dem im Demonstrationsverfahren FraxForFuture entwickelten Boniturschlüssel, nach dem die Bäume primär nach ihrem Belaubungs- und Kronenzustand unter Einbeziehung weiterer Hilfsmerkmale in einer Ordinalskala von 0 bis 5 einer Schadstufe zugeordnet werden.

Ein Unterschied der früheren Ansprachen zum aktuellen Schlüssel (Peters et al. 2021) bestand in der Klassifikation der Schadstufe 5. Nach dem aktuellen Schlüssel gelten Bäume der Schadstufe 5 als abgestorben, nach dem früheren NW-FVA-Schlüssel werden neben abgestorbenen auch absterbende Bäume, die noch Nottriebe aufwiesen, in Stufe 5 klassifiziert. Für diese Untersuchung wurde jedoch entsprechend anschlussfähig differenziert und ein vollständiges Absterben innerhalb der Schadstufe 5 im Jahr des Auftretens extra festgehalten. Dies hatte zur Folge, dass der Baum von da an aus dem Beobachtungskollektiv ausschied. Außerdem gab es in jedem Jahr einige wenige Bäume, deren Krone zum Zeitpunkt der durchgeführten Sommerbonitur nicht einsehbar war und die somit nicht bonitiert werden konnten. Die Erhebung erfolgte jeweils in der ersten Augushälfte durch geschulte, über die Jahre gleich bleibende Mitarbeiter. Für die spätere Modellbildung wurden die ETS-Schadstufen zu ETS-Schadgruppen zusammengefasst (s. Tab. 3). Dadurch wurde das Merkmal „Schädigung“ in eine binär codierte Variable überführt und so ein logistisches Regressionsmodell anwendbar.

¹ Werte für den Wuchsbezirk

Tabelle 3: Zusammenfassung der Schadstufen (s. Abb. 1) zu Schadgruppen; gleichzeitig Überführung der Schädigung in eine binär codierte Variable

ETS-Stufe	ETS-Gruppe	Schädigung
(0) 1- 2	0	(nicht bis) schwach geschädigt
3 - 5	1	deutlich bis stark geschädigt

Modellierung der ETS-Schadgruppe

Zur Beantwortung der Versuchsfragen nach regionalen Unterschieden, einem Muster des zeitlichen Verlaufs des Befallsgeschehens und dem Einfluss von Parametern der Bestandesstruktur auf die Schädigung der Eschen wurde ein binäres logistisches Regressionsmodell parametrisiert. Verwendet wurde eine Erweiterung der verallgemeinerten linearen Modelle mit Zufallseffekten für korrelierte Daten z. B. aus Cluster-Stichproben oder Messwiederholungen. Innerhalb der Regionen, für die Aussagen getroffen werden sollen, wurden die beobachteten Eschen ja nicht zufällig ausgewählt, sondern sie sind in den Versuchspartzellen geclustert. Außerdem wurde jeder einzelne Baum mehrfach beobachtet. Die Versuchsfläche wie auch der wiederholt beobachtete Einzelbaum, die für eine Korrelation der Beobachtungen stehen, werden im Modell deshalb als sogenannte Zufallsvariablen berücksichtigt. Das Beobachtungsjahr, als Ausdruck in zeitlichen Abständen wiederholter, in diesem Fall äquidistanter (Jahresabstand) Beobachtungen, bildet die zu berücksichtigende Innersubjektvariable.

Die ETS-Schadgruppe ist die binär codierte Zielvariable, für die eine Binomialverteilung angenommen werden soll, mit folgenden Ausprägungen:

$$Y_i = \begin{cases} 0 & \text{"schwach geschädigt"} \\ 1 & \text{"stark geschädigt"} \end{cases}$$

Als Link-Funktion wird eine Logit-Transformation in folgender Form verwendet:

$$\text{logit}(p_i) = \log\left(\frac{p_i}{1-p_i}\right) = \eta = \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \beta_2 x_{i2} + \dots$$

Neben der Untersuchung des zeitlichen Befallsverlaufes und des Einflusses der Region und wird eine potenzielle Wirkung der Merkmale Baumalter, Konkurrenzsituation des Einzelbaumes und Anteil der Esche an der Bestandesgrundfläche (im Folgenden kurz „Mischungsanteil“) auf die Wahrscheinlichkeit des Eintritts einer deutlichen bis starken Schädigung durch das Eschentriebsterben untersucht. Das Verhältnis des Brusthöhendurchmessers (Bhd) zum Bestandesmitteldurchmesser (dg) wird als einfacher, für alle Bäume der Stichprobe verfügbarer und keiner starken kurzfristigen Veränderung unterliegender Konkurrenzindex verwendet. Er wurde aus der jeweils neuesten ertragskundlichen Aufnahme der Parzelle (Aufnahmestichtage zwischen 2010 und 2012) errechnet. Tabelle 4 zeigt die statistischen Kennwerte der potenziellen Prädiktoren für die untersuchte Stichprobe. Es wird deutlich, dass die Ausprägungen der Merkmale sehr große Spannen abdecken, die auch in ganz unterschiedlichen Kombinationen im Datenmaterial enthalten sind.

Tabelle 4: Mittelwert ($\bar{x}$), Standardabweichung (SD) und Spannweite (Min. - Max.) von potenziell für die Schädigung relevanten Prädiktoren

Merkmal	$\bar{x}$	SD	Min. – Max.
Alter [J.]	62,8	41,3	19 - 170
BHD/dg	1,24	0,44	0,41 - 2,72
Misch'ant. Esche [%]	46,5	30,5	2,4 - 95,2

Deskriptive Datenanalyse

Einen Gesamtüberblick über den zeitlichen Verlauf des beobachteten Schadgeschehens und Unterschiede des Schadverlaufes auf der Ebene der Regionen gibt Abbildung 3.

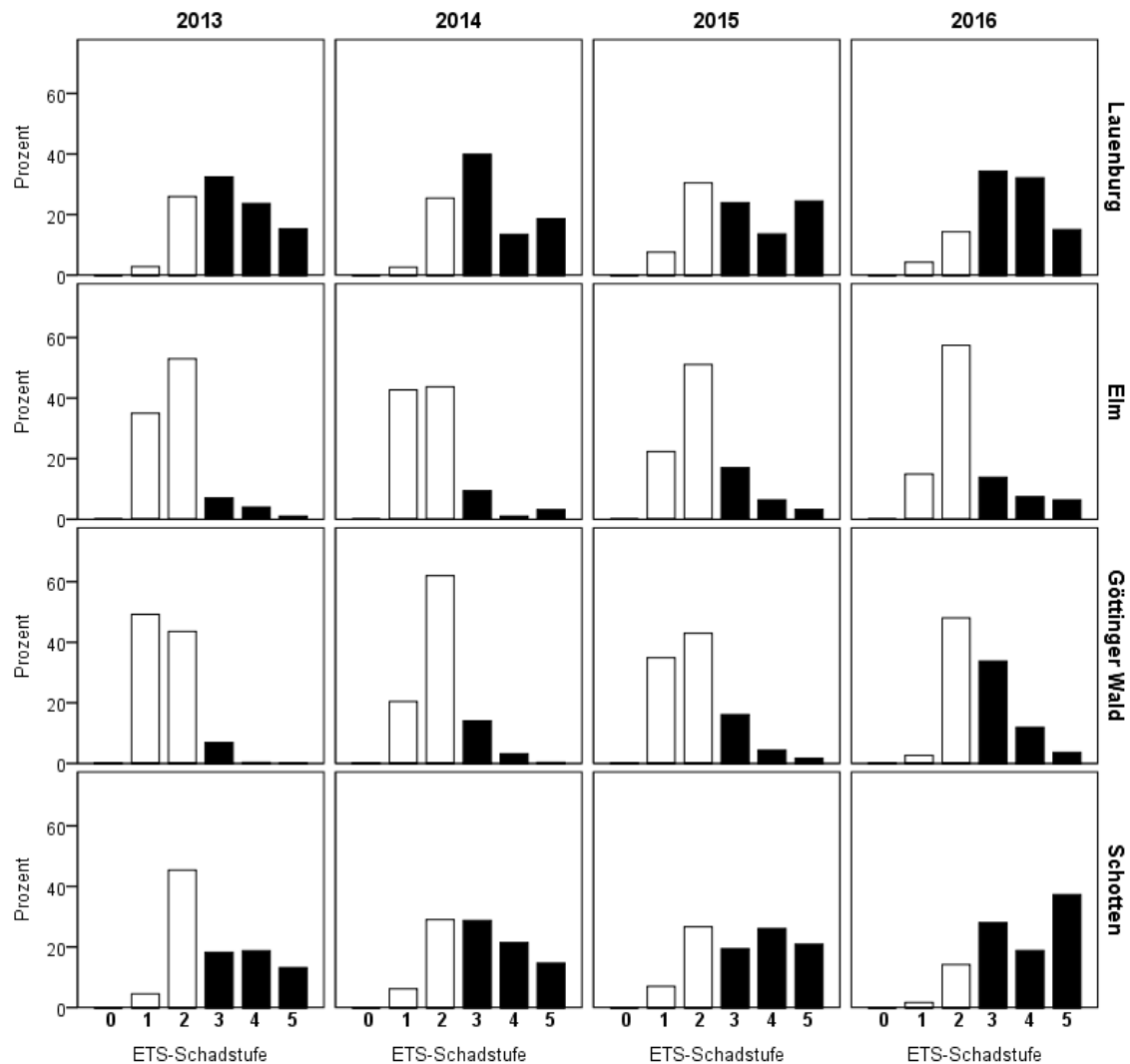


Abbildung 3: Entwicklung der Anteile der Schadstufen über den Beobachtungszeitraum nach Regionen. Schadstufe 1 und 2 (weiße Balken) bilden die Schadgruppe 0 – „schwach geschädigt“, die Schadstufen 3-5 (schwarze Balken) bilden die Schadgruppe 1 – „deutlich bis stark geschädigt“

Auffallend ist, dass bereits 2013 keine Esche der Stichprobe als vollkommen gesund angesprochen wurde. Insgesamt zeigt sich über alle Regionen hinweg ein mit der Zeit deutlicher Trend zur zunehmenden Besetzung höherer Schadstufen. Der bisherige Höhepunkt des Anteils deutlicher bis starker Schäden (Schadstufen 3-5) wird überall im Beobachtungsjahr 2016 erreicht. Dennoch gibt es ausgeprägte regionale Unterschiede. Die nördlichste Region Lauenburg startete bereits zu Beobachtungsbeginn auf einem sehr hohen Schadniveau. Auch in Schotten war das Schadensausmaß bereits 2013 deutlich höher als in den geografisch mittleren Regionen Elm und Göttinger Wald. Über den dreijährigen Beobachtungszeitraum verzeichnete die Region Schotten die dramatischste Verschlechterung des Gesundheitszustandes der Eschen. Für die zu Beginn noch mit vielen nur schwach geschädigten Eschen ausgestatteten Regionen Elm und Göttinger Wald wird im Verlauf ebenfalls eine Verschlechterung wirksam, ohne dass hier das anfängliche Schadniveau von Lauenburg oder Schotten erreicht werden. Fluktuationen innerhalb der Schadgruppen „schwach geschädigt“ (Schadstufen 1 und 2) und „deutlich bis stark geschädigt“ (Stufen 3-5) sind ablesbar. Bei der späteren Modellierung bleiben diese durch die Beschränkung der Zielvariablen Schadgruppe auf zwei Ausprägungen im Zusammenhang mit der gewählten Modellform unberücksichtigt.

Dass Eschen, die einer geringeren Konkurrenz unterliegen bzw. im Bestandesgefüge einen höheren Rang einnehmen, ausgedrückt durch einen größeren Quotienten zwischen dem Bhd des Baumes und dem Mitteldurchmesser des Bestandes, tendenziell geringer geschädigt zu sein scheinen, zeigt Abbildung 4 (links). Dieser Trend besteht über alle Beobachtungszeitpunkte.

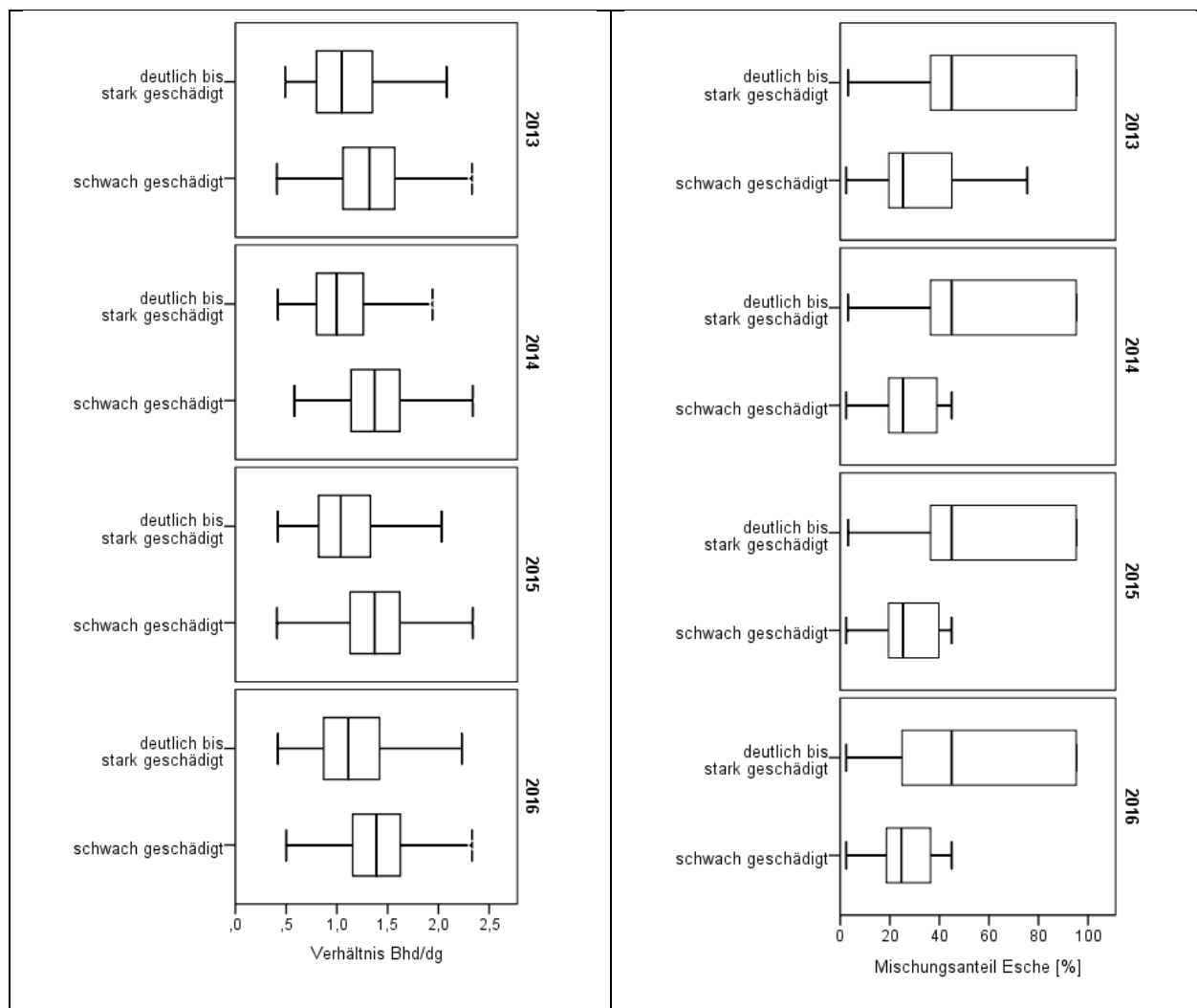


Abbildung 4: links: Boxplots (ohne Ausreißer und extreme Werte) des Konkurrenzmaßes Bhd/dg und rechts: des Mischungsanteils der Esche an der Bestandesgrundfläche [%] für die ETS-Schadgruppen „0“ (schwach) und „1“ (stark) über den Beobachtungszeitraum

Dagegen sind Eschen in Beständen mit hohen Mischungsanteilen der Baumart scheinbar stärker von Schäden durch das Triebsterben betroffen, als Exemplare aus Beständen mit wenig Esche (s. Abb. 5 rechts). Auch diese Tendenz zeigt sich in allen Jahren. Ein gerichteter Einfluss des Baumalters auf das Schädigeschehen (ohne Darstellung) war nach einer deskriptiven Analyse der Daten nicht zu vermuten.

Modellierung der Wahrscheinlichkeit einer starken Schädigung

Modelliert wurde die Wahrscheinlichkeit einer Ausprägung des Merkmals ETS-Schadgruppe („ets_gru“) als 1 „deutliche bis starke Schädigung“ ausgehend von der Referenz 0 „geringe Schädigung“ in Abhängigkeit von verschiedenen Prädiktoren.

Als signifikant erwiesen sich neben dem eingeschlossenen konstanten Term die Faktoren Region („region“) und Beobachtungsjahr („jahr“) und die intervallskalierten Kovariablen Mischungsanteil der Esche („misch_g“) und Konkurrenzmaß Bhd/dg („bhd_dg“). Ins Modell aufgenommen wurden die Haupteffekte der Prädiktoren. Die versuchsweise in eine Modellversion aufgenommene Kovariable Baumalter erwies sich als nicht signifikant und verschlechterte die Anpassungsgüte des Modells (deutliche Vergrößerung der Kriterien der Anpassungsgüte QIC – Quasi-Likelihood bzw. QICC - angepasste Quasi-Likelihood auf der Basis des QIC).

Der Einfluss der signifikanten Prädiktoren lässt sich über den Wert von $\text{Exp}(B)$ als Grenzwert-Verhältniszahl direkt interpretieren. $\text{Exp}(B)$ ist somit ein Multiplikator im Sinne der Veränderung der Wahrscheinlichkeit („Odds“) bei Erhöhung des Prädiktors um eine Einheit unter der Voraussetzung, dass alle anderen Bedingungen konstant bleiben. Es gilt:

$$\text{Odds}_{\text{nach}} = \text{Exp}(B) * \text{Odds}_{\text{vor}}$$

Tabelle 5 zeigt die Parameterschätzungen des Modells.

Tabelle 5: Parameterschätzer für die Modelleffekte des Modells zur Schätzung der ETS-Schadgruppe.
Exp(B) als Grenzwert-Verhältniszahl: Um diesen Faktor verändert sich die Wahrscheinlichkeit für den Eintritt der zu schätzenden Größe bei Erhöhung des Prädiktors um eine Einheit, wenn alle anderen Bedingungen gleich bleiben

Parameterschätzer										
Parameter	Regressionskoeffizient B	Standard Fehler	95% Wald-Konfidenzintervall		Hypothesentest			Exp(B)	95% Wald-Konfidenzintervall für Exp(B)	
			Unterer Wert	Oberer Wert	Wald-Chi-Quadrat	df	Sig.		Unterer Wert	Oberer Wert
(Konstanter Term)	1,603	,2942	1,027	2,180	29,701	1	,000	4,969	2,792	8,845
[Region=4]	-1,085	,2359	-1,547	-,623	21,159	1	,000	,338	,213	,537
[Region=3]	-1,867	,1728	-2,206	-1,528	116,778	1	,000	,155	,110	,217
[Region=2]	-2,320	,2474	-2,805	-1,835	87,916	1	,000	,098	,061	,160
[Region=1]	0 ^a	.	.	.	.	.	.	1	.	.
Mischungsanteil Esche [%]	,021	,0036	,014	,028	33,434	1	,000	1,021	1,014	1,028
Verhältnis Bhd/dg	-1,738	,1658	-2,063	-1,413	109,953	1	,000	,176	,127	,243
[Jahr=2016]	1,804	,1096	1,589	2,018	270,789	1	,000	6,072	4,898	7,527
[Jahr=2015]	,625	,0910	,446	,803	47,127	1	,000	1,868	1,563	2,232
[Jahr=2014]	,523	,0888	,348	,697	34,617	1	,000	1,686	1,417	2,007
[Jahr=2013]	0 ^a	.	.	.	.	.	.	1	.	.
(Skala)	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.

Abhängige Variable: ETS-Schadgruppe
Modell: (Konstanter Term), Region, Mischungsanteil Esche [%], Verhältnis Bhd/dg, Jahr
a. Auf 0 gesetzt, da dieser Parameter redundant ist.

Beispiele:

1. Eine Esche hat „vorher“ die Wahrscheinlichkeit einer „deutlichen bis starken Schädigung“ von 1,0. Dann hat sie, wenn ihr Bhd/dg-Verhältnis 2 statt 1 betrüge und alle anderen Bedingungen konstant blieben, nur noch eine Wahrscheinlichkeit von 0,176 „deutlich bis stark geschädigt“ zu sein.
2. Eine Esche, die in der Region 1 (Lauenburg) eine Wahrscheinlichkeit „deutlichen bis starken Schadens“ von 1,0 aufweist, hätte in der Region 3 (Göttinger Wald) unter sonst gleichen Bedingungen nur eine Wahrscheinlichkeit „deutlicher bis starker Schadausprägung“ von 0,155.

Deutlich treten die schon bei der deskriptiven Datenanalyse erkennbaren regionalen Unterschiede des Schadausmaßes hervor, aber auch der Trend zu einem zeitlichen Fortschreiten des Schadausmaßes wird im Modell abgebildet. Außerdem bestätigt das Modell die signifikant höhere Widerstandsfähigkeit von Eschen, die in ihrer soziologischen Stellung bzw. Konkurrenzstärke innerhalb des Bestandesgefüges einen hohen Rang einnehmen, und von Exemplaren in einer Umgebung mit geringeren Mischungsanteilen an Esche.

In diesem Arbeitspaket wurde der Einfluss von Parametern einfach zugänglicher waldwachstumskundlicher Größen auf die Ausprägung der neuartigen Pilzerkrankung Eschentriebsterben zu untersuchen. Auf der Grundlage der erhobenen Daten konnten Einflüsse des Mischungsanteils der Baumart Esche innerhalb des Bestandes und des Ranges der Esche im Bestandesgefüge, ausgedrückt über ein einfaches und in der zeitlichen Dynamik eher „träges“ Konkurrenzmaß Bhd/dg, als statistisch signifikant herausgearbeitet werden. Ebenfalls signifikant waren Unterschiede im Schadniveau zwischen verschiedenen Regionen. Dabei überrascht zunächst, dass in der vorliegenden Untersuchung die geografische Nord-Süd-Abfolge nicht eindeutig mit einem abnehmenden Schadniveau Richtung Süden, also entlang des vermuteten Haupteinwanderungsweges des Erregers, einhergeht. Vielmehr bleiben die Schäden in den in der Mitte gelegenen, standörtlich vergleichbaren Regionen Elm und Göttinger Wald bisher geringer, wenn auch dort mit zunehmender Tendenz. Für eine weitergehende kausale Interpretation bleibt der Faktor „Region“ in der vorliegenden Auswertung jedoch zu komplex. Weiterführend waren hier die Erkenntnisse zu standörtlichen Zusammenhängen der Ausprägung des ETS aus dem UV „FraxPath“, wonach ein signifikant höherer Schaden staunasse Standorte trifft und der Schadfortschritt auf ausgeprägt trockenen Standorten geringer bleibt. Dies passt regionsbezogen in die Muster der vorliegenden Auswertung. Eindeutig herausgearbeitet werden konnte der Trend einer deutlichen Zunahme der Schäden mit der Zeit. Auf der Ebene des Einzelbaumes gibt es neben den bisher am häufigsten zu verzeichnenden allmählichen Verschlechterungen, oft mit zwischenzeitlichem Verharren in einer Schadstufe auch immer wieder Erholungen von Bäumen um eine Schadstufe. Diese Beobachtung kann natürlich mit durch den gutachtlichen Charakter der Bonituren begründet sein. Nichtsdestotrotz gibt es bisher in fast allen Beobachtungsflächen Einzelbäume, die bisher erstaunlich vital bleiben.

Durchmesserzuwachs geschädigter Eschen

Zusammen mit der Ansprache der Schadstufe wurde an der 1000-Eschen-Stichprobe im Sommer auch der Durchmesser (BHD) gemessen. Wie zu vermuten, zeigt sich der auch der deutliche Einfluss der sichtbaren Schädigung der Eschen, ausgedrückt über die Schadstufe der Bonitur, auf die Durchmesserzuwachsleistung der Bäume als erheblich. Das drückt sich in signifikant verringerten Zuwachsraten mit zunehmender

Schädigung aus. Bei der Untersuchung zeigten sich Zusammenhänge, die auch in anderen Studien mit kleineren Stichprobenumfängen gefunden wurden.

Die folgende Grafik gibt die wichtigsten Ergebnisse gut wieder. Zunächst sind die meisten ausscheidenden Eschen von geringerer Dimension und auch die Vitalität der jungen Eschen wird im Mittel schlechter bewertet. Zudem nimmt der jährliche Zuwachs, wie zu erwarten, mit der Intensität der Infektion ab.

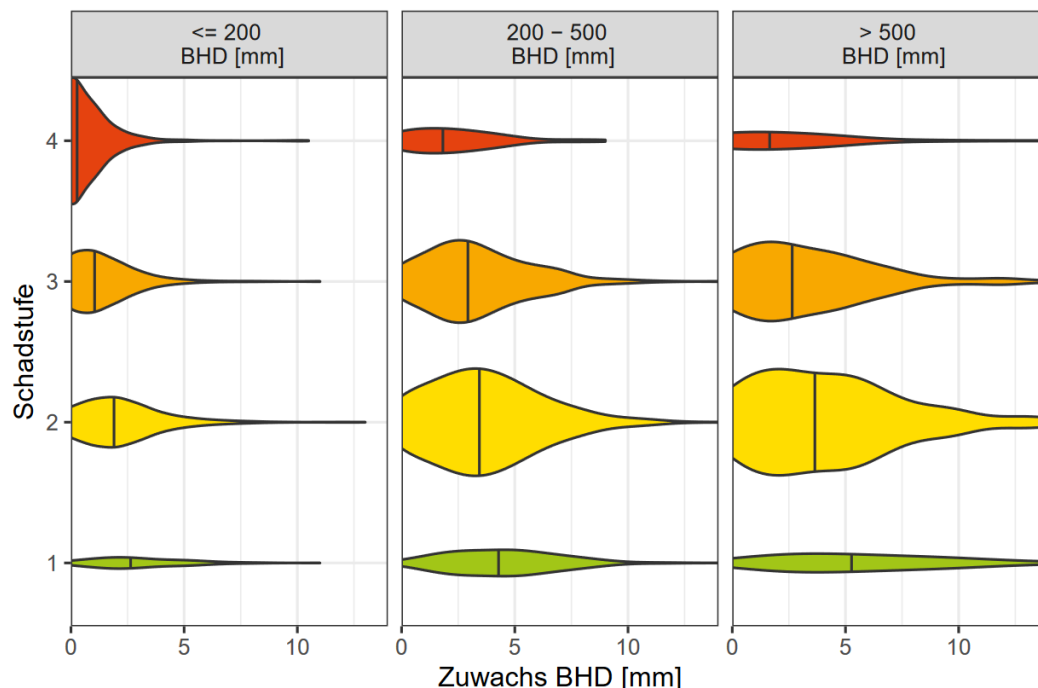


Abbildung 5: Violin-Plots beobachteter jährlicher BHD-Zuwächse der 1000-Eschen-Stichprobe nach Schadstufe nach drei Klassen des Ausgangs-BHD der Zuwachsbeobachtungen

Durch Mortalität infolge des Eschentriebsterbens und durch Entnahmen, die sich nicht nur auf absterbende oder stark geschädigte Bäume beschränkten, verkleinerte sich das Beobachtungskollektiv der 1000-Eschenstichprobe während der Versuchsdauer (s. Abb. 6). Dabei stellen, wenn ausdrücklich eine natürliche und durch das ETS erhöhte Mortalitätsrate gemessen werden soll, die Entnahmen im versuchstechnischen Sinn eine gewisse Störung dar. Das ETS ist zwar die Hauptursache des über die Beobachtungsjahre kumulierten Ausscheidens, jedoch tragen auch die Entnahmen lebender Eschen unterschiedlicher Vitalitätsstufen, die ein normales forstliches Handeln gemäß bisher geltender Behandlungsempfehlungen geschädigter Eschenbestände nachvollziehen, deutlich zur Reduktion des verbleibenden Eschen-Kollektivs der Versuchsbestände bei.

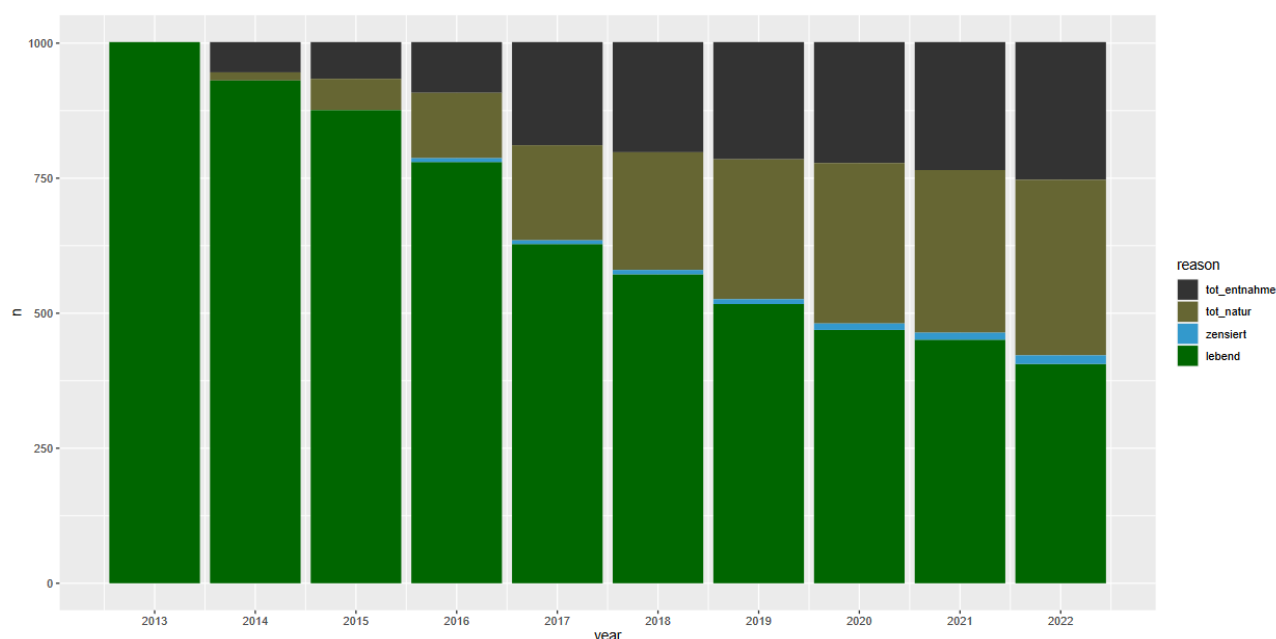


Abbildung 6: Reduktion der beobachteten Stichprobe während des Beobachtungszeitraums durch Mortalität und Entnahmen („zensiert“ bedeutet unklarer Verbleib des Baumes und unklare Ausscheideursache)

Aus den empirischen Beobachtungen der Ausscheideereignisse über dem Alter lässt sich mit der Kaplan-Meier-Funktion ein Ausgleich darstellen (Abb. 7). Bei der Interpretation des gezeigten funktionalen Ausgleichs bleibt zu beachten, dass hier zunächst nicht zwischen aktiven Entnahmen und ETS als Mortalitätsursache unterschieden wird und es sich bei den beobachteten Beständen zudem um eine unechte Zeitreihe handelt. Abgebildet wird die Repräsentation „normaler“ bewirtschafteter Eschenbestände unter dem Einfluss des ETS, das einerseits zusätzlich zu Eschenverlusten beiträgt und andererseits mutmaßlich bereits den „Einwuchs“ aus den jungen Altern in höhere Altersstadien reduziert. Insofern wird deutlich, dass ein „weiter wie bisher“ in der Behandlung der vorhandenen Eschenbestände bei anhaltendem ETS schnell zu sehr starken Stammzahlreduktionen verbleibender Eschen führt. Mit dem raschen Verlust eines großen Teils adulter Eschen verbunden ist eine rasche und markante Einschränkung des für eine natürliche Anpassung entscheidenden Naturverjüngungspotenzials.

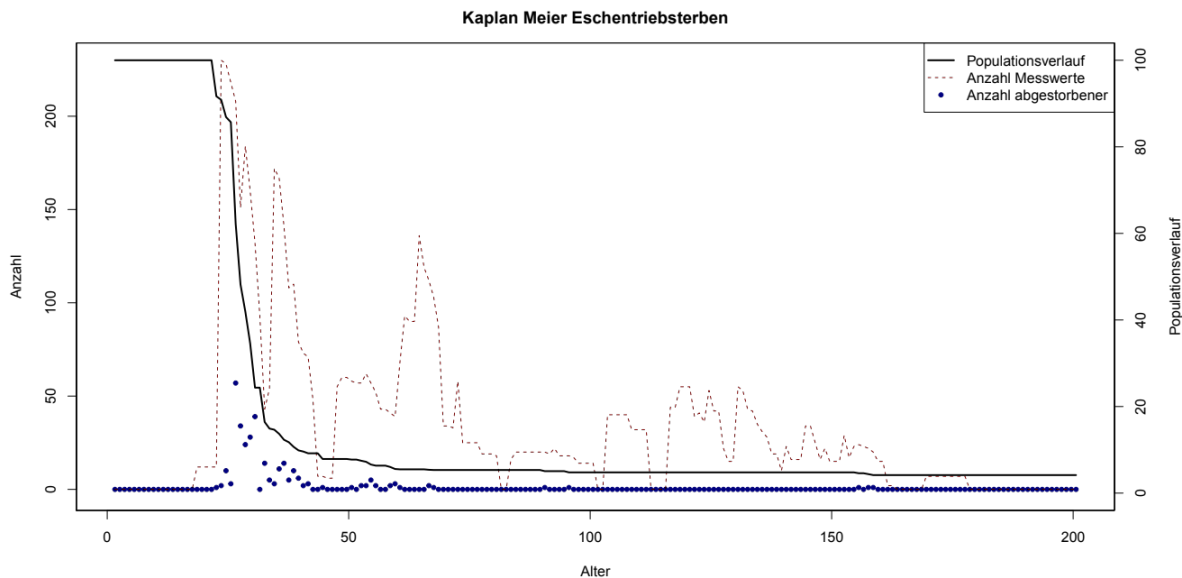


Abbildung 7: Populationsverlauf der Eschen auf der Basis der 1000-Eschen-Stichprobe aus den Versuchsflächen der unechten Zeitreihen über den Beobachtungszeitraums durch Mortalität und

1.2 AP 2: Eschennaturverjüngung unter dem Einfluss des ETS

Untersuchung von Wirkungszusammenhängen der Etablierung, des Wachstums und der Konkurrenzfähigkeit von Eschennaturverjüngung in Mischbeständen unter dem Einfluss des ETS

Versuchsanlagen

Originär für diese Untersuchung wurden zwei Versuchsflächen auf unterschiedlichen Standorten, einmal in den Kreisforsten Lauenburg in südöstlichen Schleswig-Holstein auf einem Geschiebemergelstandort und einmal im südniedersächsischen Forstamt Reinhausen auf einem flach- bis mittelgründigen Muschelkalkstandort, etabliert. Die Ausgangsbestockungen bestanden in beiden Fällen aus Eschen-Mischbeständen hs. mit Rotbuche und anderen Edellaubbaumarten (Berg-, Spitz-, vereinzelt Feldahorn, in Lauenburg Roterle, in Göttingen Winterlinde sowie Hainbuche) und verfügten über einen hohen Bestockungsgrad. Das Bestandesalter lag bei 75 (Reinhausen) bzw. 130 Jahren (Lauenburg). Beide Bestände waren vor dem Experiment geschlossen, dunkel und weitgehend ohne jegliche Vorverjüngung. Eine starke Vertikalstruktur mit Unters- und Zwischenstand sorgte für nur wenig Licht am Waldboden. Dies war wichtig, um wie angestrebt die Initialphase der Eschennaturverjüngung einleiten und beobachten zu können. Deshalb konnten auch keine reinen Eschenbestände beobachtet werden, in denen durch die bereits fortgeschrittene Erkrankung eine starke Auflichtung sowohl für eine üppige Begleitvegetation als auch etablierte Verjüngung unbekannter Vorgeschichte gesorgt hätte.

Beide Versuche enthielten die Varianten „gezäunt“ und „nicht gezäunt“ in Reinhausen in zweifacher echter Wiederholung. In Lauenburg war eine sinnvolle Wiederholung aus Platzgründen nicht möglich.

Der gesamte Oberstand der Versuchsparzellen wurde nach den üblichen waldwachstumskundlichen Standards mit Höhe, BHD, Art und Baumpositionen aufgenommen. Nach Einmessung der Versuchsfelder, aber vor Beobachtungsbeginn und Einrichtung der Verjüngungsplots wurde der Bestandesschirm der Versuchsflächen unregelmäßig aufgelichtet, mit dem Ziel deutlich unterschiedliche Beleuchtungsverhältnisse über den zukünftigen Versuchsfeldern herzustellen. Anschließend wurden über die Versuchsanlagen systematische Raster mit einem Abstand von 5 mal 5 Meter als Bezugspunkte der Aufnahme-Subplots vermessen und markiert, um dort die Verjüngung an Esche und aller Konkurrenzbaumarten aufzunehmen. Die

Subplots sind exakt 1 m² groß und mit Pflöcken dauerhaft markiert. Auf den Subplots wurden jeweils nach dem Abschluss einer Vegetationsperiode alle Bäume aufgenommen und mit Art und Höhe notiert. Die vorkommenden Eschen wurde außerdem nach einem im Projekt abgestimmt Schlüssel auf ihre Krankheitsschwere angesprochen, etwaige Besonderheiten wie beispielsweise Gallbildung, wurden gesondert aufgenommen. Für jeden Subplot wurden außerdem die exakte Position und die Überschirmung mithilfe hemisphärischer Fotos (sogenannte Fish-Eye-Fotos, Sommer 2021) gemessen.

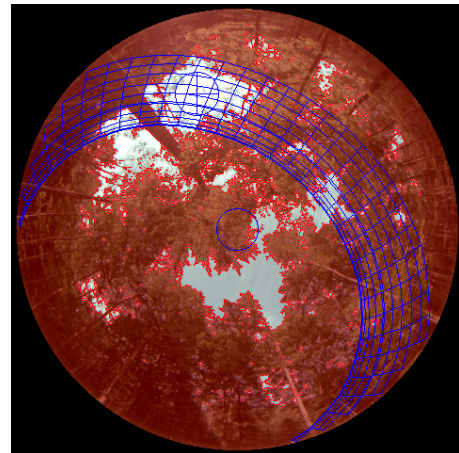


Abbildung 8: Detailaufnahme eines Aufnahmeplots mit pflanzenindividueller Baummarkierung zum Wiederauffinden; rechts: Beispiel eines Fish-Eye-Fotos über einem Versuchsplot

Die Aufnahme auf den Subplots wurde einmal wiederholt, dadurch konnten die Höhenzuwächse und ausscheidende Bäume für die Kollektive abgeleitet werden. Für einzelbaumbezogene Zuwachsmessungen und die Einschätzung der Mortalität der Eschen wurden außerdem pro Subplot bis zu 4 Eschen zufällig ausgewählt, dauerhaft markiert und ebenfalls zwei Mal 2021 und 2022 aufgenommen. Den beispielhaften Aufbau einer Wiederholung einer der Versuchsflächen zeigt die folgende Abbildung.

Auf die IBF+ des Gesamtverbundes, auf denen eine einmalige Verjüngungsaufnahme stattfand, wurde das Aufnahmeverfahren in leicht angepasster Form ebenfalls angewendet, sodass die Ergebnisse miteinander vergleichbar sind.

Auf neun IB-Flächen eines standörtlichen und klimatischen Gradienten in acht deutschen Bundesländern wurde die Naturverjüngung unter Aufnahme einer Vielzahl von Parametern untersucht (Langer et al., 2022). Ziel war es, über die Waldbauexperimente hinaus zusätzliche Erkenntnisse über den Einfluss der Konstitution, v.a. der Wuchshöhe von jungen Eschen und deren Konkurrenzsituation, v.a. auch hinsichtlich der interspezifischen Konkurrenz in baumartengemischten Verjüngungen auf die Infektion mit ETS zu gewinnen. Dieser Teil der Untersuchungen erfolgte abgestimmt mit dem Projektträger in Änderung des ursprünglichen Antrages. Inhalte des AP 3 wurden stattdessen gekürzt.

Dazu wurden auf jeder der Flächen zwischen 65 und 98 Plots à 1 Quadratmeter mit einem Rasterabstand von 10 Metern eingerichtet, so dass 1% der gesamten Fläche aufgenommen wurde. Auf jedem Plot wurden die Höhen und durch Treibrückmessung die beiden zurückliegenden Höhenzuwächse der Eschen und aller anderen Baumarten dokumentiert. Zusätzlich wurde die Symptomatik des Eschentriebsterbens pro Pflanze eingeschätzt, dabei fand der innerhalb des Projektes harmonisierte Boniturschlüssel Verwendung (Peters et al. 2021). Für eine bessere Skalierbarkeit musste der umfangreiche Schlüssel vereinfacht werden. Dafür wurden pro Esche die Zahl aller Triebe in verschiedenen Kategorien aufgenommen: Triebe, die im letzten Sommer von ETS infiziert wurden und nur eine Nekrose aufwiesen, Triebe, die im letzten Sommer an ETS abgestorben sind und Triebe, die aus oder anderen, häufig in ihrer Ursache nicht mehr zu ermittelnden Gründen abgestorben sind. Infektionen am derzeit höchsten Trieb wurden gesondert verzeichnet.

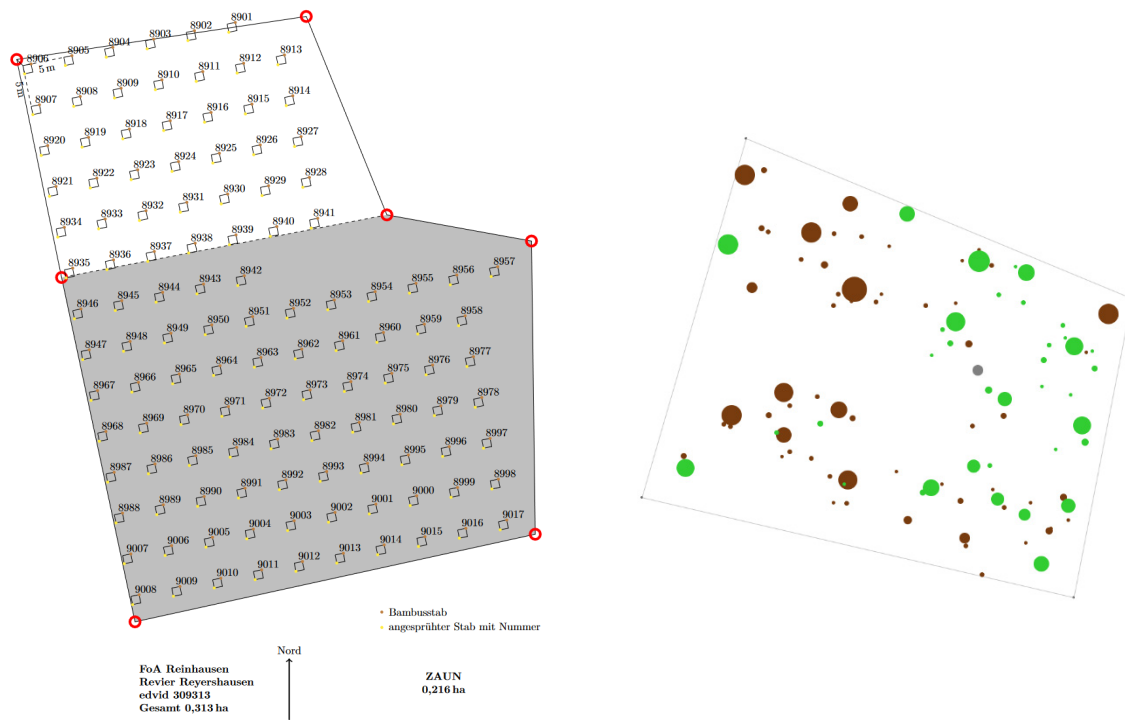


Abbildung 9: Exemplarischer Versuchsaufbau der Waldbauexperimente zur Initialphase natürlicher Eschenverjüngung unter dem Einfluss des ETS (Forstamt Reinhausen, Wiederholung 1); oben links: Plot-Raster einer Wiederholung; oben rechts: Stammverteilungsplan nach Einschlag für die Variante „gezäunt“ der Wdh. 1; unten: Foto der Bestandesansicht nach Holzeinschlag und vor dem Einrichten der Versuchsplots (Winter 2020/21)

Die Datenaufnahmen wurden im Winter nach Blattfall durchgeführt. Hierdurch war sichergestellt, dass innerhalb der Messkampagne von mehreren Wochen keine Veränderungen im Infektionsgeschehen stattfanden und Nekrosen besser zu erkennen waren und zusätzlich durch verbliebene, verwelkte Blätter die keine natürliche Seneszenz erfahren hatten, eindeutig dem ETS zugeordnet werden konnten.

Ergebnisse

Insgesamt werden auf einer Gesamtfläche der Plots von 726 m² 5918 Eschen gefunden, mit einer starken variierenden Dichte zwischen den Plots einer Fläche, v.a. aber zwischen den verschiedenen Untersuchungsflächen (Tab. 1). Der Anteil an Eschen in der Verjüngung schwankt zwischen 2% und 79%, bei variierenden Grundflächenanteilen von Eschen im Oberstand zwischen 23% und 68%.

Es hat sich gezeigt, dass trotz des Infektionsdrucks, der bereits seit vielen Jahren auf den Beständen lastet, in den meisten Beständen mit Eschen im Altbestand und der Umgebung immer noch eine ausreichende bis sehr reichliche Eschenverjüngung zu finden ist bzw. sich auch unter derzeitigen Bedingungen noch neu einstellt (Tabelle 6). Die Zahlen von bis zu 290.000 Eschen/ha sind vergleichbar mit Werten vor dem Auftreten des Eschentriebsterbens (Wagner 1999). Diese enormen Anzahlen junger Eschen treten v.a. auf Flächen mit insgesamt sehr hohen Verjüngungsdichten auf, insbesondere auf den Flächen in Thüringen und Sachsen-Anhalt auf flachgründigen Muschelkalkstandorten und in trockenen Regionalklimaten. Hier ist gleichzeitig der Anteil der Eschen an der gesamten Naturverjüngung mit 79 bzw. 65 % sehr dominant. Insgesamt zwischen den Untersuchungsflächen stark variierende Dichten der Naturverjüngung lassen sich bisher nur schwer erklären. Die Grundfläche oder der Anteil der Eschen des Altbestandes zeigen jedenfalls keinen Zusammenhang zur Dichte der Eschennaturverjüngung. Vermutlich sorgt eine Kombination von Effekten der Konkurrenzvegetation und eines starken Wildverbisses auf einigen Flächen für geringe Verjüngungsdichten, die dort auch die anderen Baumarten betreffen.

Tabelle 6: Kennwerte zu Dichte und Eschenanteil für die Altbestände und die Naturverjüngungen der Untersuchungsflächen (Intensivbeobachtungsflächen – IBF+), Abkürzungen Bundesländer: BB – Brandenburg, BW – Baden-Württemberg, HE – Hessen, MV – Mecklenburg-Vorpommern, NI – Niedersachsen, SN – Sachsen, ST – Sachsen-Anhalt, TH – Thüringen)

Altbestand (e 7cm BHD)				Naturverjüngung			ETS		
IBF	Grundflä.	Grundflä. Esche	Grund- flächenanteil Esche	Anzahl alle Baumarten	Anzahl Eschen	Anteil Esche	gesamt pro ha	Eschen / ha	Anteil Esche ETS
	[m²/ha]	[m²/ha]	[%]			[%]	[ha ⁻¹]	[ha ⁻¹]	[%]
BW_2	30,1	7,0	23	2559	59	2,3	393692	9077	8
ST_1	24,8	6,5	26	2491	1963	78,8	366324	288676	6
BB_1	41,0	15,3	37	1240	487	39,3	137778	54111	6
HE_1	21,9	8,2	37	2055	396	19,3	223370	43043	12
SN_1	30,7	12,0	39	1750	579	33,1	201149	66552	16
NI_1	27,6	12,6	46	685	174	25,4	99275	25217	13
TH_1	20,9	9,6	46	2882	1860	64,5	355802	229630	5
BW_1	25,6	12,7	50	2103	316	15,0	276711	41579	15
MV_1	31,5	21,5	68	219	84	38,4	22347	8571	11

Die beobachteten hohen Dichten der Eschennaturverjüngung auf einem Teil der Flächen sind hingegen ermutigend hinsichtlich eines natürlichen Potenzials für eine Eschenerhaltung. Eine frühe Infektion mit ETS könnte anfällige Individuen abtöten oder ihren Zuwachs mindern und dadurch einen Selektionsdruck ausüben. Die geringen Infektionszahlen initialer Verjüngungsstadien sind in diesem Zusammenhang möglicherweise nicht automatisch unbedingt von Vorteil. Eine Hypothese zur Erklärung dessen ist, dass sehr junge Eschen bereits eine einzelne Infektion nicht überleben und daher gar nicht mehr erfasst werden, wenngleich dies anhand der Beobachtungen während der Messungen wenig plausibel erscheint. Plausibler scheint ein Zusammenhang mit der Höhe Eschen bzw. ihrem Alter der. Dieser vorläufige Befund sollte weitergehend untersucht werden, insbesondere unter Berücksichtigung der Lichtabhängigkeit des Höhenzuwachses, ein Zusammenhang der aufgrund der einmaligen Aufnahme der IBF+ mit nur tlw. Lichtmessungen bzw. auch auf den Experimentalfächen aufgrund der initialen Verjüngungsphase bisher nicht zum Tragen kam.

Die Fragestellung nach der Prognose für das weitere wirtschaftliche Vorhandensein von Eschen in deutschen Wäldern ist auf der Grundlage dieser Untersuchung etwas besser zu beantworten. Wie gezeigt, ist aktuell jedenfalls immer noch reichlich Naturverjüngung vorhanden. Diese Feststellung bedarf aber der näheren Differenzierung. Insgesamt waren 466 Eschen von ETS betroffen (Tabelle 6). Der Anteil der Eschen, die in irgendeiner Form Symptome des Eschentriebsterbens aufweisen, liegt damit zwischen 5% und 16%. An diesem Befund ist zunächst einmal überraschend, dass nur ein derart geringer Anteil der jungen Eschen mit dem Eschentriebsterben infiziert ist bzw. sichtbare Infektionen an den Trieben aufweist. Infektionen an den Blättern sind rein optisch vergleichsweise schwierig dem ETS zuzuordnen und spielen auch für den Wuchserfolg der Eschen vermutlich erst eine Rolle, wenn sie den Trieb erreichen und dort Leitgefäße zerstören und dadurch Triebteile absterben. Daher wurden nur sichtbare Nekrosen an den Trieben als

Infektionen gewertet. Der Leittrieb ist dabei nicht automatisch betroffen, sondern häufiger handelte es sich hier um Seitentriebe (vgl. Tab. 7). Zusätzlich fällt auf, dass nur etwas weniger Eschen noch lebende Triebe mit Nekrosen haben als bereits durch das ETS vollständig abgestorbene Triebe. Dies spricht dafür, dass Infektionen in der Naturverjüngung schnell ablaufen. Der Prozess von der Infektion des Blattes bis zum vollständigen Absterben des einzelnen Triebes läuft innerhalb von zwei Vegetationsperioden oder sogar schneller ab. Die Anzahl der Eschen mit abgestorbenen Trieben älter als ein Jahr steht im Verhältnis 1,4 zu 1. Dies lässt sich dahingehend interpretieren, dass infizierte Triebe nur etwa 3-4 Jahre als solche zu erkennen sind, und danach entweder schwer zu erkennen sind oder sogar fehlen. Die hohe Anzahl von Eschen mit unbekannten oder anderen Schäden rührt vermutlich zu einem großen Teil von ETS-Infektionen her, die nicht mehr zweifelsfrei als solche zu erkennen sind.

Tabelle 7: Tribschäden durch ETS (nach Entstehungszeitpunkt) und sonstige Tribschäden an Eschen der Naturverjüngung weiter differenziert nach Schadensausprägung

	Anzahl	Höchster Trieb betroffen
Eschen gesamt	5918	-
ETS gesamt	466	251
durch ETS abgestorbener Trieb	263	69
frisch durch ETS abgestorbener Trieb	190	103
lebender Trieb mit ETS-Nekrose	130	79
Tribschäden mit nicht zuzuordnender Ursache	889	130

Zur Verbreitung und zum Verlauf des Eschentriebsterbens (ETS) an Altbäumen wurde bereits sehr viel geforscht. Weniger intensiv und noch nicht sehr lange hingegen wird das Infektionsgeschehen bei sehr jungen Bäumen insbesondere in der Naturverjüngung beobachtet. Die wenigen Studien existierenden Studien auf quantitativer Grundlage finden durchgehend höhere Werte und auch Pflanzungen im Freiland mit künstlichem Infektionsdruck resultieren demnach in höheren Befallszahlen (Enderle, Fussi et al. 2017). Lygis et al. (2014) untersuchten 775 Jungeschen in Litauen und fand Infektionen an 53,9%, Dietrich (2016) fand Infektionen an 20 % aller Jungeschen in Schweden und Pušpure & Matisons (2017) untersuchten insgesamt 7533 Jungeschen in Lettland, von denen immerhin 25% infiziert waren. Diese Ergebnisse variieren stark und sind eventuell nicht auf Deutschland übertragbar. Auf Flächen in Deutschland gibt es bisher nur eine solche Untersuchung von (Enderle, Busskamp, et al., 2017), die Infektionen an etwa 95 % (!) der 867 lebenden jungen Eschen ihrer Stichprobe fanden.

Die geringen Anteile an infizierten Eschen in der vorliegenden umfassenden Untersuchung bleiben damit geringer bis wesentlich geringer als alle angegebenen Vergleichswerte in der zitierten Literatur. Bemerkenswert ist außerdem, dass in der vorliegenden Untersuchung die Infektionsrate bezogen auf die Verjüngungsdichten über alle Flächen relativ konstant bleibt, so dass sich vermeintliche Besonderheiten und Unterschiede der einzelnen Flächen nicht in einer unterschiedlichen relativen Anfälligkeit vorhandener Eschenverjüngung auszudrücken scheinen.

Es kann mehrere Gründe für die geringe Infektionsrate der Eschenverjüngung geben. Die jüngste Generation an Eschen ist möglicherweise durch eine bereits ablaufende Anpassung weniger anfällig als ältere Individuen (Semizer-Cuming et al., 2021). Dagegen spricht, dass eine klassische Evolution über Generationen noch nicht stattgefunden hat. Die einzige mögliche Anpassung wäre das Ausscheiden von sehr anfälligen Alteschen, allerdings erscheint wenig plausibel, dass konsistent über alle Versuchsflächen in den letzten 5 Jahren so viele Eschen verloren gegangen sind, dass die nun produzierten Nachkommen nur noch 5-16 % Infektionsraten aufzeigen, während ihre Elternbäume mehr oder weniger allesamt sichtbare Vitalitätseinschränkungen haben. Wahrscheinlicher ist ein Zusammenhang mit der Höhe der Eschen. Viele vorherige Untersuchungen haben keine kleinflächigen Vollaufnahmen gemacht, sondern eine eher randomisierte Individuenauswahl. Dabei kann es vorkommen, dass geplant oder ungeplant besonders kleine Eschen trotz ihrer hohen Zahl gegenüber größeren Exemplaren seltener untersucht werden. Durch die gefundene Korrelation der Größe mit der Infektionsrate lässt sich daher annehmen, dass eine Untersuchung mit vielen großen Eschen auch höhere Infektionsanteile findet.

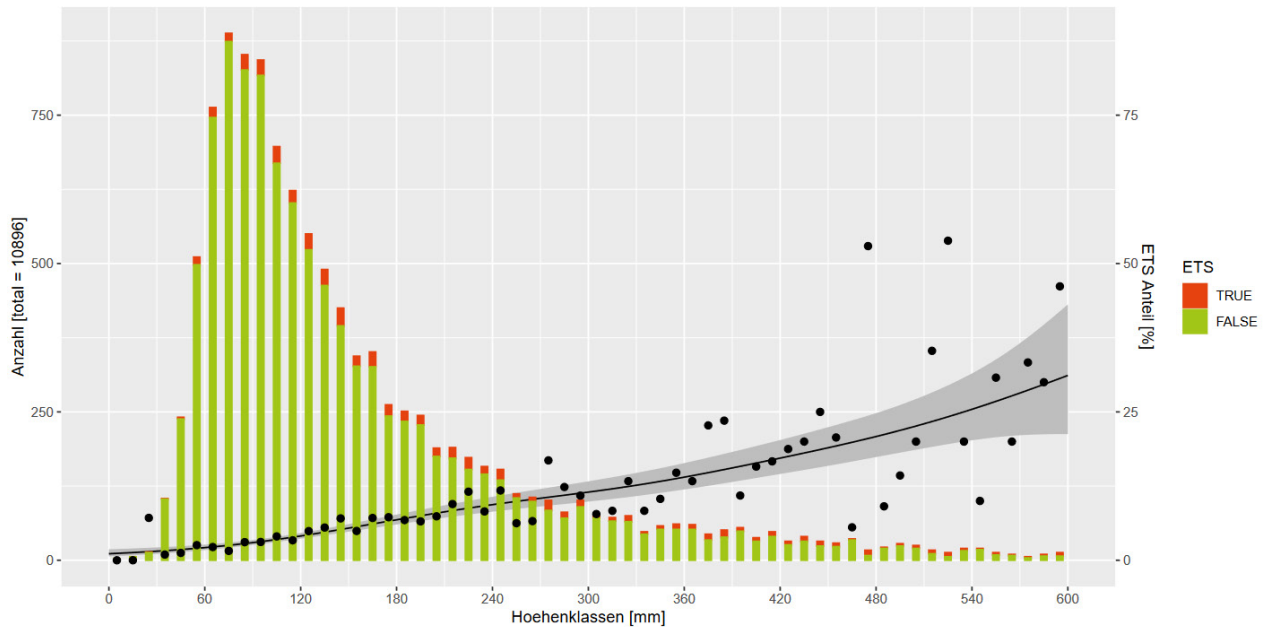


Abbildung 10: Anzahl detektierter Naturverjüngungseschen in 5-cm-Höhenklassen unterschieden nach infizierten und nicht infizierten Exemplaren sowie korrespondierende Relativanteile geschädigter an der Gesamtzahl mit funktionalem Ausgleich in Abhängigkeit der Höhen (Datengrundlage IBF+ und Waldbauexperimente Lauenburg und Reinhausen)

Warum nun die älteren und größeren Eschen häufiger infiziert sind, lässt sich aus der Untersuchung zum bisherigen Stand nur vermuten. Es könnten physiologische Unterschiede zwischen den Altersstufen sein, da junge Eschen beispielsweise das Wurzelwachstum höher priorisieren und daher einen stärkeren Immunschutz für die belaubten Pflanzenteile aufwenden, während ältere Eschen hauptsächlich um Licht konkurrieren und alle Ressourcen in ein möglichst effektives Höhenwachstum stecken. Denkbar ist außerdem eine statistische Häufung: ältere und größere Eschen haben eine größere Blattmasse und ergo eine höhere Wahrscheinlichkeit, dass Pilzsporen die Esche erreichen. Zur Klärung der Fragen besteht weiterer Forschungsbedarf, der vor allem eine längere Beobachtungszeit der Experimente einschließt.

Die statistische Häufung durch zunehmendes Alter ist vorhanden wurde aber für die Auswertung eliminiert. Denn es können auch ältere ETS Infektionen noch als solche erkannt werden und wurden entsprechend dokumentiert. Nun lässt sich argumentieren, dass eine einjährige Esche nur ein Jahr Zeit hatte sich zu infizieren, während sich bei älteren Eschen Infektionen akkumulieren können. Es konnte durch einen Vergleich der gefundenen neuen und älteren Infektionen festgestellt werden, dass ETS Infektionen etwa zwei Jahre lang als solche erkennbar sind, noch ältere finden sich nur noch in der Kategorie für sonstige Schäden. Daher wurden für die Auswertung alle einjährigen Eschen ausgeschlossen. Diese Häufung durch Akkumulation ist also zu finden, aber nicht mehr Teil der präsentierten Daten. Dass ältere Eschen auch dadurch einen höheren Infektionsanteil aufweisen, lässt sich daher vermuten, aber mit dieser Untersuchung leider noch nicht aufklären.

Große Eschen in der untersuchten Stichprobe haben also eine wesentlich höhere Wahrscheinlichkeit mit einer Infektion aufgefunden zu werden als kleinere Eschen. Mit Ausnahme von einigen wenigen stark verbissenen Exemplaren ist die Höhe der jungen Eschen gut als Annäherung für das Alter dieser zu verwenden, wie exemplarische zerstörende Altersbestimmungen einiger Jungeschen unterschiedlicher Höhen gezeigt haben

Die Bewertung der Auswirkungen dieses Ergebnisses ist nicht trivial. Intuitiv erscheint es günstig, dass nur wenige der jungen Eschen infiziert sind. Tatsächlich könnte es aber - je nach dem warum nur wenige infiziert sind - auch ein Nachteil sein. Ein sehr plausibles und einfaches Szenario für eine natürliche Anpassung der heimischen Eschen an das Eschentriebsterben wäre eine Selektion der jungen Eschen in der Naturverjüngung. Bei ständigem Infektionsdruck würden die anfälligen Eschen absterben und innerhalb weniger Jahre nur die vitalen Eschen verbleiben. Das setzt allerdings voraus, dass die physiologischen Mechanismen, die für eine geringere Anfälligkeit bei einigen Alteschen sorgen, ähnlich auch in der Naturverjüngung wirken, sodass im jungen Alter selektierte Eschen sich auch später noch eine höhere Toleranz gegenüber dem ETS erhalten. Zudem muss dafür die Dichte der Eschen sehr hoch sein, damit, auch wenn nur ein geringer Prozentsatz überlebt, noch genug Eschen verbleiben.

Vor diesem Hintergrund erscheint es sehr positiv, dass die anfänglich Dichte junger Eschen so hoch ist. Allerdings wäre es im Hinblick auf im Sinne einer raschen Anpassung wirksamen Selektion möglicherweise sogar günstiger, wenn die Infektionsrate bereits im sehr jungen Stadium hoch wäre, da zu jenem Zeitpunkt noch wesentlich mehr Individuen vorhanden sind und als Selektionsreserve dienen können.

Ein zusätzlicher statistisch signifikanter Befund und nicht ganz überraschender Befund ist, dass jährliche Höhenzuwächse infizierter Eschen in Abhängigkeit der Ausgangshöhe signifikant geringer ausfallen als die

gesunder Eschen (Abbildung 11). Ein Großteil der Eschen, insbesondere jener höherer Höhenklassen mit größeren relativen Anteilen infizierter Bäume, erleidet dadurch in Mischverjüngungen mit anderen Baumarten empfindliche Konkurrenz Nachteile, die schließlich jenseits natürlicher Selektions- und Anpassungsprozesse durch das Eschentriebsterben zu einem Überwachsen und Ausdunkeln der allermeisten Eschen führen, bevor sie überhaupt in fortgeschrittene Bestandesstadien einwachsen. Denn selbst für gegenüber dem ETS langfristig tolerantere Eschen kann eine zwischenzeitliche Infektion nicht ausgeschlossen werden.

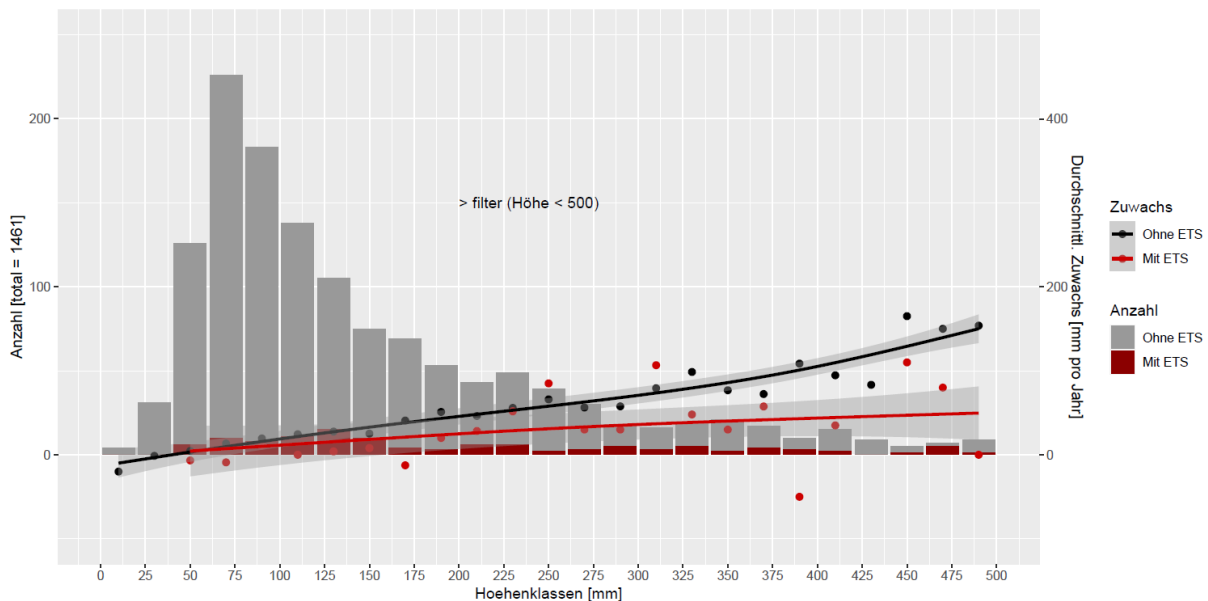


Abbildung 11: Markierte und wiederholt individuell aufgenommene Naturverjüngungs-Eschen nach Höhenklassen, unterschieden nach gesund und infiziert, sowie durchschnittliche jährliche Höhenzuwächse beider Teilkollektive in Abhängigkeit der Ausgangshöhe

Die waldbauliche Behandlung im Sinne einer Eschenerhaltung kann auf diesen Befund in Form einer aktiven Förderung von Partien dicht aufgelaufener Naturverjüngung mit dominierenden Eschenanteilen darauf reagieren. Durch entsprechende Lichtsteuerung in Form von Loch- oder Femelhieben über solchen Bereichen können Wachstum und Konkurrenzkraft der Eschennaturverjüngung hier gezielt gestärkt werden (Abbildung 12), bevor in größerem Umfang andere Baumarten in der Naturverjüngung nachlaufen. Bei einem Umfang von durchschnittlich einem Loch je ha, natürlich nur wenn die beschriebenen Voraussetzungen erfüllt sind, bleibt das betriebliche Risiko einer solchen Maßnahme überschaubar.



Abbildung 12: Altbestandsloch zu größeren Anteilen trotz gegebenen Infektionsdrucks und Vorhandensein infizierter Exemplare in Höhe und Anzahl dominierender Eschennaturverjüngung (Foto J. Osewold)

1.3 AP 3: Konsolidierung und Weiterentwicklung ETS-geschädigter Waldbestände

Vergleich verschiedener Möglichkeiten zur Konsolidierung und Weiterentwicklung durch das ETS schwer geschädigter Bestände unter Einbeziehung der betroffenen Restbestockung und natürlicher Anpassungsprozesse von Eschen-Populationen

Versuchsanlage

Ursprüngliches Ziel dieses Arbeitspakets war die Evaluation von Möglichkeiten zur Konsolidierung und Weiterentwicklung von stark geschädigten Eschenbeständen unter Einbeziehung von Pflanzungen alternativer Baumarten und natürlicher Anpassung der Bestände.

Wie bereits in den Zwischenberichten beschrieben, konnte aufgrund komplizierter Logistik, fehlender Vorlaufzeit und angesichts dessen im Verhältnis zum Aufwand unsicherer Ergebnisse angesichts der kurzen Projektlaufzeit die ursprüngliche Versuchsanordnung und das ursprüngliche Versuchsdesign nicht etabliert werden. Es wurde stattdessen ein verändertes Konzept mit modifizierter Zielstellung angesetzt. Das Hauptziel war es Wege aufzuzeigen, durch die stark geschädigte Eschenbestände möglichst rasch wieder Waldfunktionen gewährleisten könnten. Nachdem die anderen Arbeitspakete hauptsächlich die Zukunftsfähigkeit von Naturverjüngung und dabei insbesondere der Eschennaturverjüngung behandelten, wurden im Arbeitspaket 3 damit nunmehr die Umweltbedingungen auch für potenzielle Ersatzpflanzungen evaluiert. Statt die Pflanzungen direkt durchzuführen, wurde dafür nunmehr ein indirekter und auch auf eine Naturverjüngung übertragbarer Ansatz gewählt, der sich auf die Beschreibung der Umweltbedingungen für einen Baumnachwuchs in Abhängigkeit der waldbaulichen Ausgangssituation konzentriert.

Die meisten Altholzbestände mit Mischungsanteilen von Esche lichten sich im Zuge des ETS durch Absterbeprozesse und verringerte Belaubung mit dem Schadfortschritt kontinuierlich auf. Da der Eschenanteil der Ausgangsbestockung in der Regel weit von 100 % entfernt ist, etabliert sich im Zuge der sich vollziehenden Auflichtung in der Regel eine Naturverjüngung vorwiegend anderer Baumarten als der Esche.

Für den vorliegenden Versuch wurde allerdings ein Bestand mit einem erst 30-jährigen Eschenstangenholz und einem Mischungsanteil der Esche von über 90 % gewählt. Dieser Ausgangsbestand war von einem starken, rasch fortschreitenden Befall mit dem ETS gekennzeichnet (Abbildung 13).



Abbildung 13: Ausgangsbestockung der Versuchsanlage im hessischen Forstamt Schotten, Abt. 21 a mit einem stark ETS-geschädigten, 30-jährigen Eschenbestand (Foto R. Nagel)

Bei raschem Fortschritt der Schadenwicklung und zusätzlich hohem Verbissdruck deutet sich die Etablierung einer sehr konkurrenzstarken Vegetationsentwicklung, häufig aus Brombeere und anderen von raschen Nährstoffumsätzen profitierenden krautigen und holzigen Pflanzen an, die eine Naturverjüngung und auch die Pflanzung anderer Baumarten behindern und stark erschwert. Für Forstbetriebe entsteht dadurch, trotz des geringen Bestandesalters, mutmaßlich ein akuter Handlungsbedarf zur möglichst sicheren und kostengünstigen Etablierung einer Folgebestockung. Eine wichtige Frage, die mit dem angelegten Versuch aufgegriffen wird, ist der Umgang mit der stark geschädigten Restbestockung der Esche. In der Praxis existieren dafür unterschiedliche Vorgehensweisen. Diese reichen von einer vollständigen Räumung des Eschenbestandes und anschließender Pflanzung anderer Baumarten über Versuche zu „Sanierungshieben“ im Eschenbestand, insbesondere im Hinblick auf eine angestrebte, zumindest mittelfristige Stabilität der verbleibenden Bäume, was zu überhaltartigen, sehr lichten Schirmen führt, bis hin zur vollständigen Belassung des Eschenbestandes und der Pflanzung bzw. Naturverjüngung unter seinem Schirm. Der im hessischen Forstamt Schotten in der Försterei Eichelsachsen, Abt. 21 a, angelegte Versuchsanlage ohne aktive Verjüngungsmaßnahmen, verfolgt das Ziel, sich aus den beschriebenen unterschiedlichen

Überschirmungssituationen ergebende Umweltbedingungen, insbesondere kleinklimatische Bedingungen für eine potenzielle Verjüngung zu beschreiben.

Dazu wurde ein Versuch mit jeweils zweifacher Wiederholung der folgenden Überschirmungsvarianten entsprechend einem Überschirmungsgradienten etabliert (Abbildung 14):

- Freifläche: Räumung des Eschenbestandes
- Überhalt: Bereich mit wenigen belassenen Eschen
- Ausgangsbestockung: vollständige Belassung der ETS-geschädigten Ausgangsbestockung.



Abbildung 14: Versuchsvarianten und Lage der Plots in der Versuchsanlage im hessischen Forstamt Schotten, Abt. 21 a (Grundlage: Google Earth Pro, Image Airbus 2024)

Auf jedem der Plots wurden 3 Bodenfeuchtemessgeräte in 60 cm Tiefe und 3 Stück in 15 cm Tiefe verbaut. Zusätzlich wurde ein Luftfeuchtigkeits- und Lufttemperatursensor eingerichtet (Abbildung 15).



Abbildung 15: Bodenfeuchtelogger (links) und Logger zur Messung von Temperatur und Luftfeuchte in 1 m Höhe (Fotos: J. Osewold)

Ergebnisse

Die Untersuchung der Bodenfeuchtigkeit in Abhängigkeit von der verbliebenden Bestockung war leider nicht erfolgreich und lieferte keine belastbaren Ergebnisse. Die Messgeräte sind zwar durch regelmäßige Wartung größtenteils intakt geblieben und haben Messwerte geliefert. Diese Messwerte lagen jedoch weitgehend vollkommen außerhalb plausibler Bereiche. Es war zu schlussfolgern, dass sich die verwendeten Messgeräte, die in anderen Projekten, allerdings bei feinsandenreichen Bodenarten zuverlässig funktionierten (so im FNR-Projekt ABoNae, FKZ 22001817) in dem hier gegebenen skelettreichen Boden, durchsetzt mit viel

vulkanischem Basalt offenbar nicht geeignet sind, um Werte der Bodenfeuchtigkeit zu ermitteln. Auf homogenen Böden ist die Feuchtigkeit stark abhängig von der Bodentiefe, bei Regen dringt Feuchtigkeit zunächst in oberen Schichten, bei Sonneneinstrahlung trocknen diese zuerst aus. Zur Verifikation der Daten lassen sich diese Zusammenhänge sehr gut prüfen. Doch durch die stark heterogene Bodenstruktur war die gemessene Bodenfeuchtigkeit stärker von einzelnen Steinen, Spalten durch die Wasser eindringen konnte, und Wurzeln, die zwischen den Steinen konzentriert waren geprägt, als durch die Bodentiefe oder einen gegenüber diesen starken Störungen höchstwahrscheinlich schwächeren Einfluss der Überschirmung auf die Bodenfeuchte. Auch einzelne Starkregenereignisse sind normalerweise auf allen Messgeräten gut zu erkennen, da der gesamte Boden durchfeuchtet wird, doch die Feuchtigkeitsverläufe selbst solcher Ereignisse waren extrem variabel und innerhalb eines Plots auf der gleichen Tiefe so stark unterschiedlich, dass Vergleiche zwischen den Plots als nicht verwendbar gewertet werden mussten.

Aussagekräftig waren hingegen die Messungen der Lufttemperatur (Abbildung 16) und der Luftfeuchtigkeit (Abbildung 17). Die Flächen mit der vollständigen Ausgangsbestockung und demzufolge dichter Überschirmung zeigten zwar im Hochsommer in den Mittagsstunden nur geringe Luftfeuchteunterschiede zur Freifläche und dem lichten Überhalt. Allerdings waren die Verhältnisse der in ihrer Ausgangssituation belassenen Flächen in den Nachtstunden tiefere Temperaturen und eine signifikant höhere Luftfeuchte gekennzeichnet als die Flächen mit dem lichten Überhalt und die Freiflächen. Wahrscheinlich sorgt die verbliebene Belaubung für ein höheres potenzielles Verdunstungspotenzial. Dieses kann aufgrund akuten Wassermangels in den Mittagsstunden allerdings nicht realisiert werden. Allerdings sorgt die höhere Verdunstung in den Abend- und Nachtstunden bis deutlich in den Vormittag hinein für niedrigere Temperaturen und eine höhere Luftfeuchtigkeit. Über einen gesamten Hochsommertag mit hoher Strahlung betrachtet resultiert dies in deutlich günstigeren Bedingungen für zu etablierenden Nachwuchs unter der belassenen Ausgangsbestockung. In der ungünstigeren Ausprägung des Kleinklimas im Hochsommer nur geringe Unterschiede zeigen die Freifläche und die aufgelichtete Restbestockung. In letzterer geht demzufolge von den wenigen verblieben Bäumen keine messbare positive Milderung strahlungs- und hitzebedingter Witterungsextreme mehr aus.

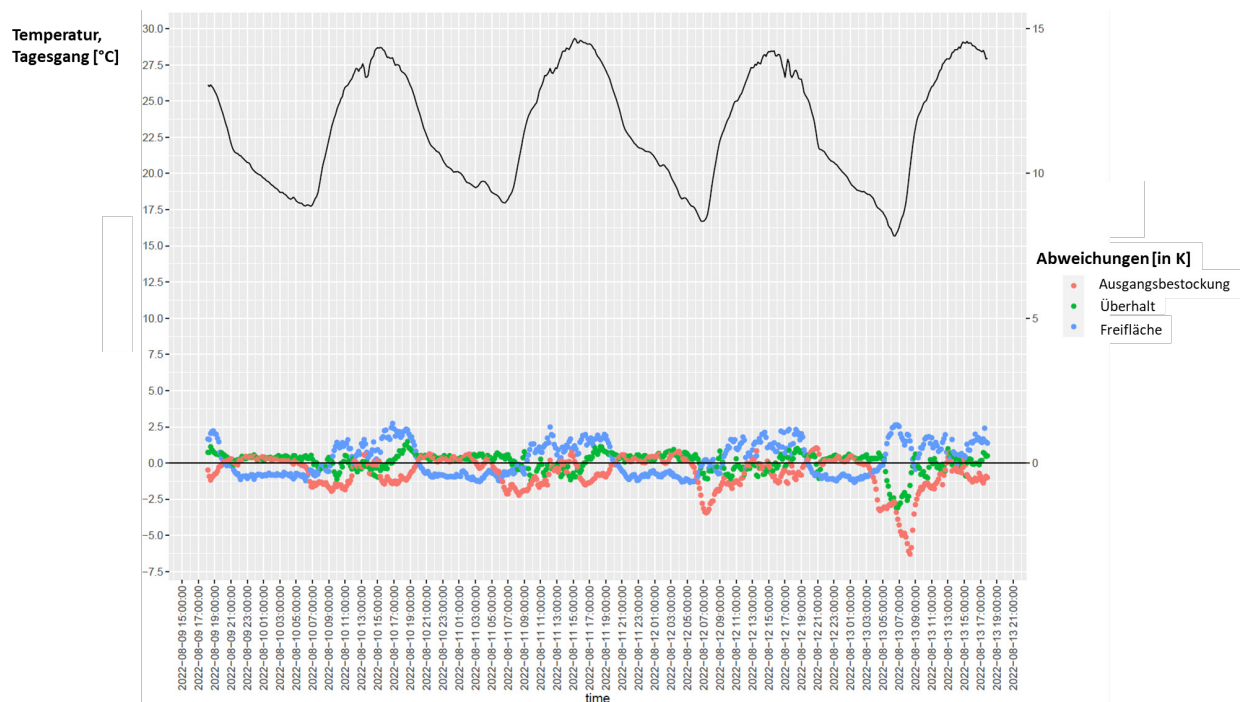


Abbildung 16: Beispielhafte viertägige Darstellung des hochsommerlichen Temperaturverlaufes auf der Versuchsfläche Schotten und Abweichungen der Temperaturverläufe in den drei Überschirmungsvarianten (Wdh. 1)

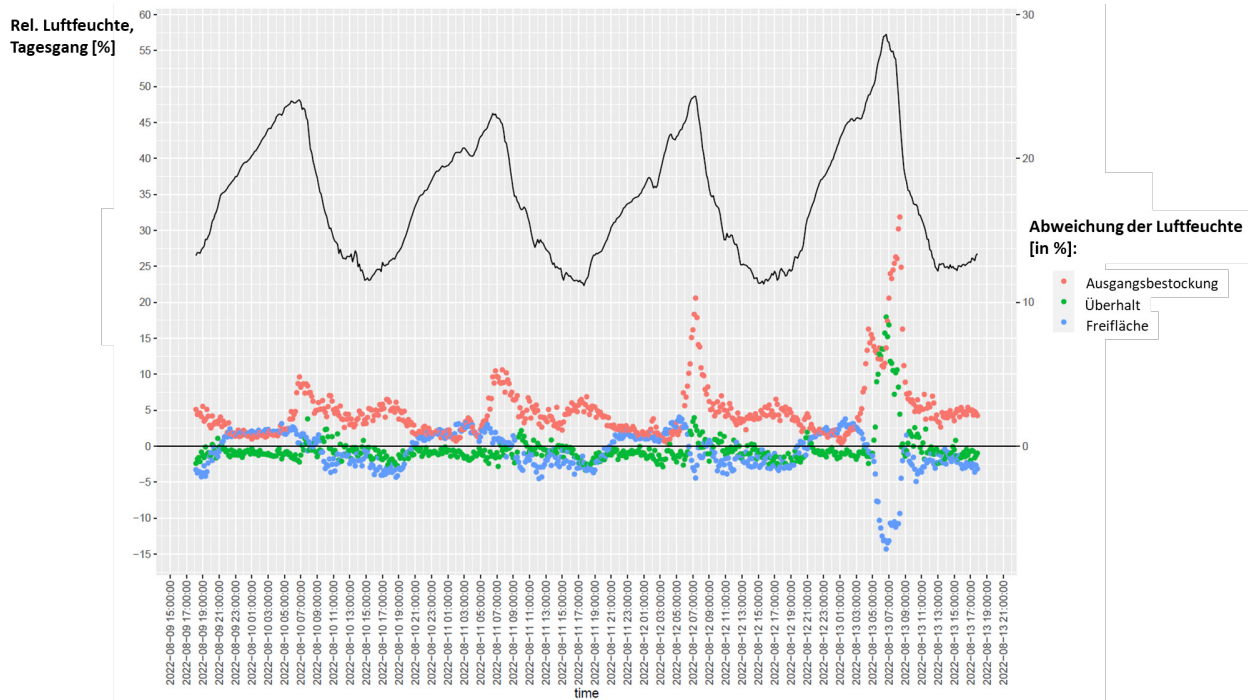


Abbildung 17: Beispielhafte viertägige Darstellung des hochsommerlichen Verlaufes der relativen Luftfeuchte auf der Versuchsfläche Schotten und Vergleich der Abweichungen davon in den drei Überschirmungsvarianten (Wdh. 1)

Es bleibt zu folgern, dass die möglichst weitgehende Belassung der Ausgangsbestockung ETS-geschädigter Eschenbestände sich auf die Etablierungsbedingungen eines Folgebestandes sowohl aus Naturverjüngung als auch aus Pflanzung positiv auswirkt. Freiflächen schaffen von den Umweltbedingungen her schwierigere Ausgangsbedingungen für die Etablierung des Folgebestandes. Die Belassung eines geringen Restschirms hat im hier durchgeführten Versuch in der Temperatur auch noch eine jedoch schwächer ausgeprägte mildernde Wirkung, bei der Luftfeuchte jedoch eher die Verhältnisse der Freifläche, sodass ein geringer Überhalt hinsichtlich der Wirkung auf klimatische Kennwerte nur schwach die Bedingungen einer Kahlfäche zu modifizieren vermag. Im Hinblick auf die Etablierung einer Folgebestockung unter schwer geschädigten, fast reinen Eschenbeständen ist also die Belassung eines möglichst hohen Überschirmungsanteils empfehlenswert, soweit nicht Arbeitssicherheitsprobleme dem entgegenstehen. Im vorliegenden Fall eines noch sehr jungen Eschenbestandes im Stangenholzstadium sind, einen aufgrund der Überschirmung möglichen Verzicht auf intensive Kulturpflege vorausgesetzt, solche Probleme ebenso wie große Schäden an der Kultur durch zusammenbrechende Eschen kaum zu befürchten. Später, nach erfolgreich überstandenen Jugendgefahren der Kultur könnte der Restschirm dann entnommen werden, wenn er bis dahin nicht ohnehin zusammengebrochen ist.



Abbildung 18: Beispiele der günstigen Wirkung bei Belassung des Schirms eines ETS-geschädigten Eschenbestandes auf die Etablierung von Naturverjüngung (links) und (Mitte) sowie eine Pflanzung von Stieleiche (rechts) durch eine Milderung klimatischer Extreme und verringerte Entwicklung von Konkurrenzvegetation (Fotos: R. Nagel)

1.4 AP 4: Deskriptive Epidemiologie / Einzelbaumeffekte

Material und Methoden

Für dieses Arbeitspaket sind in Zusammenarbeit mit dem Projektpartnern an der NW-FVA Feldaufnahmen auf neun der zehn IB+-Flächen durchgeführt worden, die ein möglichst klares Bild des Musters des Eschentriebsterbens in der Verjüngung aufzeigen sollten. Dazu sind im zuvor beschriebenen Muster sämtliche Verjüngungspflanzen unterhalb der Derbholzgrenze aufgenommen worden (Abbildung 18). Bei der Einrichtung der IBF+ war Verjüngung unterhalb der Derbholzgrenze von 7 cm mit Rinde nicht erfasst worden. Die vorliegende aktuelle Forschungslage deutete auch hier auf eine positive Korrelation von Eschentriebsterben mit steigendem Anteil an Eschen im Bestand (Schumacher 2011, p. 8, Bakys et al. 2013, p. 122, Meshkova & Borysova 2020, p. 160, Grosdidier et al. 2020, p. 1796, Cracknell et al. 2023, p. 2129). Anknüpfend an eine dem entsprechende Hypothese sind Punkte sind Bereiche, in denen Eschen im Oberstand in Clustern auftreten und für die demzufolge mit erhöhten Risiko für eine Infektion der Verjüngung auszugehen ist, berechnet worden (Baddeley et al. 2016).



Abbildung 18: [links] Sehr junge Esche, die bereits ETS-Symptome zeigt; [Mitte, oben] Aufnahme eines Subplots mit Hilfsmitteln, [Mitte, unten] Aufnahmeimpressionen, [rechts] Esche zeigt typische Anzeichen regelmäßiger Infektionen, gefolgt von Triebverlust und Neuaustrieb.

Als Basis der Analyse ist ein Monte-Carlo-Test durchgeführt worden (siehe Baddeley et al. 2016, p. 384). Dieser Test simuliert 99 Punktmuster mit gleicher Intensität » unter der Annahme einer vollkommen zufälligen räumlichen Verteilung („Complete Spatial Randomness“, CSR), und vergleicht, ob sich real aufgenommenen Daten der Stammfußkoordinaten der Alteschen und simulierte Daten unterscheiden. Sprich, dieselbe Anzahl an Punkten wird zufällig auf der im Programm abgebildeten IB+-Fläche verteilt und die Muster verglichen. Der im Anschluss vollzogene Scan-Ttest (Baddeley et al. 2016, p. 190) prüft an jedem Pixel, ob im Umkreis r die Intensität ($\gg$) größer ist als außerhalb unter CSR anzunehmen wäre. Das Ergebnis ist eine Karte, in der Farben die Wahrscheinlichkeit angeben, dass im Umfeld eines Pixels eine Klumpung vorliegt (Abbildung 19).

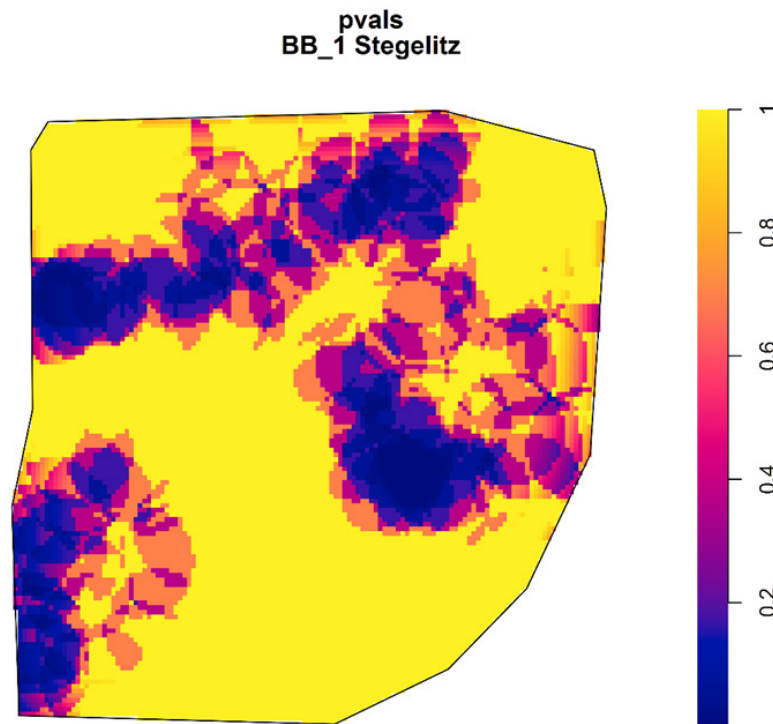


Abbildung 19: Ergebnis des Scan-Tests. Dunklere Zahlen deuten auf eine größere Häufung an Alteschen an, als es unter CSR anzunehmen wäre.

Um daraus für die weitere Auswertung Cluster zu detektieren, ist ein Grenzwert festgelegt worden: Eine binäre Abfrage übernimmt nur solche Pixel, in deren Umfeld die Intensität » mit einem p-Wert von 0,1 höher ist als unter CSR anzunehmen wäre. Im so generierten binären Bild (siehe Abbildung 20) enthalten die Pixel keine weiteren Informationen.

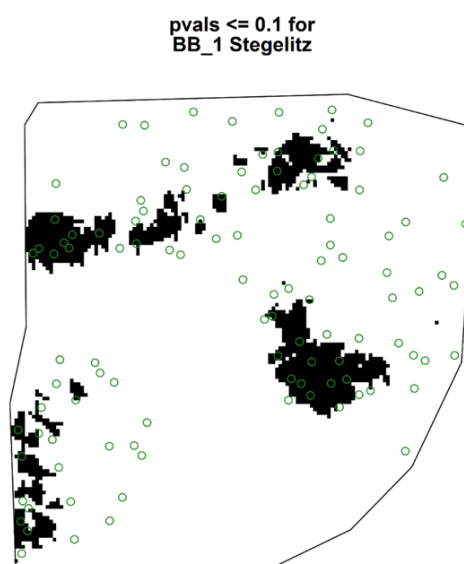


Abbildung 20: Reduzierung auf Pixel, die mit einem p-Wert von $\leq 0,1$ eine stärkere Häufung an Alteschen im Umfeld aufweisen, als es unter CSR anzunehmen wäre, sind als Cluster definiert worden. Die Stammfußkoordinaten der Alteschen sind durch grüne Kreise dargestellt

Anschließend bestand mit dem Ziel einer weiteren Klassifizierung der Cluster über die Funktionen `connected()` und `tess()` des R-Paketes `spatstat` die Möglichkeit, zusammenhängende Cluster zu separieren und ihre Größe zu berechnen (Baddeley et al. 2016, pp. 44, 524) (siehe Abbildung 21).

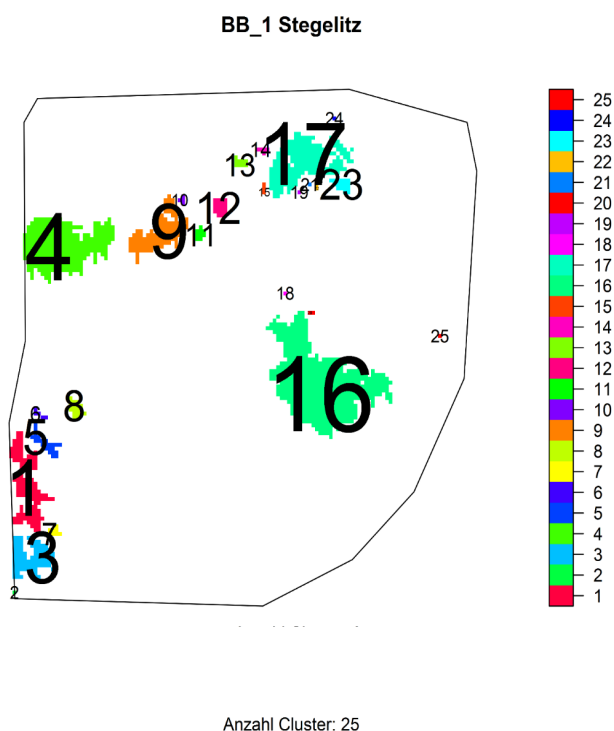


Abbildung 21: Unterteilung der Cluster. Größere Zahlen deuten auf eine größere Fläche hin.

Im folgenden Schritt sind die Subplots zusammen mit den Clustern dargestellt worden (siehe Abbildung 22). Die Kreise stellen die Subplots dar, und deren Größe den Anteil infizierter Eschen auf jeweils an einem Subplot aufgenommener Eschen mit einer Infektion. Es wird erkennbar, dass die Subplots mit den höchsten Anzahlen infizierter Eschen sich nicht innerhalb der Cluster befinden, sondern viel mehr dazwischen.

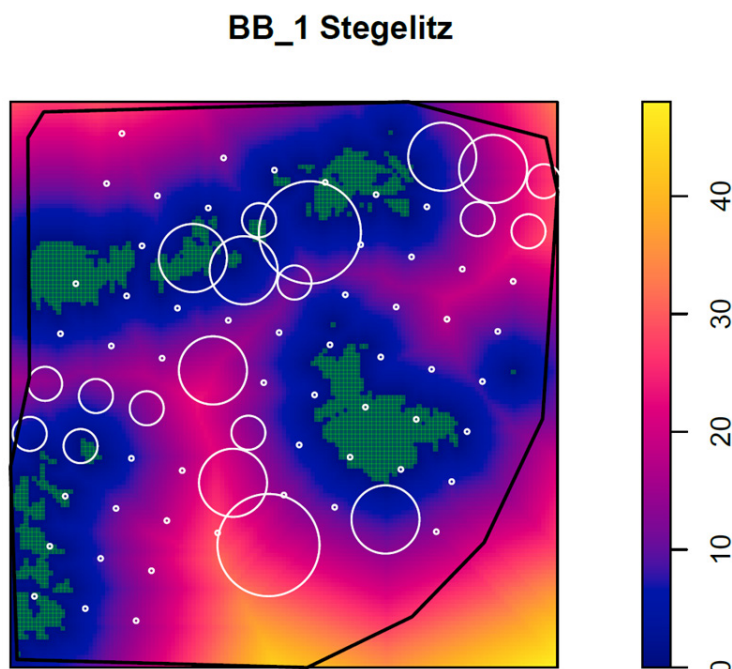


Abbildung 22: Darstellung der Cluster und Subplots. Die Größe der weißen Kreise stellen dar, wie viel Prozent der auf ihnen befindlichen Eschen an ETS erkrankt sind. Die Abstufungen der Farbskala beschreiben die Distanz zum Zentrum des nächstgelegenen Clusters von Alteschen

Diese Beobachtung führte in Abweichung von der ursprünglich verfolgten Hypothese zu der Entscheidung bei der Auswertung der Daten auf das Werkzeug der inversen Modellierung zurückzugreifen.

Der theoretische Hintergrund der inversen Modellierung basiert auf der Erkenntnis, dass die Variation von Blattmassen, Samendichten, Niederschlagsmenge oder Erkrankungsgrad an Messpunkten am Waldboden

das Ergebnis einer Kombination von abiotischen Umwelteinflüssen wie Wind oder Regen sowie den Einflüssen der um die Messpunkte stehenden Bäume sind. Diese Variation stellt sich folglich als räumliches Muster dar. Das Ziel der inversen Modellierung besteht darin, diese Eigenschaften oder Wirkungen („traits“) einzelner Verursacher (Bäume oder in diesem Fall Cluster) zu identifizieren, die die oben beschriebenen räumlichen Muster am Waldboden erklären.

Dies bedarf punktueller Messungen, auf der Grundlage der Theorie der ökologischen Felder nach Wu et al. (1985), die für die anschließende Modellparametrisierung verwendet werden. Die inverse Modellierung bildet diesen Datensatz im Verhältnis der Distanz von Messpunkt zu Einflussbaum ab (siehe Abbildung 20). Trends in der entfernungsabhängigen Veränderung im Datensatz werden mittels Regressionsanalyse überprüft, verallgemeinert und schließlich für alle Bestandesmitglieder angenommen, sodass ausgehend von den Punktdaten möglichst genaue Aussagen auf Flächenebene getroffen werden können (Frischbier & Zeibig 2007, p. 14).

Eine Herausforderung bei diesem Ansatz der kausalen Zuordnung von räumlichen Mustern zu einzelnen Bäumen im Wald besteht darin, dass in der Regel viele in Frage kommende Quellen (Bäume derselben Art oder Cluster) nahe beieinanderstehen.

Dabei werden mehrere Grundannahmen vorausgesetzt. Es muss ein funktionaler Zusammenhang zwischen der Distanz zur Quelle und der Intensität des untersuchten Effekts bestehen (siehe Abbildung 23). Ebenso hängt die Effektintensität von der Ausprägung der Quelle ab. Als Beispiel kann hier die Feinwurzeldichte im Boden herangezogen werden. So sollte unter Beibehaltung der Distanz diese bei einem Baum mit stärkeren BHD auch größer sein als die eines schwächeren Artgenossen. Umwelteinflüsse können auf der Ebene eines einzelnen untersuchten Bestandes als einheitlich angenommen werden. Dies bedeutet, die gesamte Fläche wäre vergleichbaren Niederschlags- und Sonneneinstrahlungsbedingungen sowie Windgeschwindigkeiten und -richtungen ausgesetzt. Für die Kombination mehrerer Quellen zu einer Wirkungsintensität steht ein Algorithmus zur Verfügung, der ökologisch plausibel ist und parametrisiert werden kann, siehe hierzu Arbeiten von Nielsen & Mackenthun (1991), Näther & Wälder (2003) sowie Ammer & Wagner (2005).

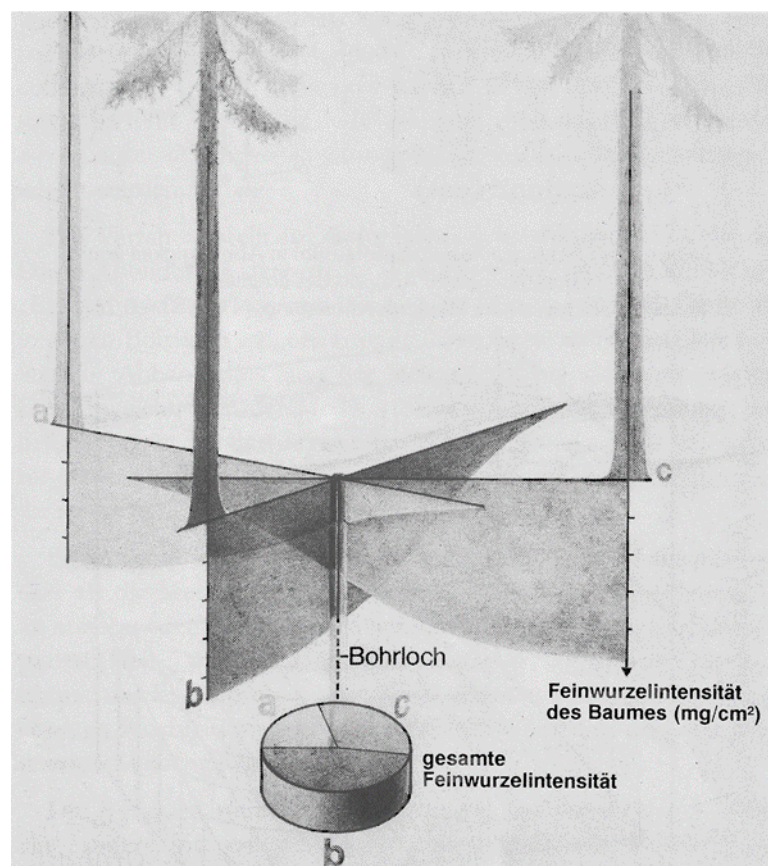


Abbildung 23: Beispielhafte Darstellung zur Kombination des Wirkungseinflusses mehrerer Quellen im Rahmen einer inversen Modellierung, in diesem Falle des Beitrags dreier Bäume zum Feinwurzeldichte eines Bohrlochs (aus Nielsen & Mackenthun 1991)

Die vier aufgeführten Grundannahmen sind durch Arbeiten vorheriger Wissenschaftler als erfüllt anzusehen. So konnten Steinböck (2014, p. 51) und Grosdidier et al. (2018, p. 5) aufzeigen, dass in der Tat mit dem Abstand zur Quelle die Sporendichte drastisch abnimmt. Im Falle von Grosdidier et al. geschah dies auf den ersten 50 Metern, auch wenn die Sporen in Fallen 500 Metern entfernt noch Sporen von *H. fraxineus* detektiert werden konnten. Bestände mit einem größeren Anteil an Eschen zeigen eine stärkere Schädigung als solche mit geringerer Stammzahl oder höherem Anteil an Mischbaumarten (Landolt et al. 2016, p. 1061, Grosdidier

et al. 2020, p. 1796, TurczaDski 2020, p. 68). Somit ist die Effektintensität von der Ausprägung der Bestände abhängig. Auf den IB+-Flächen nehmen wir die Umwelt als einheitlich an. Zuletzt ist ein Algorithmus bekannt, der im Folgenden beschrieben wird.

Ein Problem dieser Methodik war die Reduktion der Vitalität auf Subplot-Ebene. Die weißen Kreise stellen die Subplots dar und ihr Durchmesser korrespondiert mit dem Anteil an Eschen, der eine ETS-Infektion aufgewiesen hat (vergleiche Abbildung 24). Dadurch werden infizierte, verjüngungsarme Subplots verzerrt dargestellt. Sollte nur eine Esche vorhanden sein, die dann auch noch infiziert ist, betrüge der Anteil 100 % und der Kreis würde mit maximalem Durchmesser eingezeichnet werden. Die Inverse Modellierung profitiert von einem großen Quellen-zu-Empfänger-Verhältnis, da dies die Statistik stärkt. Weil der Algorithmus nicht mit mehreren Punkten mit gleicher Koordinate arbeiten kann ist den Eschen auf den Subplots eine zufällige Koordinate innerhalb eines Kreises von 0,5 Metern Radius um der des Subplots gegeben worden, sodass die Eschen sich immer noch auf derselben Fläche verteilen, auf der sie aufgenommen worden sind (Abbildung 21). Gleichzeitig ist die Variable des Gesundheitszustands verfeinert worden: Anstelle der vorherigen binären Abfrage ob krank oder gesund, ist nun für jede Esche deren Anteil Triebe mit Infektion an der Gesamtanzahl Triebe ermittelt worden. Dieser Wert liegt zwischen 0 und 1.

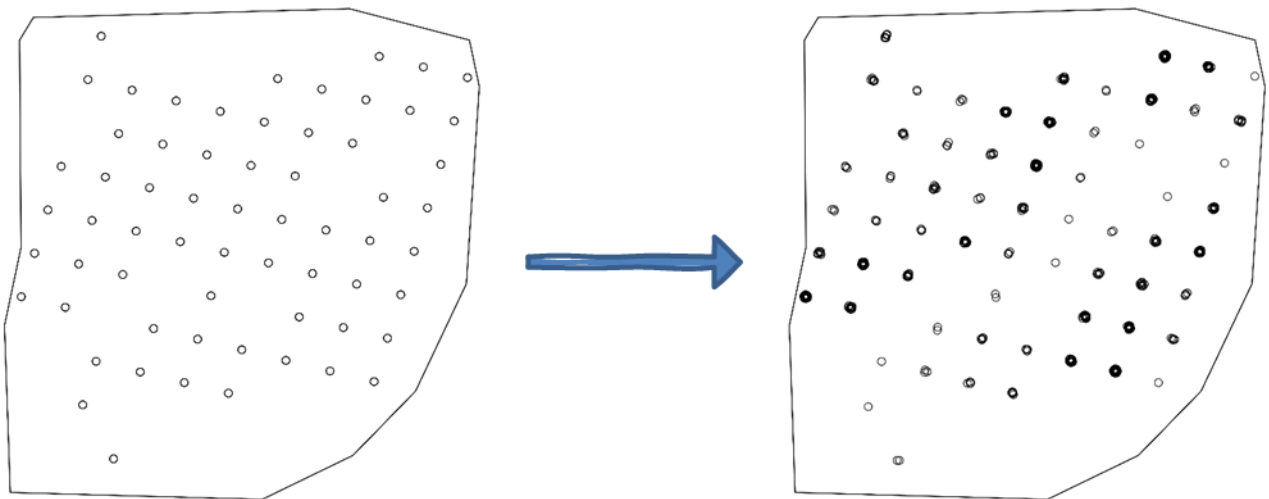


Abbildung 24: Wechsel von Daten für Subplots zu einzelnen Eschenindividuen

Die Inverse Modellierung bedient sich zweier geometrischer Verteilungen:

Die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion $d(r)$ (Formel 1) beschreibt die Datenverteilung, also die der Punkte m im Raum um das Zentrum der Cluster. Angewendet auf diese Untersuchung wird der zufällige Abstand einer einzelnen infizierten Esche vom Clusterzentrum aus dargestellt. Hierbei zeigte sich, dass die negative Binomialverteilung am geeignetsten ist, um das vorgefundene Muster abzubilden, da sie sehr flexibel ist. Der Parameter κ (sprich: Kappa) weist dabei auf die Verteilung der Daten hin: Ein kleineres κ deutet auf eine Klumpung hin. Höhere Werte von κ deuten darauf hin, dass die Daten in Richtung Normalverteilung gehen (Van Putten et al. 2012, p. 7).

$$P(X = k) = \binom{k + r - 1}{k} \cdot p^r \cdot (1 - p)^k \quad (1)$$

Die negative Binomialverteilung ist besonders für Zähldaten geeignet, da in diesen gehäuft niedrige Werte auftreten. Eine Überdispersion von Nullen, wie sie auf der IB+-Fläche in Stegelitz vorgefunden wurde (Abbildung 25), kann darauf zurückzuführen sein, dass die Pflanze gegenüber dem ETS resistent ist und deshalb keine Infektionen aufweist (structural zero), oder dass keine Spore auf ihr gelandet ist (sampling zero) (Ridout et al. 1998, p. 1).

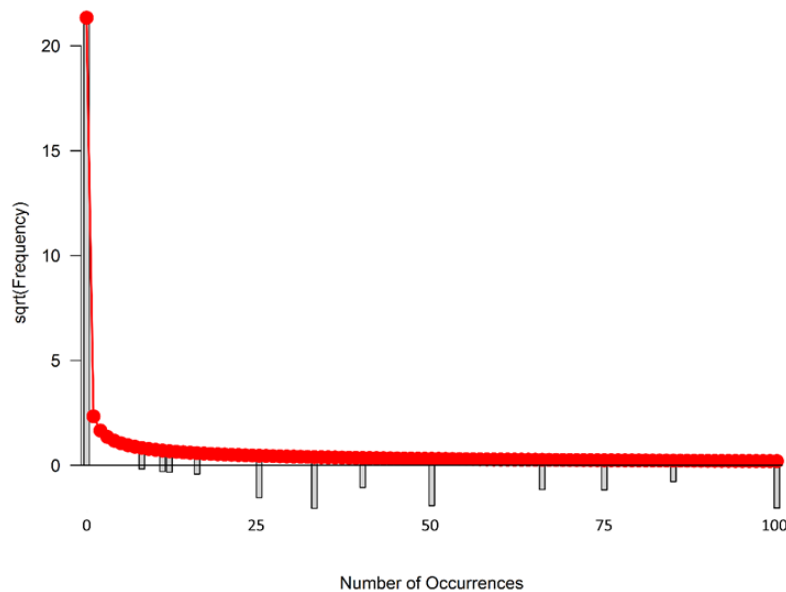
BB_1 Stegelitz $\kappa = 83.27$ 

Abbildung 25: Gegenüberstellung von Messdaten (graue Balken) und negativer Binomialverteilung (rot). Je weiter die Balken in den positiven Bereich hineinragen, desto besser werden sie von der Verteilungsfunktion getroffen

Die zweite angewendete Verteilung ist die Log-Normalverteilung, welche die beiden Parameter μ und σ besitzt. Sie dient als Ausbreitungsfunktion und stellt die Sporenausbreitung im Feld dar. Der Vorteil dieser Funktion ist, dass sie in der Lage ist mit Werten nahe Null unmittelbar am Zentralort zu starten, mit zunehmender Entfernung rasch anzusteigen, um nach Erreichen maximaler Dichtewerte monoton abzufallen.

$$d(r) = \frac{1}{(\sqrt{2\pi}\sigma r)} \exp\left(-\frac{(\ln r - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2)$$

Auf der Beobachtung fußend, dass zwischen größeren Clustern verstärkt Bäume mit Infektionen aufzutreten scheinen, ist die Funktion erweitert worden:

In erweiterter Form wird der Einfluss eines Clusters zusätzlich in Abhängigkeit von dessen Größe determiniert (Ribbens et al. 1994, p. 1796). Dies ist erforderlich, da die detektierten Cluster Größen zwischen 0,64 und 335 m² aufweisen. Die Komponente m ist hierbei das Potential eines jeweiligen Clusters gemäß seiner Größe Infektionen im Umfeld zu verursachen. m_{Ref} ist das Potential eines Clusters von durchschnittlicher Größe. In der Klammer wird das Verhältnis der aktuellen Fläche A zur Referenzfläche A_{Ref} berechnet und dann mit β potenziert. Der Parameter β ist eine Modulation des Verhältnisses der Clusterflächen zueinander.

$$m = m_{Ref} * \left(\frac{A}{A_{Ref}}\right)^\beta \quad (3)$$

Insgesamt führt ein Anstieg von β dazu, dass die Beziehung zwischen m und A in der Formel stärker wird, und kleine Änderungen in A führen zu größeren Änderungen in m . Je größer β ist, desto stärker wirken sich Unterschiede zwischen betrachteter und durchschnittlicher Referenzfläche also aus, und desto größer wird m bei großen Flächen.

Ein von KaiYu entwickelter Algorithmus ermittelte die passenden Startparameter für das Modell. Daraufhin wurden über einen Zeitraum von mehreren Wochen induktiv vorgehend für jeder der neun IB+-Flächen Werte für β zwischen 0 und 10 in 0,0001er Schritten ausprobiert. Als Maximale Distanz wurden 150 Meter gewählt, was in etwa dem geringsten maximalen Durchmesser der IB+-Flächen darstellt.

Die Datenlage führt nicht für alle Flächen zu plausiblen Ergebnissen. Zum Teil ergeben sich Bestimmtheitsmaße über 1. Zu den plausiblen Resultaten lässt sich feststellen, dass β stark ansteigen muss, um ein zufriedenstellendes Bestimmtheitsmaß zu erhalten. Dies deutet darauf hin, dass Areale mit vielen Eschen überproportional stark zum Infektionsgeschehen beitragen und beantwortet die Frage, ob von einer

Gruppierung mehrerer Altbäume ein additiver Einfluss auf das Infektionsgeschehen ausgeht. Ein insgesamt geringes Bestimmtheitsmaß deutet grundsätzlich darauf hin, dass die verwendeten IB+-Flächen in ihren Abmessungen für diese Untersuchungen zu klein sind. Außerdem wird durch Abbildung 26 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** verdeutlicht, dass die Verbreitung von *H. fraxineus* mittlerweile mit Ausnahme von Bereichen in Mittelitalien, dem Balkan und der Türkei den gesamten Vorkommensbereich von *F. excelsior* erreicht hat (Marçais et al. 2022, p. 216). Das bedeutet, dass der Erreger mittlerweile omnipräsent ist (Steinhart et al. 2024), sodass nicht mehr wie bei früheren Studien (siehe z. B. Chandelier et al. 2014, Grosdidier et al. 2018) die Ausbreitung entlang einer „Front“ gemessen werden kann.

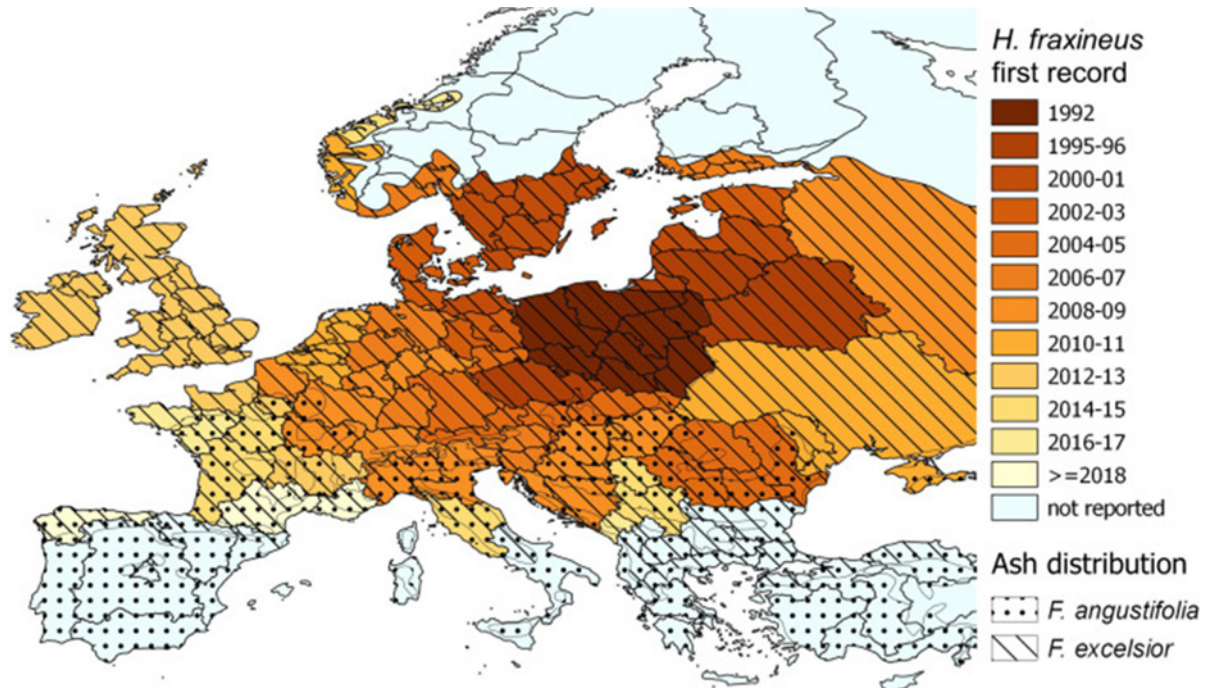


Abbildung 26: Vorkommen von *Fraxinus excelsior* und *F. angustifolia*, den potentiellen Wirten von *H. fraxineus*, sowie die sukzessive Voranschreiten und aktuelle erreichte Verbreitung des ETS-Erregers (Status: Januar 2022). (aus Marçais et al. 2022, p. 216)

Ergebnisse

Unsere Ergebnisse deuten auf ein rechtsschiefes, isotropes Muster der Vitalität hin, mit Zunahme der infizierten Individuen auf den ersten 59,1 bis 86,1 Metern und dann ein monotonen abfallen (Abbildung 27). Dieses Ergebnis mag darin begründet sein, dass in der vorliegenden Untersuchung der Infektionsdruck auf die Naturverjüngung anhand der Vitalität der Naturverjüngung abgebildet worden ist. Ein Muster der Dichte an *H. fraxineus*-Sporen ergäbe wahrscheinlich ein anderes Bild. Dies zu ermitteln ist aber schwieriger.

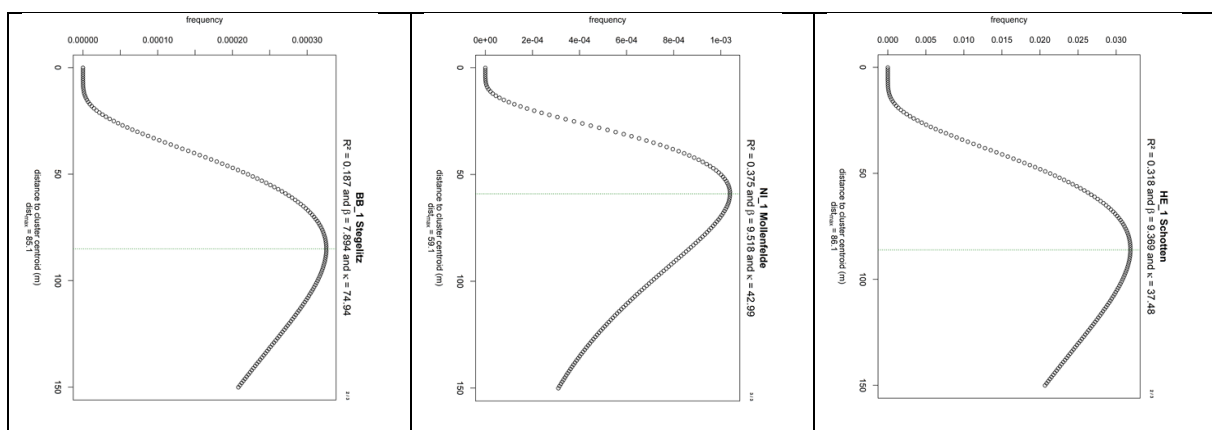


Abbildung 27: Die Ergebnisse der inversen Modellierung zeigen bei den drei IB+ Flächen mit den höchsten Bestimmtheitsmaßen ein Maximum der Wahrscheinlichkeit für eine Infektion zwischen 59 und 86 Metern

Ein zweiter Ansatz zur Klärung dieser Frage sah vor, um eine infizierte Alt-Esche die Vitalität der Verjüngung aufzunehmen. Gleichzeitig, um Interferenzen durch andere Bäume auszuschließen, sollte ein solcher Mutterbaum auch möglichst im Umkreis von 100 Metern nicht von Artgenossen umgeben sein.

Da ein solches Szenario in situ nicht aufzufinden war, wurde es als Experiment durch Pflanzung künstlich angelegt. Wie in Abbildung 28 dargestellt, wurde ein infizierter „Mutterbaum“ simuliert, indem im Umkreis von 15 Metern, also ungefähr der Ausdehnung der Kronenbreite einer starken Alt-Esche entsprechend, infiziertes

Laub verteilt wurde. Von dessen Zentrum sternförmig in die acht Haupt- und Nebenhimmelsrichtung abgehend sind Eschen gepflanzt worden. Auf den ersten 50 Metern wurde jeden Meter eine Esche gepflanzt, was auf die Beobachtung von Grosdidier et al. (2018, p. 5) zurückgeht, dass binnen der ersten 50 Meter von einer Sporenquelle ausgehend die Sporendichte zunächst rapide abnimmt. Auf den folgenden 50 Metern ist alle 2,5 Meter eine Esche gepflanzt worden, sodass insgesamt 560 Pflanzen die sternförmige Anordnung bildeten. Bei den gepflanzten Eschen handelt es sich um 1/1er der Herkunft 811-05 Oberrheingraben. Geplant war, den Versuch drei Mal anzulegen, einmal jeweils im Tharandter Wald, in Moritzburg und in der Neuen Huth bei Leipzig.

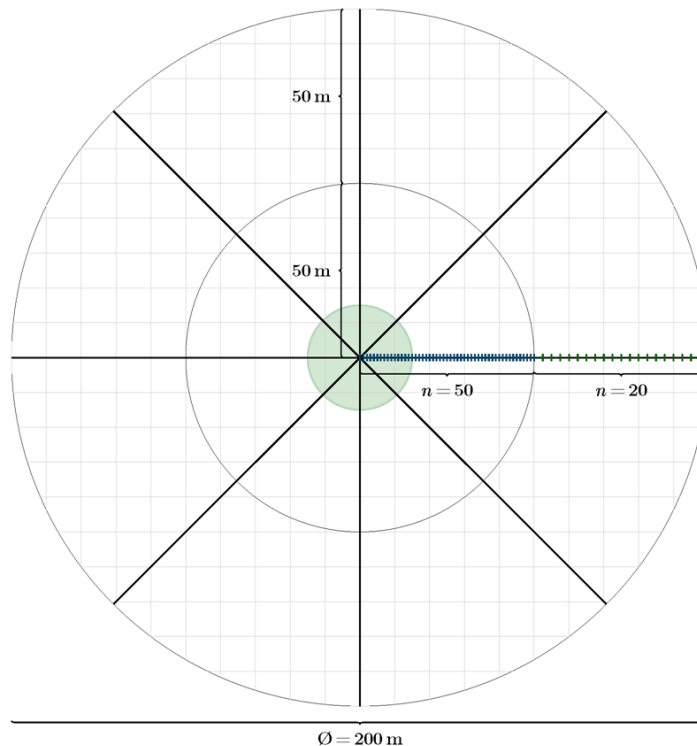


Abbildung 28: Darstellung des Pflanzschemas: Im Zentrum wurde durch Ausbringung infizierten Laubes ein infizierter Mutterbaum simuliert. Auf den inneren 50 Metern sind pro Radius 50, auf den äußeren 20 Eschen gepflanzt worden.

Da es, trotz großer Bemühung, nicht möglich war, ausreichend Pflanzenmaterial für alle drei Versuchsanlagen zu beschaffen, für das mit absoluter Sicherheit eine vorab erfolgte Infizierung mit dem Eschentriebsterben auszuschließen war, musste die Anlage in Leipzig aufgegeben werden.

Das Jahr 2022 war in Sachsen mit einer Temperaturabweichung von +2,1 Kelvin gegenüber der Klimareferenzperiode 1961-1990 das viertwärmste Jahr seit 1881, was sich in der Einstufung des Jahres als "extrem zu warm" widerspiegelt. Zudem war der Jahresniederschlag 2022 mit einem Defizit von -19 % sehr gering, was vor allem auf Defizite von bis zu -63 % in den Monaten März bis August zurückzuführen war (Franke et al. 2023, p. 9). Dies hatte zur Folge, dass auf der Fläche im Tharandter Wald das infektiöse Laub in manchen Zeiträumen täglich künstlich bewässert werden musste.

Zwischen dem 06. und 12. April 2022 sind die Sterne gepflanzt worden. Ihre Inventur erfolgte zwischen dem 12. und 22.09.2022. Dabei zeigte sich, dass es bei den Eschen, wenngleich zum Teil stark verbissen, kaum Ausfälle gab. Die Trockenheit hatte aber stark negative Auswirkungen auf *H. fraxineus*, was durch die sehr geringe Anzahl an Fruchtkörpern im Laub des Sternes im Tharandter Wald erkennbar war. Auf der Moritzburger Fläche sind während der Inventur überhaupt keine Fruchtkörper feststellbar gewesen. Anfänglich als Stammnekrosen gedeutete Symptome konnten nicht sicher auf das Eschentriebsterben zurückgeführt werden, da Zikaden ähnlich aussehende Gelege unter der Rinde anlegen können (Strümpel 2010, p. 150 ff.) (siehe Abbildung 29). Für Zikaden als Verursacher spricht, dass diese Nekrosen ohne räumlichen Bezug zum Sternzentrum auf der Fläche auftraten.

Aus diesen Gründen muss dieser experimentelle Ansatz zur Beantwortung des Arbeitspakets als fehlgeschlagen bewertet werden.



Abbildung 29: Nekrose am Spross einer Eschenpflanze des Infektionsexperimentes, die nicht eindeutig auf eine Infektion mit *H. fraxineus* zurückgeführt werden konnte.

1.5 AP 5: Analytische Epidemiologie in situ

Einfluss des Mischungsanteils von Alteschen im Oberstand auf den Infektionsanteil der Naturverjüngung

Hypothese

Die Infektionsgefahr für die Naturverjüngung steigt mit dem relativen und dem absoluten Anteil an Eschen im Altbestand.

Ergebnisse

Die Untersuchungsflächen, dargestellt in Tabelle 8, die den größten Anteil infizierter Eschen in der Verjüngung aufwiesen, waren die Flächen SN_1 Leutzsch und BW_1 Plattenwald. Während SN_1 Leutzsch mit 228 Stämmen, nur einen mehr als MV_1, die Fläche mit der zweit niedrigsten Stammzahl ist, setzt sich hier zu 17,11 % des Altbestands bloß aus Esche zusammen. Der hohe Anteil infizierter Individuen mag darauf zurückzuführen sein, dass auf dieser Fläche die mit Abstand größten Eschen in der Verjüngung vorzufinden waren, und somit auch die ältesten, was der Krankheit die längste Zeit zum infizieren gegeben hat. Viele der größeren Eschenverjüngung wies viele abgestorbene und Ersatztriebe auf, die von einem periodischen Krankheitsverlauf zeugten.

Bei BW_1 Plattenwald handelt es sich hingegen um die Fläche mit dem zweithöchsten Anteil an Eschen im Altbestand, die 49,4 % der Bestandesgrundfläche ausmachen. Die Fläche mit dem höchsten Mischungsanteil von Eschen im Altbestand ist MV_1 Karlsburg (50,7 %). Hinsichtlich des Anteils an der Verjüngung vorgefundener infizierter Pflanzen lag die Fläche mit 10,7 % im Mittelfeld. Zugleich weist dieser Bestand mit 52,3 m²/ha die absolut größte Bestandesgrundfläche auf und den diesbezüglich höchsten relativen Anteil an Eschen.

Der relative geringste Anteil infizierter Verjüngungspflanzen fand sich in der Naturverjüngung auf TH_1 Ettersberg, die mit 810 Bäumen je ha den stammzahlreichsten Altbestand darstellt. Die Bestandesgrundfläche liegt mit 32,1 m²/ha im mittleren Bereich, und der Mischungsanteil der Eschen bei 29,4 %, was im Vergleich der IBF+ eher ein geringer Eschenanteil ist. Die Hypothese, dass Dichtstand als physische Barriere wirkt, der eine Ausbreitung der Sporen behindert, finden Unterstützung durch die Fläche ST_1 Huy, mit 554 Stämmen und 6,01 % der zweit meisten und zweitgesündesten. Mit 18,77 und 26,09 % sowohl in Bezug auf Stammzahl als auch Grundfläche vergleichbar mit TH_1 Ettersberg. BB_1 Stegelitz, 313 Bäume, 34,19 % davon Esche, befindet sich somit unter den dichteren Flächen bei einem vergleichbar hohen Anteil an Eschen, von denen in der Verjüngung nur 6,37 % eine ETS-Infektion aufwiesen.

Ein eindeutiges Muster eines Einfluss, der von der Bestandesdichte oder dem Mischungsanteil der Esche auf die Vitalität der Naturverjüngung ausgeht, war nicht zu erkennen.

Tabelle 8: Übersicht über die Baumarten des Altbestandes je IB+-Fläche und ihren relativen Mischungsanteil. In jeder Zelle Stammzahl und Grundfläche, bezogen auf einen ha, zur jeweiligen Baumart im Altbestand

	BB_1 Stegelitz	BW_1 Platten- wald	BW_2 Weisweil	HE_1 Schotten	MV_1 Karls- burg	NI_1 Mollen- felde	SN_1 Leutzsch	ST_1 Huy	TH_1 Etters- berg
<i>Acer campestre</i>	1 0,028	49 0,53	1 0,08	6 0,14	0 0,09	4 0	0 0	0 0	0 0
<i>Acer platanoides</i>	0 0	20 0,52	0 0	10 0,18	29 0	0 5,86	3 0,13	0 0,28	4 0
<i>Acer pseudoplatanus</i>	2 0,24	6 0,19	63 3,73	129 5,25	9 1,08	16 1,49	96 11,79	70 1,65	36 2,20
<i>Acerspec.</i>	0 0	6 0,19	118 6,56	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0
<i>Alnus glutinosa</i>	102 14,11	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0
<i>Alnus spec.</i>	0 0	0 0	6 0,41	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0
<i>Betula pendula</i>	6 0,99	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	107 7,18
<i>Betula pubescens</i>	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0,189	2 0	0 0	0 0	0 0
<i>Carpinus betulus</i>	14 0,78	95 2,00	13 0,69	118 6,90	8 0,89	20 0,78	2 0,11	10 8,46	351 0,24
<i>Fagus sylvatica</i>	60 3,81	12 0,22	0 0	35 3,68	55 4,35	82 7,16	12 5,26	338 3,59	106 11,43
<i>Fraxinus excelsior</i>	107 14,85	235 13,64	96 5,75	46 10,13	115 12,87	111 35,21	39 14,61	104 9,44	176 5,57
<i>Larix decidua</i>	6 0,69	0 0	0 0	0 0	0 5,32	32 0	0 0	12 0	0 1,00
<i>Picea abies</i>	0 0	0 0	0 0	0 0	0 3,037	47 0	0 0	0 0	0 0
<i>Populus spec.</i>	0 0	0 0	1 0,01	0 0	0 0,24	2 0	0 0	0 0	0 0
<i>Prunus avium</i>	0 0	0 0	0 0	1 0,239	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0
<i>Quercur robur</i>	4 1,07	0 0	0 0	2 0,16	0 0,97	10 0	11 2,86	0 0	0 0
<i>Quercus petrea</i>	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	9 0	0 0,68
<i>Quercus spec.</i>	0 0	82 10,16	0 0	1 0,16	11 0	0 1,82	0 0	0 0,78	12 0
<i>Rhamnus cathartica</i>	0 0	1 0,01	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0
<i>Rhamnus frangula</i>	0 0	0 0	68 3,54	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0
<i>Robinia pseudoacacia</i>	0 0	0 0	2 0,08	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0
<i>Salix spec.</i>	0 0	0 0	74 3,30	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0
<i>Sorbus torminalis</i>	0 0	2 0,03	0 0	0 0	0 0,01	1 0	0 0	0 0	0 0
<i>Tilia cordata</i>	2 0,27	0 0	0 0	1 0,12	0 1,22	20 0	33 3,37	0 0	0 0
<i>Tilia platyphyllos</i>	3 0,50	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0
<i>Tilia spec.</i>	0 0	0 0	7 0,160	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0,726	18 0
<i>Ulmus spec.</i>	6 0,11	0 0	0 0	1 0,09	0 0	0 0	32 0,37	11 0	0 0,23
Artenanzahl	12	10	11	11	6	12	8	7	8
Summe Stämme	313	509	449	350	227	347	228	554	810
Summe Grundfläche	37,443	27,596	24,306	27,055	30,234	52,315	38,492	32,106	21,357
davon Esche [%]	34,19 39,7	46,17 49,4	21,38 23,7	13,14 37,5	50,66 42,6	31,99 67,3	17,11 37,9	18,77 29,4	21,73 26,1
Eschen in Verjüngung (< 7 cm BHD) [n*100]	487	316	59	396	174	84	579	1.859	1.963
Höhe Eschen (< 7 cm BHD) [Ø cm]	137,9	172,3	130,7	173,7	162,6	173,1	287,4	116,9	95,3
infizierte Eschen in Verjüngung [n*100]	31	47	5	49	22	9	92	93	118
Anteil infiz. Eschen in Verjüngung [%]	6,4	14,9	8,5	12,4	12,6	10,7	15,9	5,0	6,0

Einfluss der Mischungsform von Alteschen im Oberstand auf das Infektionsgeschehen in der Naturverjüngung

Hypothese

Cluster aus infizierten Alteschen haben einen additiven Einfluss auf das Infektionsgeschehen in der Naturverjüngung.

Ergebnisse

Die Frage nach einem additiven Einfluss geclusteter, infizierter Alt-Eschen auf das Infektionsgeschehen ist im Kontext von S. 25ff. bereits beantwortet worden.

Wie dargestellt, bedurfte es eines starken Anstieges von κ^2 , um ein hohes Bestimmtheitsmaß zu zielen. Der Modulator κ^2 gibt an, wie stark die Größe eines Clusters gewertet werden soll. Wenn $\kappa^2 > 1$ ansteigt werden größere Cluster immer stärker als kleinere gewertet. Hohe κ^2 -Werte, bei denen ein hohes Bestimmtheitsmaß erst erreicht worden ist, weisen auf einen überproportional starken Beitrag von größeren eschenreichen Arealen hin. Somit kann bestätigt werden, dass eine Gruppierung von Altbäumen einen additiven Einfluss auf das Infektionsgeschehen ausüben.

1.6 AP 6: Experimentelle Epidemiologie ex situ

Das dritte Arbeitspaket „Experimentelle Epidemiologie ex situ“ beschäftigt sich mit dem Effekt, den die Streu von Mischbaumarten auf das Infektionsgeschehen ausübt.

Material und Methoden: Das Minigewächshaus-Experiment

Zahlreiche Studien, die einen weniger schweren Krankheitsverlauf in Beständen mit einem höheren Anteil an Mischbaumarten zeigen (Grosdidier et al. 2020, p. 1797, Skovsgaard et al. 2017, p. 461, Havrdová et al. 2017, p. 176, Pušpure et al. 2017, Schumacher 2011, p. 8, Enderle et al. 2018, p. 11), führten zur Hypothese, dass beigemischte Baumarten einen positiven Effekt auf die Gesundheit der Eschen ausüben, der über einen einfachen Verdünnungseffekt hinausgeht (Hantsch et al. 2013, p. 8). Havrdová et al. (2017, p. 178) haben festgestellt, dass die Artzugehörigkeit benachbarter Bäume die Gesundheit von Eschen beeinflussen kann. Dies führten sie auf biogeochemische Eigenschaften der Streu zurück, die die Sporenbildungsfähigkeit von *H. fraxineus* beeinflussen. Bartha et al. (2017, p. 84) beobachteten, dass Rhacheis, die mit *Tilia cordata*-Laubstreu bedeckt waren, nach einem Jahr am meisten Masse verloren und deutlich stärker fragmentierter waren als Rhacheis, die mit *Carpinus betulus*- oder *Juglans nigra*-Streu bedeckt waren oder keine Abdeckung hatten. Dies führte zur Überlegung, diese Effekte auch ex situ und ceteris paribus zu untersuchen. Die anfängliche Versuchsidee, das Ganze auf einem Acker durchzuführen, musste abgewandelt werden, nachdem Quellen bekannt wurden, die *H. fraxineus* eine Ausbreitung von bis zu 75 Kilometern pro Jahr zuschrieben (Gross et al. 2014, p. 13). Aus diesem Grund wurden die Untersuchungen auf das ökologische Prüffeld der Technischen Universität Dresden verlagert (<https://navigator.tu-dresden.de/karten/tharandt/geb/har>). Hier stehen 25 Kleingewächshäuser zur Verfügung, die ursprünglich der Untersuchung der Auswirkung von Rauchschäden auf Pflanzen dienen (Abbildung 30 u. 31, oben links).



Abbildung 30: Versuchsdesign. Die Eschenstreu ist mit der von *Acer pseudoplatanus* (grün), *Fagus sylvatica* (gelb) und *Tilia cordata* (rot) in den Mischungsverhältnissen 90% Eschenlaub, 10% Mischbaumartenlaub (gestreift) und andersrum (gestreift) in die Kabinen ausgebracht worden. Ferner gibt es die Variante mit 100% Eschenlaub (blau) und ohne jegliche Streuzugabe (weiß). Eine Variante ohne Streu wuchs ohne Kabinen (blau). Alle Varianten sind drei Mal wiederholt worden)

Hilfsmittel erlaubten, die Eschen exakt gemäß dem Muster zu pflanzen (Abbildung 31, oben rechts).

Auf dieser Fläche bestand die Möglichkeit, mit Gebläsen vorab gefilterte Luft in die Kabinen zu leiten, die dann in den Kabinen unabhängig voneinander mit Schadgasen vermischt werden konnte (Abbildung 28, unten links und rechts). Die Programmierung der Frequenzumwandler erlaubte eine gezielte Steuerung der Lüftungsanlage. Somit konnte gleichzeitig mit der Bewässerung die Lüftung auf Maximum gefahren werden, wie auch morgen von 5 bis 8 Uhr, der Hauptsporulationszeit des Pilzes (Timmermann et al. 2011, p. 17, Steinböck 2014, p. 74, Mansfield et al. 2018, p. 1356, Burns et al. 2022, p. 495). Das Schalten der Lüftung mit der Bewässerung sollte ein Eindringen in die unterirdisch verlegten Rohre verhindern, was in der Regel mit Erfolg gekrönt war.

Generell sollte so ein gewisser Überdruck in den Kabinen eingehalten werden, um einen Eintrag von Sporen aus benachbarten Kabinen zu verhindern. Dies gelang zum Teil, wie die geringe, aber doch vorhandene Infektionsrate der Eschen in der Variante ohne Eschenstreu darlegen (Abbildung 32). Dennoch weist die hohe Quote von 63,3 % der Eschen aus der Referenzreihe X ohne Kabine (Abbildung 32 unten) darauf hin, dass von der Kabine mit Belüftung ein gewisser Schutz ausgeht.

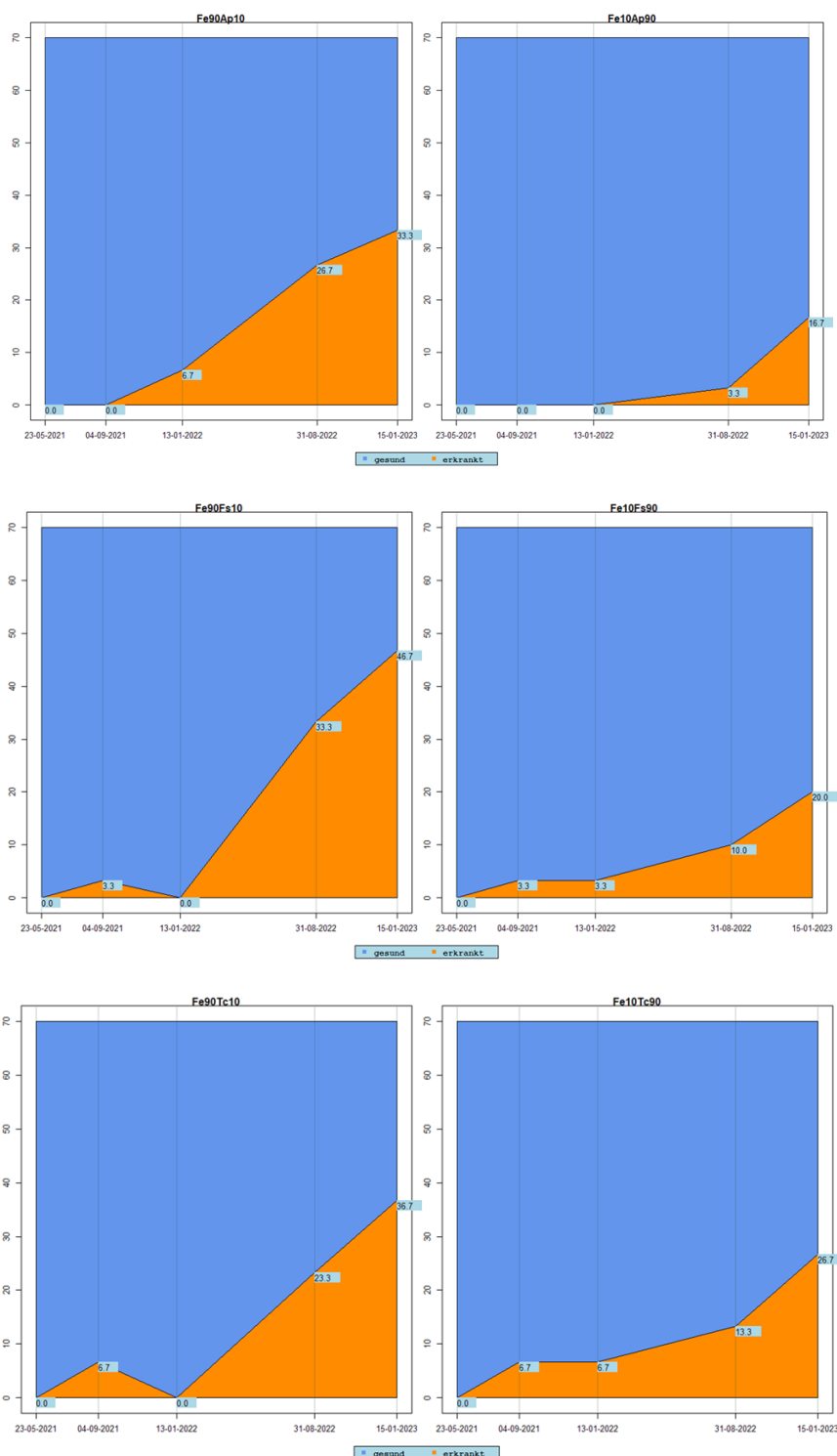


Abbildung 31: (oben links) Aufbau des ökologischen Prüffelds, (oben rechts) Pflanzmuster der Eschen in den Kabinen. Grüne Kreise stehen für Eschen, der blaue für das 15 cm KG-Rohr der Lüftung, (unten links) Hilfsmittel erlaubten die Eschen exakt gemäß dem Muster zu pflanzen, (unten rechts) Ansicht der Kabinen, nachdem 30 cm ausgehoben sind. Später wurden die Kabinen mit Pflanzerde wieder aufgefüllt.

Die angesprochene Bewässerung bestand aus einem Tropfer mit einer Abgaberate von 4 Liter/Stunde pro Pflanze und einem Mikrosprinkler mit 20 Litern/Stunde Abgabe pro Kabine. Die Nachrüstung des Sprinklers war nötig, da sich die Feuchtigkeit sich von den Tropfern nicht weit genug ausbreitet. Dies führte dazu, dass im ersten Jahr des Experiments (2021) die Rhacheis zu lange trocken dalagen, dass der Pilz fast keine Fruchtkörper ausgebildet hat (vergleiche Gross & Holdenrieder 2013, p. 168). Allerdings deuten die sehr geringen Funde von ETS-Symptomen bei der Inventur im September 2021 darauf hin, dass womöglich einige Apothecien vermutlich nahe der Tropfer ausgebildet worden sind.

Am 07.05.2021 sind in jede Kabine 10 Eschen in einem Muster gepflanzt worden (Abbildung 31, oben rechts). Verwendet wurden einjährige unverschulte Eschen der Herkunft „811 03 Mittel- und Ostdeutsches Tief- und Hügelland“. Von den 280 Eschen ist nur eine binnen des ersten Jahres eingegangen und ersetzt worden.

Eine erste Inventur von Höhe, Länge und Wurzelhalsdurchmesser der Eschen erfolgte bereits am 24.05.2021. Weitere Inventuren gemäß des im Verbundvorhaben verwendeten Boniturschlüssels für Jungeschen, wenn auch leicht adaptiert, erfolgten am 04. und 05.09.2021, am 14. und 15.01.2022, vom 01. bis 07.09.2022 und vom 16.01. bis 01.02.2023. Bei letzterer Inventur bedurften abschließende Aufnahmen an den Eschen ohne Kabine ein Warten auf die Schneeschmelze. 2022 gelang es im Unterschied zu 2021 in jeder Kabine, in der infizierte Eschenstreu ausgebracht worden ist auch Apotheken festzustellen. Es zeigte sich, dass über die Zeit die Anzahl an Eschen, die eine Erkrankung aufwiesen, zugenommen hat (Abbildung 32).



[Fortsetzung der Grafik auf der folgenden Seite]

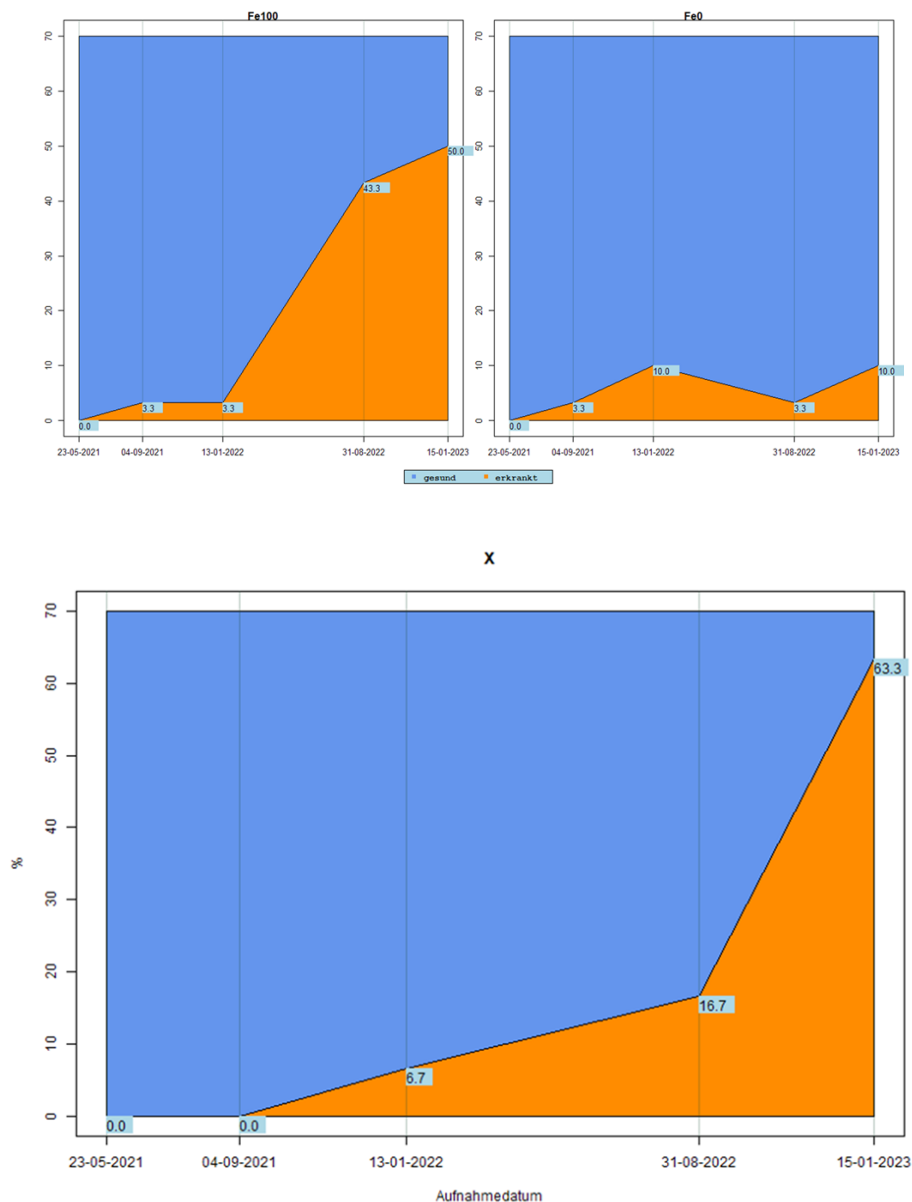


Abbildung 32: Verlauf des Anteils infizierter Eschen nach Versuchsvariante. Die Überschriften der Grafiken kodieren die Variante und setzen sich aus den Initialen der lateinischen Artnamen zusammen gefolgt von dem prozentualen Anteil. Mit „X“ wird die Referenzpflanzreihe bezeichnet, die ohne Kabinen und Streu erwuchs. Die hellblau hinterlegten Zahlen am Graphen geben den relativen Anteil erkrankter Eschen in der Variante an.

Eine Verbesserung des Gesundheitszustands, wie es zum Beispiel zwischen den 04.09.2021 und den 13.01.2022 bei der Grafik für die Variante Fe90Tc10 zu sehen ist, ist der möglichen Fehldiagnose anderer Schadsymptome für Anzeichen des ETS zuzuschreiben. So sind erst im Jahr 2022 Schattierfarbe und Beschattungsnetzen verwendet worden. Die starke Sonneneinstrahlung führte bereits im September zu Blattverfärbungen, die ETS-Symptomen ähnelten. Ferner wurde durch Vernetzung im Verbund die Erkenntnis geteilt, dass bestimmte Zikadenarten bei der Eiablage unter die Rinde auch dem ETS ähnelnde Nekrosen (nur ohne Verfärbungen der Rinde ober- und unterhalb) verursachen können (Strümpel 2010, p. 150 ff.).

Bestimmung der Sporenkonzentration mit Sporenfallen

Ein Nachteil, den diese Methodik aufweist, ist, dass der Effekt der Streu der Mischbaumarten und etwaige aufgrund deren Artzugehörigkeit und Anteil auftretende Effekte auf die Sporenkonzentration nur indirekt anhand von Krankheitssymptomen festgestellt werden sollen. So wurde das Projekt erweitert: Passive Sporenfallen in den Kabinen sollten die Menge an freigesetzten Sporen in der Luft über Sedimentation festhalten, um diese dann anschließend mittels einer qPCR auszuwerten (vergleiche Lacey & West 2006, p. 36 ff.). Die Fallen sind eine Abwandlung des von Schweigkofler et al. (2004) vorgestellten Protokolls und wurden unter anderem bereits von Grosdidier et al. (2017, 2018) und Aguayo et al. (2018) im Zusammenhang mit *H. fraxineus* verwendet. Auch hier haben wir uns mit Georgia Kahlenberg (KU Eichstätt) aus FraxMon bezüglich einer vergleichbaren Methodik abgestimmt. Dabei konnte sie wichtige Erkenntnisse, die sie bereits mit Pollenfallen erlangt hat gewinnbringend einfließen lassen.

Die Sporenfallen sind einfach in der Handhabung und günstig in der Anschaffung. Sie bestanden aus Pflanzuntersetzern aus Plastik sowie Klammern zum Aufhängen von Gardinen. Für die Kabinen ist eine hängende Variante verwendet worden, die oberhalb der Beregnungsanlage unter dem Dach befestigt worden ist, und für die Reihe X eine mit Dach (Abbildung 33). Wie bei Grosdidier et al. (2018) wurde ein Whatman Filter der Güteklasse 1 (1001-150) von 15 cm Durchmesser verwendet. Auf Hinweise von Grosdidier et al. (2018, p. 8) und Dvořák et al. (2016, p. 11) wurden 2021 5 und 2022 2,5 mL Vaseline verwendet, um mehr Sporen an der klebrigen Oberfläche haften zu lassen.

2021 sind vom 26.08. an bis zum 03.11. und 2022 mit dem 20.04. beginnend bis zum 01.11. die Fallen wöchentlich geleert worden. Bei den Leerungen sind direkt an jeder Kabine die Filterpapiere in einen zuvor mit Datum und Kabinennummer ausgestatteten Druckverschlussbeutel gesteckt worden. Nach dem Eintüten sind die hängenden Fallen abgenommen worden und ins Labor gebracht worden. Nun wurde ein neuer Filter auf ihnen festgeklebt und die richtige Menge Vaseline verteilt. Dafür wurde die Vaseline zuerst geschmolzen und mit einer Glasspritze die richtige Menge auf dem Filterpapier gegeben. Ein Silikonpinsel diente dem Verteilen. Die Filter für die stehenden Fallen der Reihe X sind erst mit Vaseline versehen und dann auf den Fallen angebracht worden. Die Druckverschlussbeutel sind bis zur Extraktion 2023 eingefroren worden. So wurden an jeder Woche 29 Filter gesammelt (Einer aus jeder der 25 Kabinen, drei auf den Plätzen ohne Kabine (Reihe X), sowie eine als Nullvariante aus einem Dresdener Hinterhof).



Abbildung 33: Passive Sporenfallen in der hängenden Ausführung [links] für Verwendung in der Gewächshauskabine sowie mit Dach für die Anwendung im Freiland [rechts]

Zum Nachweis von *H. fraxineus* sowie zur Quantifizierung des Sporenaufkommens in den Gewächshauskabinen wurde im Vorhaben, basierend auf der Arbeit von Ios et al. (2009) ein TaqMan Real-time PCR-Assay etabliert. Als TaqMan-Positivkontrolle wurde ein synthetisches Fragment genutzt, welches vom Internal Transcribed Spacer (ITS)-Bereich der ribosomalen DNA (rDNA) abgeleitet wurde. Der TaqMan-Reaktionsansatz (20 µl) enthält 10,0 µl PerfeCTa qPCR ToughMix (Quantabio, vertrieben durch VWR International GmbH, Darmstadt), 7,8 µl RNase-freies Wasser (Carl Roth GmbH + Co. KG), je 0,4 µl Forward- und Reverse-Primer (Eurofins Genomics GmbH), 0,4 µl TaqMan-Sonde (FAM-Seq-BHQ1; Eurofins Genomics GmbH) und 1,0 µl Template-DNA. Das PCR-Programm besteht aus einer initialen Denaturierung von 5 Minuten bei 95°C, gefolgt von 50 Zyklen mit 15 Sekunden bei 95°C und 1 Minute bei 61,1°C.

Die Sensitivität des etablierten TaqMan-Assays wurde mittels einer dezimalen Verdünnungsreihe des synthetischen *H. fraxineus*-Fragments im Bereich von 0,1 ng/µl bis 0,1 ag/µl geprüft. In mehreren Wiederholungen der Reaktion wurde jeweils in Doppelbestimmung (syn. Fragment) sowie mit drei No-Template-Control (NTC)-Proben als Negativkontrolle getestet. Das *H. fraxineus*-Fragment konnte bis zu einer Konzentration von 0,1 fg/µl reproduzierbar nachgewiesen werden. Bei einer Fragmentlänge von 819 Basenpaar (bp) und 532.350 g/mol entsprechen 0,1 fg/µl ca. 113 Kopien des Fragments in 1 µl Probenvolumen. Um die Pilzsporen vom Filterpapier der Fallen zu lösen und für die DNA-Extraktion mit anschließender TaqMan-Quantifizierung vorzubereiten, wurde in Anlehnung an die Beschreibung von Grosdidier et al. (2017) ein optimiertes Protokoll zum Lösen der Pilzsporen aus der verwendeten Vaseline etabliert. Getestet wurden verschiedene Lösungsmittel (TE, ddH₂O) sowie verschiedenen Inkubations- und Zentrifugationszeiten. Für eine optimale Probenvorbereitung wurde die Vaseline mit einer sterilen Rasierklinge vom Filter gekratzt und in eine Falcon-Tube überführt. Zur Probe wurden 20 ml vorgewärmter 4x TE-Puffer gegeben, die Probe für 15 min bei 65°C im Wasserbad inkubiert, 10 s mittels Reagenzglasschüttler gemischt und weitere 10 min bei 65°C inkubiert. Anschließend wurde die Probe für 10 min bei 4°C zentrifugiert, wodurch

sich die Vaseline oberhalb der Suspension und die Pilzsporen am Boden des Falcon-Tubes absetzen. Mit einer Kanüle wurden ca. 18 ml der wässrigen Phase abpipettiert und verworfen. Die Vaseline-Schicht wurde vorsichtig aus der Falcon-Tube entfernt, die verbliebene Sporenlösung resuspendiert und jeweils 1 ml der Lösung in zwei neue 2-ml-Reaktionsgefäße überführt. Die Reaktionsgefäße wurden bei max. Drehzahl für 10 min zentrifugiert, der Überstand (ca. 950 µl) verworfen und die Proben bis zur weiteren Verarbeitung bei -25°C eingelagert.

Für die DNA-Extraktion wurden die Proben zunächst mit Glas-Beads (2 mm und 3,5 mm) in einer Schwingmühle (3 min, 30 Hz) homogenisiert. Die DNA-Extraktion erfolgte mit dem innuPREP Plant DNA-Kit weitestgehend nach Herstellerangaben. Die beiden Reaktionsgefäße einer Probe wurden im ersten Filterschritt zusammengeführt. Abweichend vom Standard-Protokoll erfolgte die Lyse mit 650 µl Puffer und im letzten Schritt wurde die DNA in 40 µl Puffer eluiert. Die extrahierte DNA wurde anschließend bei -25°C gelagert. Die Bestimmung der *H. fraxineus*-Konzentration erfolgte mit dem etablierten TaqMan-Assay. In jedem qPCR-Lauf wurde eine Verdünnungsreihe des synthetischen *H. fraxineus*-Fragments im Bereich von 1,0 pg/µl bis 0,1 fg/µl als Referenz sowie drei NTC-Proben als Negativkontrolle mitgeführt. Der Test der Fallen-Proben erfolgte als Doppelbestimmung mit jeweils 5 µl DNA-Template. Zeigte die Doppelbestimmung einer Probe unterschiedliche Ergebnisse bzw. wiesen die Ct-Werte eine zu hohe Standardabweichung auf, wurde die Probe wiederholt. Die Konzentrationsbestimmung erfolgte über eine relative Quantifizierung, bei der die Änderung des Ct-Werts der Probe im Vergleich zur Referenz berechnet wird.

Es stellte sich heraus, dass Vaseline von Sporen zu trennen schwierig und zeitaufwendig ist. Aus diesem Grund mussten die Leerungen auf 15 zwischen Juni und September 2022 beschränkt werden. Dieser Zeitraum sollte die in der Literatur angegebene Hauptsporulationszeit des Pilzes abdecken (Hietala et al. 2013, p. 305 ff., Chandelier et al. 2014, p. 1299 ff., Baral & Bemmann 2014, p. 248, Dvořák et al. 2016, p. 6, Grosdidier et al. 2018, p. 5, Burns et al. 2022, p. 503).

Ergebnisse

Sporenkonzentration in Abhängigkeit der Variante

Die in der zitierten Literatur gefundenen Angaben, dass vor allem in der Zeit Ende Juni bis früher August Fruchtkörper von *H. fraxineus* ausgebildet werden, mit kleinen Verschiebungen aufgrund von Lokalklima, stimmen mit dem vorgefundenen Muster der Abbildung 34 überein. Auffällig ist ein Anstieg der Sporenkonzentration Anfang September, weswegen die letzte Leerung, die eigentlich nur als Übung durchgeführt worden ist, in der Grafik noch berücksichtigt worden ist.

Dieser überraschende Anstieg könnte darauf hindeuten, dass die Wachstumsbedingungen für den Pilz im Jahr 2022 recht günstig waren, da um diese Zeit auch eine Zunahme der Apothecien im Wald beobachtet wurde (Kahlenberg, in press). Bislang ist keine Arbeit bekannt, die in einem anderen Jahr ähnliches hat beobachten können. Dieses Anzeichen der Vitalität des Pilzes kann, wenn es in den nächsten Jahren vermehrt auftritt, der Esche verstärkt zusetzen.

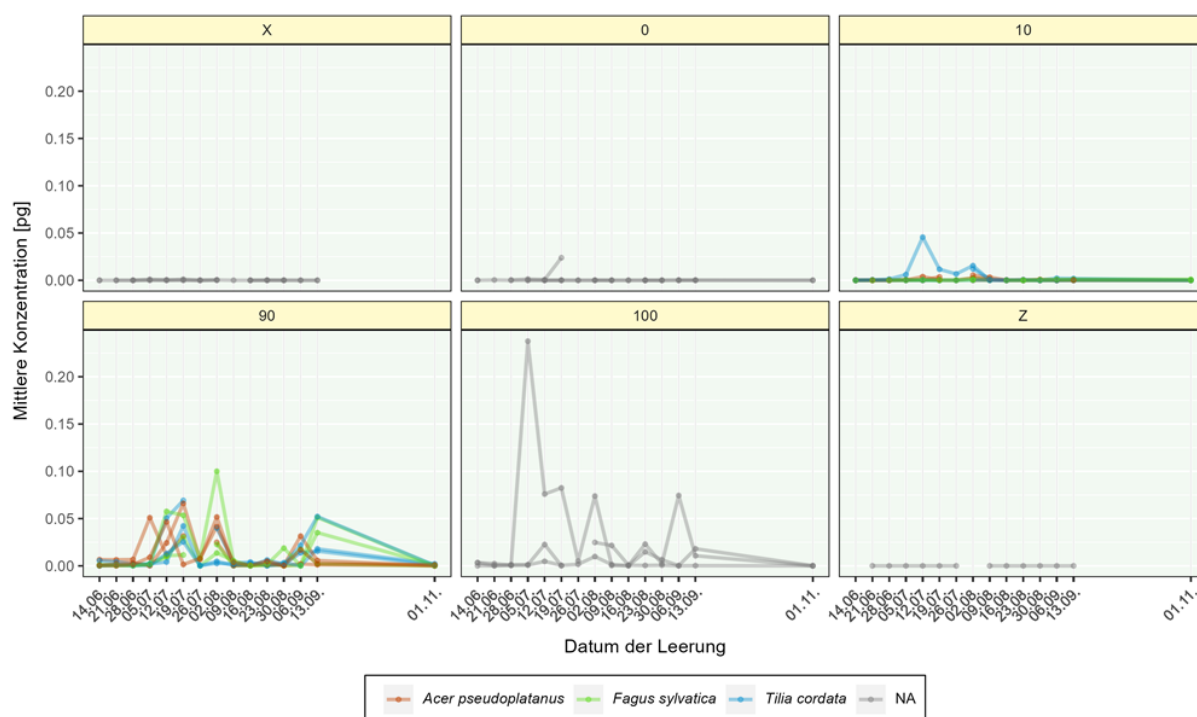


Abbildung 34: Entwicklung der Sporenkonzentration über Zeit. Die Überschrift der Einzelgrafiken zeigt die Menge an verwendeten Eschenlaub an, die Farben, ob Laub von Mischbaumarten verwendet worden ist und welcher Art.

Die Ergebnisse für die Falle Z in Abbildung 31 sind plausibel. Im Umfeld befinden sich nahezu keine Eschen. Reihe X hingegen weist mit 63,3 % erkrankter Eschen bei der Winterinventur 2023 den höchsten Anteil auf, was im starken Kontrast zu den geringen Mengen an Sporen steht, die hier nur gefangen werden konnten. Das Prinzip der Fallen besteht darin, dass sich in dem porösen Filterpapier die Sporen verheddern. Beim Auftragen der Vaseline legt sich eine Schicht über das Papier, sodass die Fixierung anstelle von durch verheddern nur durch festkleben stattfindet. An niederschlagsreichen Tagen sowie sehr taufeuchten morgen konnte auf den Filtern dieser Reihe eine Lache Wasser vorgefunden werden. Dies wird vermutlich die Sporen abgelöst haben, weswegen bei der weiteren Untersuchung die 30 Bäume nicht mehr berücksichtigt werden.

Trotz der beobachteten generellen Zunahme an Eschen mit ETS-Symptomen über die Inventuren, konnten keine signifikanten Unterschiede bei den jeweiligen Mischbaumarten zwischen der Variante mit viel und wenig Eschenstreu gefunden werden, wenn die Daten der letzten Inventur betrachtet werden. Einzig die Varianten mit 100 und 0 % Eschenstreu unterschieden sich signifikant ($\chi^2(1, N=70) = 14.6, p = 1.76 \times 10^{-4}$). Auch konnte zwischen keiner der Mischbaumarten, sowohl in der Variante mit 10 als auch mit 90 % Eschenstreu, ein signifikanter Unterschied gefunden werden.

Zur Analyse, ob die aus den Filterfallen emittierten *H. fraxineus*-Sporen von den gewählten Variablen beeinflusst werden, wurde ein lineares Modell erstellt. Wir analysierten, ob der Anteil der Esche in der Streu und die Identität einer beigemischten Baumart feste Faktoren sind, die das Ausmaß des Eschensterbens beeinflussen. Da die Varianten über den untersuchten Zeitraum unterschiedliche, aber typische Sporenmengen freisetzen, wurde die Sporenmenge für die weitere Analyse aufsummiert.

Hierbei zeigte sich, dass ein lineares Modell (Formel: $\text{sporenSum} \sim 0 + \text{Anteil.Esche} + \text{Art.Mischbaumart}$) ein sehr gutes Bestimmtheitsmaß aufweist, wie in Tabelle 9 angegeben.

Tabelle 9: Kennwerte des linearen Regressionsmodells zur Vorhersage der kumulierten Sporenmenge in den Kabinen. Angegeben ist der geschätzte Wert eines jeden Koeffizienten mit Signifikanzcode und in Klammern dem Standardfehler.

	Sum. Sporen
<i>Anteil.Esche</i>	0.005* (0.001)
<i>Art.Mischbaumart_</i>	-0.002 (0.051)
<i>Acer pseudoplatanus</i>	-0.013 (0.051)
<i>Fagus sylvatica</i>	0.010 (0.051)
<i>Tilia cordata</i>	0.028 (0.059)
<i>Art.Mischbaumart_leer</i>	0.219 (0.084)
<i>Art.Mischbaumart_rein</i>	
Observations	8
R²	0.994
Adjusted R²	0.977
Residual Std. Error	0.059 (df = 2)
F Statistic	56.552* (df = 6; 2)
Note:	*p<0.05; **p<0.01; ***p<0.001

Gleichzeitig wird auffällig, dass einzig der Anteil der Esche zur Erklärung der Sporenmenge beiträgt. In Abbildung 35 wird erkennbar, dass die Verläufe sich für die einzelnen Koeffizienten sich kaum unterscheiden.

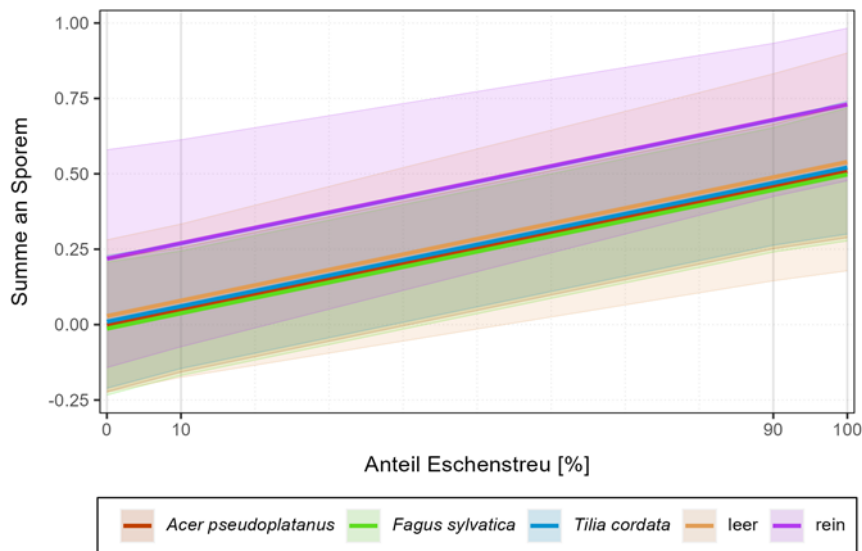


Abbildung 35: Einfluss des Anteils an Eschenstreu sowie der Mischbaumart, deren Laub verwendet wurde, auf die Summe der Sporen in den Kabinen

Lebende und tote Triebe

Auf der Basis der zuvor beschriebenen Ergebnisse ist zur Untersuchung des Einflusses der Eschenlaubmenge auf Triebinfektionen, lebende wie auch tote, nur noch der Anteil an Eschenlaub wie die Gesamtanzahl Triebe der Pflanze in die Analyse mit eingegangen. Dafür verwendeten wir ein negativ-binomiales gemischtes Modell zur Vorhersage (Formel: infiziert.lebend ~ Anteil.Esche + Triebe bzw. infiziert.tot ~ Anteil.Esche + Triebe). Das Modell enthielt die Kabine als Zufallseffekt (Formel: ~1 | Kabine). Die verwendete Funktion glmer.nb() ist dem R-Paket lme4 (Bates et al. 2015) entnommen worden.

Bezogen auf das Modell für die infizierten, aber lebenden Triebe, liegt der Intercept, der Anteil.Esche = 0 und Triebe = 0 entspricht, bei -3,21 (95% CI [-4,20, -2,22], $p < .001$). Innerhalb dieses Modells ist der Effekt von Anteil.Esche statistisch signifikant und positiv (Beta = $9,80 \times 10^{-3}$, 95% CI [$3,44 \times 10^{-4}$, 0,02], $p = 0,042$; Std. Beta = 0,42, 95% CI [0,01, 0,83]), wie auch der der Triebe (Beta = 0,08, 95% CI [0,03, 0,13], $p < .001$; Std. Beta = 0,53, 95% CI [0,22, 0,84]) (siehe Tabelle 10 und Abbildung 36 links).

Tabelle 10: Zusammenfassung der Verallgemeinerten gemischten linearen Modelle (GLMM) für die infizierten lebenden wie abgestorbenen Triebe. Angegeben ist der geschätzte Wert eines jeden Koeffizienten mit Signifikanzcode und in Klammern dem Standardfehler.

	Abhängige Variable:	
	infiziert _{lebend}	infiziert _{tot}
Intercept	-3.214*** (0.505)	-2.986*** (0.475)
Anteil.Esche	0.010* (0.005)	0.014*** (0.004)
Triebe	0.082*** (0.024)	0.096*** (0.028)
Observations	250	250
Log Likelihood	-139.004	-182.268
Akaike Inf. Crit.	288.008	374.536
Bayesian Inf. Crit.	305.615	392.143
Note:	* $p < 0.05$; ** $p < 0.01$; *** $p < 0.001$	

Selbiges Modell, angewendet zur Erklärung durch ETS abgestorbener Triebe, zeigt ein sehr ähnliches Bild, wobei der Intercept mit -2,99 (95% CI [-3,92, -2,05], $p < .001$) etwas höher liegt. Auch hier sind die Effekte von Anteil.Esche (Beta = 0,01, 95% CI [$6,65 \times 10^{-3}$, 0,02], $p < .001$; Std. Beta = 0,62, 95% CI [0,29, 0,96]) wie auch der Triebe (Beta = 0,10, 95% CI [0,04, 0,15], $p < .001$; Std. Beta = 0,63, 95% CI [0,27, 0,98]) statistisch signifikant und positiv (Tabelle 10 und Abbildung 33 rechts).

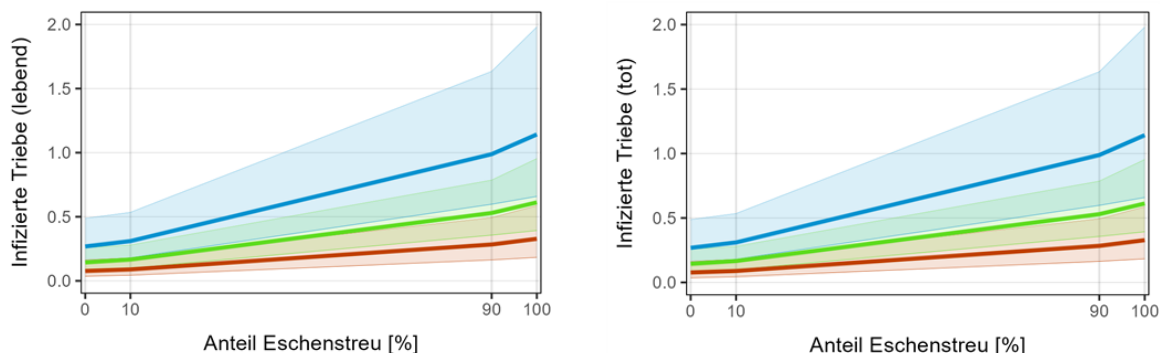


Abbildung 36: Einfluss der Menge an Eschenstreu in den Kabinen auf die Anzahl an mit ETS infizierten Trieben, links der Zusammenhang zu lebenden und rechts zu bereits abgestorbenen Trieben.

Somit steigen die Infektionen mit dem Anteil an Eschenlaub, das in den Kabinen verwendet worden ist, wie auch bei Verjüngungspflanzen mit einer größeren Anzahl an Trieben und somit mehr Blattmasse, die infiziert werden kann.



Abbildung 37: Apothecien von *H. fraxineus* an Laubstreu in den Kabinen des ökologischen Prüffelds (Foto: F. Schrewe 2022)

1.7 Handlungsempfehlung zum forstbetrieblichen Umgang mit dem ETS

Überprüfung und Überarbeitung bestehender waldbaulicher Empfehlungen zur Behandlung durch das ETS geschädigter Bestände unter Einbeziehung der Ergebnisse von (1) bis (4) sowie der Erkenntnisse der anderen FraxForFuture-Unterverbünde, v.a. UV 2 FraxMon und UV 4 FraxPath, sowie des Projektes FraDiv, v.a. hinsichtlich des Schutzes und der Erhaltung mit der Gemeinen Esche verbundener Arten und Lebensgemeinschaften

Ausgehend von einer umfassenden Sichtung und Überprüfung bereits in Deutschland und international bestehender Handlungsempfehlungen zum Umgang mit dem Eschentriebsterben wurden in Synthese praxisrelevanter Ergebnisse der Verbund- und Demonstrationsvorhabens FraxForFuture und des Forschungsprojektes FraDiv der Universität Kiel und in Zusammenarbeit mit der Forstpraxis wurde eine Handlungsempfehlungen zum Forstbetrieblichen Umgang mit dem Eschentriebsterben entwickelt (FNR 2024, s. Abbildung 35.) In dieser Handlungsempfehlung werden mögliche Managementmaßnahmen für betroffene Misch- und Reinbestände der Esche präsentiert. Es werden Praktische Empfehlungen für unterschiedliche Wuchsklassen, respektive natürliche Bestandesentwicklungsstadien gegeben, Maßnahmen erläutert und resultierende Risiken bewertet. Als handlungsleitend wird auf eine natürliche Verjüngung der Esche gesetzt, da diese als natürliches Anpassungs- und Selektionspotenzial gezielt eingeleitet und gefördert werden kann. Ein weiterer Schwerpunkt der Empfehlungen bezieht sich auf die Erhaltung von Ökosystemfunktionen eschenreicher Wälder und den Einsatz und die Bewertung potenzieller Ersatzbaumarten für die Esche. Die Handlungsempfehlung liegt ebenfalls in einer stark anwendungsorientierten Kurzfassung vor, die wichtigste

waldbauliche Maßnahmen differenziert nach der Ausgangssituation übersichtlich tabellarisch zusammenfasst.



https://www.fnr.de/fileadmin/Projekte/2024/Mediathek/52.13.94_Broschuere_A5_Esche_v06_web.pdf



https://www.fnr.de/fileadmin/Projekte/2024/Mediathek/52.13.94_Einleger_130x205mm_Esche_v03_web.pdf

Abbildung 35: Apothecien von *H. fraxineus* an Laubstreu in den Kabinen des ökologischen Prüffelds (Foto: F. Schrewe 2022)

Das übergeordnete Ziel der vorgestellten Managementmaßnahmen ist gemäß dem Hauptziel des Teilverbundes FraxSilva der langfristige Erhalt von stabilen Eschenpopulationen in unseren Wäldern. Dazu werden folgende übergeordnete Handlungsgrundsätze und waldbaulichen Empfehlungen gegeben:

1. Eschennaturverjüngung gezielt einleiten und fördern
2. Förderung und Erhalt vitaler Eschen zur Sicherung der natürlichen Anpassung und genetischen Vielfalt in allen Wuchsklassen
3. Konservativer Umgang mit vorhandenen Alteschen zur Erhaltung des Samenpotenzials und ihrer ökologischen Funktion

2. Verwertung

Die Ergebnisse von TV5.1 und TV5.2 wurden in Form von Postern, Vorträgen und Schulungen verwertet:

2024	Handlungsempfehlungen zum Eschentriebsterben
2024 März	Waldbauschulung Schleswig-Holstein
2023	Artikel im Waldzustandsbericht NW-FVA (alle Bundesländer)
2023 September	Beiträge zur Pflanzenschutztagung / FraxForFuture Tagung: Poster, Vorträge, Beiträge im Tagungsband
2023 September	Poster und Vortrag FOWITA
2023 August	Sommerexkursion mit FraDiv
2023 Mai	Praxisworkshop in Freiburg
2023	Seminarvorträge an der NW-FVA
2022 Okt.	Vortrag vor dem Forstverein Mecklenburg-Vorpommern
2022 Okt.	Teilnahme am Kongress des WKF mit Poster und Kurzvortrag
2022 September	Waldbaufortbildung Schleswig-Holstein der NW-FVA: Vortrag zu Ergebnissen des Projektes
2021 November	Vortrag auf der FFF-Online-Tagung

In Lehrveranstaltungen für Studierende der Forstwissenschaften und Forstwirtschaft sowie in Lehrgängen und Exkursionen für die Mitarbeitenden der Forstbetriebe, forstlichen Versuchsanstalten, Waldbesitzende, Arboristik, der Politik und die interessierte Öffentlichkeit erfolgte ein Wissenstransfer. Darüber hinaus wurden im Projektzeitraum zahlreiche waldbauliche Beratungen zum Umgang mit ETS-geschädigten Eschenbeständen durch das Sachgebiet Ertragskunde der NW-FVA durchgeführt. Das erlangte Wissen und die gesammelte Erfahrung wird der Abteilung Waldwachstum auch in zukünftigen Beratungsfällen von Nutzen sein. Eine weitere Verwertung der Ergebnisse geschah durch den Online-Auftritt im Rahmen verschiedener Webseiten (<https://www.nw-fva.de/forschen/projekte/fraxsilva>, <https://www.fraxforfuture.de/>). Die erworbene Expertise zum Eschentriebsterben wurde in den BMEL Koordinierungskreis zum Erhalt der Gemeinen Esche als Wirtschaftsbaumart, der bei der FNR und dem Kompetenz- und Informationszentrum Wald und Holz (KIWUH) angesiedelt ist, eingebracht.

a) Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen

Es gab im Rahmen des Projektes keine Erfindungen, für die Schutzrechte anzumelden sind.

b) Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende

Die Projektergebnisse von FraxSilva wurden vor allem in der Handlungsempfehlung und ihrer Kurzfassung aufbereitet (s. Ergebnisse, 1.7, S. 43), stehen damit allen Waldbewirtschaftenden und Waldbesitzenden frei zur Verfügung und können so im Rahmen der praktischen Umsetzung einen wirksamen Beitrag zur Erhaltung von Eschenpopulationen und eines natürlichen Anpassungspotenzials der Baumart leisten. Die bekannten wirtschaftlichen Risiken, die sich aus der Übertragung der Ergebnisse in die waldbauliche Praxis ergeben können, sind in der Handlungsempfehlung beschrieben und nach dem derzeitigen Stand des Wissens abgeschätzt.

c) Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende

Gerade die entwickelten waldbaulichen Methoden zu einer gezielten Einleitung und Förderung der Eschennaturverjüngung werden klar und nachvollziehbar beschrieben und dargestellt, so dass sie eine vielfache praktische Nachahmung finden können. Damit kann die Eschennaturverjüngung entgegen früherer Handlungsempfehlungen wirksam in den Laubbaummischbeständen gut nährstoffversorgter Standorte gehalten bzw. im Umfang sogar gemehrt werden, ohne dass im Rahmen des empfohlenen Anwendungsumfangs unkalkulierbare betriebswirtschaftliche Risiken entstehen. Der Hinweis auf die Erhaltung von Alteschen solange wie unter den Gesichtspunkten von Arbeitssicherheit und Betriebswirtschaft möglich, sollte bei konsequenter Umsetzung zu einer langsameren Abnahme der Eschenpopulation führen, als in der jüngeren Vergangenheit. Ein Samenpotenzial und wichtige ökologische Wirkungen der Baumart könnten so zumindest mittelfristig gesichert werden bis eine mögliche natürliche Anpassung sich verstärkt oder im Rahmen der Forschung von FraxForFuture initiierte forstsanitäre und pflanzenzüchterische Maßnahmen Wirksamkeit entfalten können.

d) Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Die Wirtschaftlichkeit einer tatsächlichen Umsetzung der empfohlenen waldbaulichen Maßnahmen zur Eschenerhaltung sollte anhand einer wissenschaftlichen Begleitung entsprechender Betriebe weiter untersucht werden. Ebenso bietet eine praktische breitere Implementierung gerade der empfohlenen Loch- bzw. Femelhiebe die Möglichkeit, den Erfolg und die Wirksamkeit der empfohlenen Maßnahmen wissenschaftlich zu evaluieren und durch die weitere Aufklärung von Wirkzusammenhängen mit weiteren Faktoren wie Lichtsteuerung und Senkung des Wildverbisses zu verfeinern. Gerade letztere Zusammenhänge konnten in den im Projektrahmen angelegten Experimenten bei der kurzen Beobachtung über zwei Vegetationszeiten noch nicht hinreichend untersucht werden.

e) Stand der Erreichung der in der Vorhabenbeschreibung aufgeführten Verwertungsoptionen, Forschungsdaten

Die in der Vorhabenbeschreibung vorgesehenen Verwertungsoptionen wurden erreicht, in Form der geschlossen Handlungsempfehlung zum forstbetrieblichen Umgang mit dem Eschentriebsterben (FNR 2024) und deren Kurzfassung sogar teilweise übertroffen. Bezüglich der Forschungsdaten konnten in der gegebenen Zeit noch nicht alle erhobenen Daten, gerade im Zusammenhang mit den umfangreichen Verjüngungsaufnahmen bisher in voller Tiefe ausgewertet und analysiert werden. Diese Daten könnten eine wertvolle Grundlage für ein Anschlussprojekt bilden, zusammen mit den drei IB+-Flächen im Bereich der NW-FVA und den beiden im Projektrahmen angelegten Waldbauexperimenten, die zur Fortführung durch das

Sachgebiet Ertragskunde der NW-FVA vorgesehen sind. Gleichzeitig werden die Flächen so als Demonstrations- und Anschauungsobjekte im Zuge von Schulungen und Fortbildungen der Forstpraxis dienen, um die Projektergebnisse auch künftig weiter zu vermitteln.

3. Erkenntnisse von Dritten

Erkenntnisse von dritten über die einbezogene, im Quellenverzeichnis aufgeführte Literatur hinaus waren nicht zu berücksichtigen.

4. Veröffentlichungen

Fuchs S, Peters S, Beckschäfer P, Osewold J, Fey C, Langer G, Nagel R-V, Höltnen AM (2023) FraxForFuture: Ein Verbundprojekt zum Erhalt der Esche als Wirtschaftsbaumart. In: Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt, Ministerium für Wirtschaft, Tourismus, Landwirtschaft und Forsten des Landes Sachsen-Anhalt (Hrsg.), Waldzustandsbericht 2023 für Sachsen-Anhalt. S. 37–39. <https://doi.org/10.5281/zenodo.10027000>

Fuchs S, Peters S, Beckschäfer P, Osewold J, Fey C, Langer G, Nagel R-V, Höltnen AM (2023) FraxForFuture: Ein Verbundprojekt zum Erhalt der Esche als Wirtschaftsbaumart. In: Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt, Ministerium für Landwirtschaft, ländliche Räume, Europa und Verbraucherschutz des Landes Schleswig-Holstein (Hrsg.), Waldzustandsbericht 2023 für Schleswig-Holstein. S. 37–39. <https://doi.org/10.5281/zenodo.8412978>

Fuchs S, Peters S, Beckschäfer P, Osewold J, Fey C, Langer G, Nagel R-V, Höltnen AM (2023) FraxForFuture: Ein Verbundprojekt zum Erhalt der Esche als Wirtschaftsbaumart. In: Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt, Hessisches Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (Hrsg.), Waldzustandsbericht 2023 für Hessen. S. 41–43. <https://doi.org/10.5281/zenodo.8431068>

Fuchs S, Peters S, Beckschäfer P, Osewold J, Fey C, Langer G, Nagel R-V, Höltnen AM (2023) FraxForFuture: Ein Verbundprojekt zum Erhalt der Esche als Wirtschaftsbaumart. In: Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt, Niedersächsisches Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (Hrsg.), Waldzustandsbericht 2023 für Niedersachsen. S. 37–39. <https://doi.org/10.5281/zenodo.10083078>

Langer, GJ, Fuchs, S, Osewold, J, Peters, S, Schrewe, F, Ridley, M, Kätzel, R, Bubner, B, & Grüner, J (2022) FraxForFuture—Research on European ash dieback in Germany. *Journal of Plant Diseases and Protection*, 129(6), 1285–1295. <https://doi.org/10.1007/s41348-022-00670-z>

Osewold J, Nagel R-V (2023) Ausprägung des Eschentriebsterbens in der Naturverjüngung. In: FVA Freiburg (Hrsg.), FraxForFuture - Erhalt der Gemeinen Esche (*Fraxinus excelsior*) als Wirtschaftsbaumart. Tagungsband im Rahmen der 63. Deutschen Pflanzenschutztagung am 27.09.2023 in Göttingen, S. 83-87.

Schrewe F (2023) Bedeutung der Streu für den Infektionsdruck auf Jungeschen. In: FVA Freiburg (Hrsg.), FraxForFuture - Erhalt der Gemeinen Esche (*Fraxinus excelsior*) als Wirtschaftsbaumart. Tagungsband im Rahmen der 63. Deutschen Pflanzenschutztagung am 27.09.2023 in Göttingen, S. 88-91.

Steinhart F, Westhauser A, Osewold J, Burzlaff T, Mausolf K, Schrewe F, Fischer H, Nagel R-V (2023) Praxisorientierte Handlungsempfehlung zum zukünftigen Umgang mit dem Eschentriebsterben. In: FVA Freiburg (Hrsg.), FraxForFuture - Erhalt der Gemeinen Esche (*Fraxinus excelsior*) als Wirtschaftsbaumart. Tagungsband im Rahmen der 63. Deutschen Pflanzenschutztagung am 27.09.2023 in Göttingen, S. 62-63.

Steinhart F, Westhauser A, Mausolf K, Osewold J, Schrewe FR, Fischer H, Burzlaff T, Nagel RV (2024) Zukunft der Esche – Empfehlungen zum forstbetrieblichen Umgang mit dem Eschentriebsterben. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V., Gülzow-Prüzen

III Quellenverzeichnis

- AGUAYO, J., FOURRIER-JEANDEL, C., HUSSON, C. & LOOS, R. 2018. Assessment of Passive Traps Combined with High-Throughput Sequencing To Study Airborne Fungal Communities Master, E.R., ed. *Applied and Environmental Microbiology*, **84**, 1–17, 10.1128/AEM.02637-17.
- AMMER, CH. & WAGNER, S. 2005. An approach for modelling the mean fine-root biomass of Norway spruce stands. *Trees*, **19**, 145–153, 10.1007/s00468-004-0373-4.
- BADDELEY, A., RUBAK, E. & TURNER, R. 2016. *Spatial point patterns: methodology and applications with R*. Boca Raton London New York: CRC Press, 810 pp.
- BAKYS, R., VASAITIS, R. & SKOVSGAARD, J.P. 2013. Patterns and severity of crown dieback in young even-aged stands of european ash (*Fraxinus excelsior* L.) in relation to stand density, bud flushing phenotype, and season. *Plant Protection Science*, **49**, 120–126, 10.17221/70/2012-PPS.
- BARAL, H.-O. & BEMMANN, M. 2014. *Hymenoscyphus fraxineus* vs. *Hymenoscyphus albidus* – A comparative light microscopic study on the causal agent of European ash dieback and related foliicolous, stroma-forming species. *Mycology*, **5**, 228–290, 10.1080/21501203.2014.963720.
- BARTHA, B., MAYER, A. & LENZ, H.D. 2017. Acceleration of Ash Petiole Decomposition to Reduce *Hymenoscyphus fraxineus* Apothecia Growth – a Feasible Method for the Deprivation of Fungal Substrate. *Baltic Forestry*, **23**, 82–88.
- BATES, D., MÄCHLER, M., BOLKER, B. & WALKER, S. 2015. Fitting Linear Mixed-Effects Models Using **lme4**. *Journal of Statistical Software*, **67**, 10.18637/jss.v067.i01.
- BURNS, P., TIMMERMAN, V. & YEARSLEY, J.M. 2022. Meteorological factors associated with the timing and abundance of *Hymenoscyphus fraxineus* spore release. *International Journal of Biometeorology*, **66**, 493–506, 10.1007/s00484-021-02211-z.
- CHANDELIER, A., HELSON, M., DVOXÁK, M. & GISCHER, F. 2014. Detection and quantification of airborne inoculum of *Hymenoscyphus pseudoalbidus* using real-time PCR assays. *Plant Pathology*, **63**, 1296–1305, 10.1111/ppa.12218.
- CRACKNELL, D.J., PETERKEN, G.F., POMMERENING, A., LAWRENCE, P.J. & HEALEY, J.R. 2023. Neighbours matter and the weak succumb: Ash dieback infection is more severe in ash trees with fewer conspecific neighbours and lower prior growth rate. *Journal of Ecology*, **111**, 2118–2133, 10.1111/1365-2745.14191.
- DIETRICH, M. 2016. The impact of ash dieback on ash regeneration in the forest reserve Dalby Söderskog (Southern Swedish Forest Research Centre, Hrsg.)
https://stud.epsilon.slu.se/8821/1/dietrich_m_160212.pdf
- DVOXÁK, M., ROTKOVA, G. & BOTELLA, L. 2016. Detection of Airborne Inoculum of *Hymenoscyphus fraxineus* and *H. albidus* during Seasonal Fluctuations Associated with Absence of Apothecia. *Forests*, **7**, 1–13, 10.3390/f7010001.
- ENDERLE, R., BUSSKAMP, J., & METZLER, B. 2017. Growth Performance of Dense Natural Regeneration of *Fraxinus excelsior* under Attack of the Ash Dieback Agent *Hymenoscyphus fraxineus*. *Baltic Forestry*, **23**, 218–228.
- ENDERLE, R., FUSSI, B., LENZ, H. D., LANGER, G., NAGEL, R., & METZLER, B. 2017. Ash dieback in Germany: Research on disease development, resistance and management options. The Report on European Cooperation in Science & Technology (COST) Action FP1103 FRAXBACK, Dieback of European Ash (*Fraxinus* spp.)-Consequences and Guidelines for Sustainable Management, 19.
- ENDERLE, R., METZLER, B., RIEMER, U. & KÄNDLER, G. 2018. Ash Dieback on Sample Points of the National Forest Inventory in South-Western Germany. *Forests*, **9**, 25, 10.3390/f9010025.
- FRANKE, J., SCHREIBER, U. & RUMPF, D. 2023. Klimatologische Einordnungen in Sachsen. In *Wetter trifft auf Klima - Jahresrückblick 2022*. Dresden, 1–59. Available at: https://www.klima.sachsen.de/download/klima/Jahresrueckblick2022_Fachbeitrag_2023.pdf [Accessed January 17, 2024].
- FRISCHBIER, N. & ZEIBIG, A. 2007. Methoden und Ergebnisse einzelbaumorientierter Forschung. In *Tagungsband zur Jahrestagung der Sektion Waldbau, Deutscher Verband Forstlicher Forschungsanstalten 10. und 11.09.2007*. Gotha, 12–25.
- GROSDIDIER, M., AGUAYO, J., MARÇAIS, B. & LOOS, R. 2017. Detection of plant pathogens using real-time PCR: how reliable are late C_t values? *Plant Pathology*, **66**, 359–367, 10.1111/ppa.12591.

- GROSDIDIER, M., IOOS, R., HUSSON, C., CAEL, O., SCORDIA, T. & MARÇAIS, B. 2018. Tracking the invasion: dispersal of *Hymenoscyphus fraxineus* airborne inoculum at different scales. *FEMS Microbiology Ecology*, **94**, 10.1093/femsec/fiy049.
- GROSDIDIER, M., SCORDIA, T., IOOS, R. & MARÇAIS, B. 2020. Landscape epidemiology of ash dieback Thrall, P., ed. *Journal of Ecology*, **108**, 1789–1799, 10.1111/1365-2745.13383.
- GROSS, A. & HOLDENRIEDER, O. 2013. On the longevity of *Hymenoscyphus pseudoalbidus* in petioles of *Fraxinus excelsior* Hantula, J., ed. *Forest Pathology*, **43**, 168–170, 10.1111/efp.12022.
- GROSS, A., HOLDENRIEDER, O., PAUTASSO, M., QUELOZ, V. & SIEBER, T.N. 2014. *Hymenoscyphus pseudoalbidus*, the causal agent of European ash dieback. *Molecular Plant Pathology*, **15**, 5–21, 10.1111/mpp.12073.
- HANTSCH, L., BRAUN, U., SCHERER-LORENZEN, M. & BRUELHEIDE, H. 2013. Species richness and species identity effects on occurrence of foliar fungal pathogens in a tree diversity experiment. *Ecosphere*, **4**, art81, 10.1890/ES13-00103.1.
- HAVRDOVÁ, L., ZAHRADNÍK, D., ROMPORTL, D., PEŠKOVÁ, V. & ERNÝ, K. 2017. Environmental and Silvicultural Characteristics Influencing the Extent of Ash Dieback in Forest Stands. *Baltic Forestry*, **23**, 168–182.
- HIETALA, A.M., TIMMERMAN, V., BØRJA, I. & SOLHEIM, H. 2013. The invasive ash dieback pathogen *Hymenoscyphus pseudoalbidus* exerts maximal infection pressure prior to the onset of host leaf senescence. *Fungal Ecology*, **6**, 302–308, 10.1016/j.funeco.2013.03.008.
- IOOS, R., KOWALSKI, T., HUSSON, C. & HOLDENRIEDER, O. 2009. Rapid *in planta* detection of *Chalara fraxinea* by a real-time PCR assay using a dual-labelled probe. *European Journal of Plant Pathology*, **125**, 329–335, 10.1007/s10658-009-9471-x.
- LACEY, M.E. & WEST, J.S. eds. 2006. *The Air Spora: A manual for catching and identifying airborne biological particles*. Boston, MA: Springer US, 10.1007/978-0-387-30253-9.
- LANDOLT, J., GROSS, A., HOLDENRIEDER, O. & PAUTASSO, M. 2016. Ash dieback due to *Hymenoscyphus fraxineus*: what can be learnt from evolutionary ecology? *Plant Pathology*, **65**, 1056–1070, 10.1111/ppa.12539.
- LANGER, G. J., FUCHS, S., OSEWOLD, J., PETERS, S., SCHREWE, F., RIDLEY, M., KÄTZEL, R., BUBNER, B., & GRÜNER, J. 2022. FraxForFuture—Research on European ash dieback in Germany. *Journal of Plant Diseases and Protection*, 129(6), 1285–1295. <https://doi.org/10.1007/s41348-022-00670-z>
- LYGIS, V., BAKYS, R., GUSTIENE, A., BUROKIENE, D., MATELIS, A., & VASAITIS, R. 2014. Forest self-regeneration following clear-felling of dieback-affected *Fraxinus excelsior*: Focus on ash. *European Journal of Forest Research*, 133(3), 501–510. <https://doi.org/10.1007/s10342-014-0780-z>
- MANSFIELD, J.W., GALAMBOS, N. & SAVILLE, R. 2018. The use of ascospores of the dieback fungus *Hymenoscyphus fraxineus* for infection assays reveals a significant period of biotrophic interaction in penetrated ash cells. *Plant Pathology*, **67**, 1354–1361, 10.1111/ppa.12844.
- MARÇAIS, B., KOSAWANG, C., LAUBRAY, S., KJÆR, E. & KIRISITS, T. 2022. Ash dieback. *In Forest Microbiology*. Elsevier, 215–237., 10.1016/B978-0-323-85042-1.00022-7.
- MESHKOVA, V.L. & BORYSOVA, V.L. 2020. Incidence of ash dieback in the Left-Bank Forest-Steppe depending on stand characteristics. *Forestry and Forest Melioration*, 157–164, 10.33220/1026-3365.136.2020.157.
- NÄTHER, W. & WÄLDER, K. 2003. Experimental Design and Statistical Inference for Cluster Point Processes—with Applications to the Fruit Dispersion of Anemochorous Forest Trees. *Biometrical Journal*, **45**, 1006–1022, 10.1002/bimj.200390058.
- NIELSEN, C.CH.N. & MACKENTHUN, G. 1991. Die horizontale Variation der Feinwurzelintensität in Waldböden in Abhängigkeit von der Bestockungsdichte. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung*, **162**, 112–119.
- PETERS, S.; LANGER, G.; KÄTZEL, R. 2021: Eschentriebsterben – Kriterien zur Schadensbonitur an Eschen. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR), Gülzow-Prüzen, 60 Seiten, ISBN-Nr.: 978-3-942147-44
- PUŠPURA, I., MATISOVS, R., LAIVIE, M., GAITNIEKS, T. & JANSONS, J. 2017. Natural Regeneration of Common Ash in Young Stands in Latvia. *Baltic Forestry*, **23**, 209–217.
- RIBBENS, E., SILANDER, J.A. & PACALA, S.W. 1994. Seedling Recruitment in Forests: Calibrating Models to Predict Patterns of Tree Seedling Dispersion. *Ecology*, **75**, 1794–1806, 10.2307/1939638.
- RIDOUT, M.S., DEMÉTRIO, C.G.B. & HINDE, J.P. 1998. Models for count data with many zeros. *In International Biometric Conference*. Cape Town, 13. Available at: https://www.kent.ac.uk/smsas/personal/msr/webfiles/zip/ibc_fin.pdf [Accessed February 16, 2024].

- SCHUMACHER, J. 2011. The general situation regarding ash dieback in Germany and investigations concerning the invasion and distribution strategies of *Chalara fraxinea* in woody tissue. *EPPO Bulletin*, **41**, 7–10, 10.1111/j.1365-2338.2010.02427.x.
- SCHWEIGKOFER, W., O'DONNELL, K. & GARBELOTTO, M. 2004. Detection and Quantification of Airborne Conidia of *Fusarium circinatum*, the Causal Agent of Pine Pitch Canker, from Two California Sites by Using a Real-Time PCR Approach Combined with a Simple Spore Trapping Method. *Applied and Environmental Microbiology*, **70**, 3512–3520, 10.1128/AEM.70.6.3512-3520.2004.
- SEMIZER-CUMING, D., CHYBICKI, I. J., FINKELDEY, R., & KJÆR, E. D. 2021. Gene flow and reproductive success in ash (*Fraxinus excelsior* L.) in the face of ash dieback: Restoration and conservation. *Annals of Forest Science*, **78**(1), 14. <https://doi.org/10.1007/s13595-020-01025-0>
- SKOVSGAARD, J.P., WILHELM, G.J., THOMSEN, I.M., METZLER, B., KIRISITS, T., HAVRDOVÁ, L., ENDERLE, R., DOBROWOLSKA, D., CLEARY, M. & CLARK, J. 2017. Silvicultural strategies for *Fraxinus excelsior* in response to dieback caused by *Hymenoscyphus fraxineus*. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, **90**, 455–472, 10.1093/forestry/cpx012.
- STEINBÖCK, S. 2014. *Ash dieback caused by Hymenoscyphus pseudoalbidus in Norway: Phenology and etiology of leaf symptoms and ascospore dispersal distances*. mathesis, Wien: BOKU-Universität für Bodenkultur, 120 pp.
- STEINHART, F., WESTHAUSER, A., MAUSOLF, K., OSEWOLD, J., SCHREWE, F., FISCHER, H. & NAGEL, R.-V. 2024. *Zukunft der Esche - Empfehlungen zum forstbetrieblichen Umgang mit dem Eschentriebsterben*. Gülzow-Prüzen: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., 72 pp. Available at: <https://mediathek.fnr.de/zukunft-der-esche.html>.
- STRÜMPPEL, H. 2010. *Die Zikaden!: Auchenorrhyncha*. 1. Aufl. Hohenwarsleben: Westarp-Wissenschaften Available at: <https://katalog.slub-dresden.de/id/0-1372714367>.
- TIMMERMANN, V., BØRJA, I., HIETALA, A.M., KIRISITS, T. & SOLHEIM, H. 2011. Ash dieback: pathogen spread and diurnal patterns of ascospore dispersal, with special emphasis on Norway*. *EPPO Bulletin*, **41**, 14–20, 10.1111/j.1365-2338.2010.02429.x.
- TURCZACSKI, K. 2020. Site conditions for decline of ash stands in Europe. *Acta Scientiarum Polonorum Silvarum Colendarum Ratio et Industria Lignaria*, **19**, 67–73, <https://doi.org/10.17306/J.AFW.2020.2.7>.
- VAN PUTTEN, B., VISSER, M.D., MULLER-LANDAU, H.C. & JANSEN, P.A. 2012. Distorted-distance models for directional dispersal: a general framework with application to a wind-dispersed tree: *Distorted-distance models for directional dispersal*. *Methods in Ecology and Evolution*, **3**, 642–652, 10.1111/j.2041-210X.2012.00208.x.
- WU, H.-I., SHARPE, P.J.H., WALKER, J. & PENRIDGE, L.K. 1985. Ecological field theory: A spatial analysis of resource interference among plants. *Ecological Modelling*, **29**, 215–243, 10.1016/0304-3800(85)90054-7.