

Schlussbericht

zum Verbundvorhaben

Thema:

Demonstrationsprojekt Erhalt der Gemeinen Esche (FraxForFuture)

Verbundvorhaben 2: Monitoring (FraxMon)

Teilvorhaben 1: Projektkoordination und Vitalitätsbewertung von Eschen mit Biomarkern

Teilvorhaben 2: Fernerkundungsbasiertes Monitoringsystem zur Erfassung des Eschentreibsterbens – Schwerpunkt Inventurdesign

Teilvorhaben 3: Fernerkundungsbasiertes Monitoringsystem zur Erfassung des Eschentreibsterbens – Schwerpunkt Modellierung

Teilvorhaben 4: Weiterentwicklung der Erfassung der Eschenvitalität auf Basis von Hyperspektralaufnahmen

Teilvorhaben 5: TH-Intensivmonitoring

Teilvorhaben 6: Fernerkundungsbasiertes Monitoringsystem zur Erfassung des Eschentreibsterbens – Schwerpunkt Interpretationsschlüssel

Teilvorhaben 7: Mikroskopische Analyse der Gewebestruktur

Teilvorhaben 8: Untersuchung von Resistenzindikatoren zur Bewertung der Anfälligkeit von Eschen (*Fraxinus excelsior L.*) gegenüber dem Eschentreibsterben

Zuwendungsempfänger:	Förderkennzeichen:
Landesbetrieb Forst Brandenburg Landeskompetenzzentrum Forst Eberswalde Heinrich-Mann-Allee 103 14473 Potsdam	2219WK20A4
Forstliche Versuch- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg (FVA) Wonnhaldestrasse 4 79100 Freiburg	2219WK20B4
Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (NW-FVA) Abteilung Umweltkontrolle Abteilung Waldschutz, Sachgebiet Fernerkundung und GIS Grätzelstr. 2 37079 Göttingen	2219WK20C4
Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und Automatisierung Sandtorstr. 22 39106 Magdeburg	2019WK20D4
Forstliches Forschungs- und Kompetenzzentrum (FFK) Gotha (TH) Jägerstraße 1 99867 Gotha	2019WK20E4
Landesforst Mecklenburg-Vorpommern -Anstalt des öffentlichen Rechts- (LFoA MV) 19061 Schwerin	2219WK20F4

Hochschule für nachhaltige Entwicklung Eberswalde Professur für Angewandte Biologie des Holzes Alfred-Möller-Str. 1 16225 Eberswalde	2219WK20G4
Katholische Universität Eichstätt-Ingolstadt Professur für Physische Geographie / Landschaftsökologie und nachhaltige Ökosystementwicklung Ostenstraße 18 85072 Eichstätt	2219WK20H4

Laufzeit:

01.07.2020 - 31.01.2024*

*Laufzeitende kann je nach Zuwendungsempfänger abweichen.

Monat der Erstellung:

04/2024

Datum der Veröffentlichung:

17.10.2024

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Ernährung
und Landwirtschaft

Bundesministerium
für Umwelt, Naturschutz
und nukleare Sicherheit

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 und nukleare Sicherheit (BMU) über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) als Projektträger für den Waldklimafonds unterstützt. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

SCHLUSSBERICHT

I. Ziele

1. Aufgabenstellung

Das Eschentriebsterben (ETS) hat sich seit der Entdeckung des Eschenstengelbecherchens (*Hymenoscyphus fraxineus*, Nebenfruchtform: *Chalara fraxinea*) 2002 in ganz Deutschland und zunehmend auch in Europa ausgebreitet und führt häufig zum Absterben der Gemeinen Esche. Um die durch das ETS verursachten Verluste (Qualitätsverlust beim Holz, eingeschränkte kontrollierte Ernte, erhöhtes Risiko und Mehraufwand hinsichtlich der Verkehrssicherungspflicht und Arbeitssicherheit) besser einschätzen zu können und die Esche als Wirtschaftsbaumart in Deutschland nicht zu verlieren, wurde das Projekt FraxForFuture ins Leben gerufen. In verschiedenen Unterverbünden – aufgeteilt nach Themenschwerpunkte – sollte dem ETS koordiniert unter Einbeziehung aller relevanten Fachdisziplinen entgegengewirkt, das ETS besser erfasst und Handlungsempfehlungen entwickelt werden.

FraxMon beschäftigte sich als Unterverbund des Demonstrationsvorhabens FraxForFuture mit allen Themen bezüglich des Monitorings der Esche in Deutschland. Dazu wurden verschiedene Schwerpunkte gesetzt. Zunächst sollte ein Monitoringnetz aus Intensivbeobachtungsflächen (IBF) in ganz Deutschland eingerichtet werden. Mit Hilfe dieser Plots sollten (1) Ökosystemanalysen in eschendominierten Wäldern durchgeführt werden, die eine objektivierte Risikoanalyse zum Ziel hatten, (2) Einzelbaumanalysen zu den Prozessen des ETS ermöglicht und eine Forschungsplattform für alle (nichtinvasiven) Freilanduntersuchungen für alle Partner im Gesamtverbund zur Verfügung gestellt werden. Zusätzlich sollten die IBF eine Möglichkeit zur Identifizierung potenziell resistenter oder toleranter Eschen sein.

Darauf aufbauend war es Ziel in FraxMon, Monitoringverfahren zur Vitalitätsdiagnostik auf verschiedenen Skalenebenen (u. a. Methodenentwicklung, Boniturverfahren) zu entwickeln. Hierbei war ein zentraler Schwerpunkt die Fernerkundung, welche die Entwicklung und Anwendung fernerkundungsbasierter Verfahren speziell für die Erkennung der Eschen und des Schadensfortschritts durch ETS zum Ziel hatte. Im Unterverbund war außerdem die ebenenübergreifende Vernetzung ein wichtiges Ziel (Einzelbaum – Bestand – Rasterpunkt – Fläche). Dadurch sollte das komplexe Schadgeschehen in Deutschland besser quantifiziert werden.

Für einen Gesamtüberblick über den Zustand der Esche in Deutschland wurden alle bundesweit vorliegenden Daten zur Esche in der Waldzustandserhebung und der Bodenzustandserhebung aus den Bundesländern zusammengetragen und hinsichtlich des Vorkommens der Esche, der Schadentwicklung und der Abhängigkeit der Schadentwicklung von Standortsfaktoren untersucht. Zum Schließen der Lücken, die bei der Erfassung einer Nebenbaumart wie der Esche in den Rasternetzen der Bundesländer entstehen, wurden seitens der Fernerkundung verschiedene Methoden angewendet. Es wurden Methoden zur Identifizierung von Eschenbeständen erprobt, ein Luftbildschlüssel zur Erkennung des Schadensfortschritts entwickelt sowie mit Hilfe von Hyperspektralkameras und KI versucht, den Eschenzustand aus der Luft einzuschätzen. Die Eschen auf den IBF wurden damit sowohl aus der Luft als auch vom Boden bonitiert.

Es wurden Bodenbeprobungen und Kartierungen der IBF nach Arbeitsanweisung der Bodenzustandserhebung im Wald (ein Leitprofil pro Fläche mit bodenphysikalischer und bodenchemischer Analytik) durchgeführt sowie für jede IBF die Pilzabundanz und Sporenlast erfasst. Darüber hinaus ist eine räumlich fein aufgelöste Standortskartierung („Feinkartierung“) ausgehend von dem Leitprofil angefertigt worden. Es wurden die terrestrischen Bonituren auf den IBF ausgewertet und eine Publikation in Kombination mit den Feinkartierungsdaten angefertigt.

Von den Einzelbäumen wurden Proben im Rahmen des Monitorings mikroskopisch untersucht (Hyphenwachstum und Charakterisierung) und biochemisch analysiert (Biomarker). Darüber hinaus wurde der Zeitpunkt der Blattsenesenz bzw. des Blattaustriebs der Eschen auf den IBF als möglicher Indikator für die Widerstandsfähigkeit dokumentiert.

2. Stand der Technik

Die Beobachtung der räumlichen und zeitlichen Dynamik des ETS lag bislang in der Verantwortung des Waldschutzmeldewesens der Bundesländer mit unterschiedlicher Schwerpunktsetzung und Methodik. Die Grundsätze des Forstlichen Monitorings, d. h. die periodische Beobachtung der Schadentwicklung auf gleichen Flächen und mit markierten Bäumen und einheitlichen Boniturverfahren sowie ein ökosystemarer Ansatz zur Ursachenforschung der Befallsdynamik konnten dabei bislang nicht berücksichtigt werden. Ebenso liefert die Auswertung von etablierten Monitoringplots des Level 1 (WZE und BZE) Netzes (Raster 16 x 16 bzw. 8 x 8 km) bundesweit nur unbefriedigende Ergebnisse, da wichtige Vorkommen der Esche auf Grund ihrer geringen Flächendeckung in einer Reihe von Bundesländern außerhalb der Rasterpunkte liegen. Diese

Defizite sollten mit dem vorliegenden Forschungsvorhaben aufgehoben werden. Gleichfalls mussten alle vorhandenen Daten der Bundesländer zum Kronenzustand der Esche des WZE-Netzes bundesweit zusammengefasst werden, um die Aussagegenauigkeit für eine nicht flächendeckend vorkommende Baumart bewerten zu können. Bezuglich der Auswertung von WZE-Daten (Level 1) sowie der Einrichtung derartiger Beobachtungsflächen bestanden große Erfahrungen innerhalb der Forstlichen Umweltkontrolle (Level 2-Messnetz) der Länder und des GenMon-Projektes (Waldklimafonds FKZ 28WC4092; gen-mon.de), in dem 24 adäquate Monitoringflächen deutschlandweit für die Baumarten Fichte und Rot-Buche etabliert wurden. Gleichfalls lagen Studien zur Methodik von Schadbonituren und phänologischen Stadien in verschiedenen Institutionen vor (z. B. Lenz et al., 2012: Eschentriebsterben – Biologie und Behandlung. LWF-Merkblatt Nr. 28), die in einem einheitlichen Methodenleitfaden zusammengefasst werden mussten.

Zur Erfassung der Kronenverlichtung der Esche, einem Symptom des ETS, mittels Fernerkundungstechnik standen zu Projektbeginn keine Verfahren zur Verfügung. Die Einzelbaum-Vitalitätsansprache basierend auf Stereo-Luftbilder wurde zwar bereits mit analogen Luftbildern in der Praxis eingesetzt. Es existierte jedoch nur ein Stereo-Luftbildinterpretationsschlüssel für die Vitalitätsansprache von Fichten, Kiefern, Buchen und Eichen, der für die Anwendung auf analoge Luftbilder entwickelt wurde (basierend auf VDI-Richtlinie 3793, Blatt 2, Kapitel 4, 1993). Die Auflösung und Qualität analoger Luftbilder genügen jedoch nicht mehr den durch die digitale Fernerkundung aktuell ermöglichten Standards. Deshalb sollte in FraxMon ein Stereo-Luftbildinterpretationsschlüssel zur Ansprache der Kronenvitalität für Eschen entwickelt werden, der für die Anwendung auf digitale Luftbilder konzipiert ist. Somit sollen die Möglichkeiten moderner, mehrkanaliger, präzise verorteter digitaler Luftbilddaten optimal genutzt werden.

Das Wissen über das Vorkommen und die Verteilung von Baumarten ist eine Grundlage für eine effiziente Waldbewirtschaftung. So sind auch die Informationen zum Vorkommen von Eschen ein elementarer Bestandteil eines effizienten Monitorings des ETS und gegebenenfalls Grundlage für die Durchführung von Maßnahmen der Verkehrs- und Bestandessicherung. Dennoch sind diese Informationen nicht flächendeckend vorhanden. In den vergangenen Jahren wurden in vielen wissenschaftlichen Untersuchungen das Potential verschiedener Fernerkundungssensoren (Multi- und Hyperspektraldaten)^{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8} und Algorithmen (vor allem Maschine Learning) für die automatisierte Baumartenerfassung beleuchtet. Im Jahr 2023 wurden zwei deutschlandweite, auf Fernerkundungsdaten (Sentinel-2) basierende Baumartenkarten veröffentlicht (Thünen-Institut: https://atlas.thuenen.de/layers/geonode:Dominant_Species_Class; Helmholtz Zentrum für Umweltforschung (UFZ): <https://web.app.ufz.de/waldzustandsmonitor/de?area=6&layer=45>). In beiden Fällen werden Eschen nicht explizit ausgewiesen, sondern einer allgemeinen Laubholzklasse zugeordnet. Auch bei intern an der FVA-BW sowie an der NW-FVA erstellten Baumartenkarte für Baden-Württemberg und Niedersachsen wurde letztendlich auf die Ausweisung von Eschenflächen verzichtet, da die erzielte Genauigkeit nicht ausreichend für den praktischen Einsatz war. Der Grund wird hierbei in der mangelnden Zahl an qualitativ hochwertigen Referenzdaten in einem Ansatz, der auf die Ausweisung multipler Klassen setzt, sowie im häufigen Vorkommen der Esche als Mischbaumart gesehen.

Bezüglich der baumphysiologischen Frühindikation und Bewertung der Prädisposition von Gehölzen gegenüber biotischen Schaderregern sind bereits einige Erfahrungen für diverse Baumarten (Eiche, Kiefer, Douglasie, Pappel, Robinie) gesammelt worden, die für die Esche angepasst werden mussten. Bislang stand die Selektion potenziell genetisch resistenter Individuen im Vordergrund der Untersuchungen. In den bisherigen (inter)nationalen Forschungsaktivitäten zum Verständnis des Infektionsgeschehens zwischen *Hymenoscyphus fraxineus* und seiner Wirtspflanze blieb dabei die jeweilige ökophysiologische Prädisposition der Esche und die gehölzphysiologischen Folgewirkungen des Befalls weitgehend unberücksichtigt. Deshalb sollte die physiologische Plastizität der Esche, die durch unterschiedliche Faktoren beeinflusst werden kann, in das Monitoringprogramm integriert werden. In der Literatur wird häufig dokumentiert, dass vital und gesund geglaubte Bäume im folgenden Jahr drastische Symptome des ETS zeigen können. Verlässt man sich allein auf optische Indikatoren, ist eine adäquate Auswahl von geeigneten Plusbäumen nicht gesichert. Genetische Resistenzmarker sind bisher nur in geografisch begrenzten Teilen Europas getestet worden. Es hat sich dabei

¹ Waser, L., Ginzler, C., Kuechler, M., Baltsavias, E., & Hurni, L. (2011). Semi-automatic classification of tree species in different forest ecosystems by spectral and geometric variables derived from Airborne Digital Sensor (ADS40) and RC30 data. *Remote Sensing of Environment*, 115, 76–85.

² Dalponte, M., Orka, H.O., Gobakken, T., Gianelle, D., & Naesset, E. (2013). Tree Species Classification in Boreal Forests With Hyperspectral Data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 51, 2632–2645.

³ Engler, R., Waser, L.T., Zimmermann, N.E., Schaub, M., Berdos, S., Ginzler, C., & Psomas, A. (2013). Combining ensemble modeling and remote sensing for mapping individual tree species at high spatial resolution. *Forest Ecology and Management*, 310, 64–73.

⁴ Waser, L. (2017): Baumartenerkennung mit Luftbilder. LWF Aktuell, 19-21.

⁵ Fricker, G.A., Ventura, J.D., Wolf, J.A., North, M.P., Davis, F.W., & Franklin, J. (2019). A Convolutional Neural Network Classifier Identifies Tree Species in Mixed-Conifer Forest from Hyperspectral Imagery. *Remote Sensing*, 11, 2326.

⁶ Grabska, E., Frantz, D., & Ostapowicz, K. (2020). Evaluation of machine learning algorithms for forest stand species mapping using Sentinel-2 imagery and environmental data in the Polish Carpathians. *Remote Sensing of Environment*, 251, 112103.

⁷ Hemmerling, J., Pflugmacher, D., & Hostert, P. (2021). Mapping temperate forest tree species using dense Sentinel-2 time series. *Remote Sensing of Environment*, 267, 112743.

⁸ Immitzer, M., Vuolo, F., & Atzberger, C. (2016b). First Experience with Sentinel-2 Data for Crop and Tree Species Classifications in Central Europe. *Remote Sensing*, 8, 166.

gezeigt, dass regionale Unterschiede in der Verwendbarkeit dieser Marker eine bedeutende Rolle spielen^{9, 10}. Da eine kosten- und arbeitsintensive genetische Beurteilung zudem für ein großflächiges und bundesweites Monitoring eher ungeeignet erscheint, stellt sich die Frage, welche weiteren Indikatoren nützlich sind, um auf eine Anfälligkeit gegenüber dem ETS zu schließen.

Da phänologische Traits in ihrer Erblichkeit als hoch eingestuft werden¹¹, können sie möglicherweise als Indikator in Betracht gezogen werden. Pliūra & Baliukas (2007)¹² als auch Bakys et al. (2013)¹³ fanden heraus, dass stärker geschädigte Eschen dazu neigen, später auszutreiben. Untersuchungen zur Herbstphänologie zeigten, dass sich weniger geschädigten Eschen durch einen verfrühten Blattfall auszeichnen¹⁴. Bei der Studie von Stener (2012)¹⁵ treten jedoch schwierig zu interpretierende Ergebnisse auf: Der Blattfall ist positiv, die Blattverfärbung negativ mit den Schadstufen der Eschen korreliert. Eine weitere Studie stellte keine Beziehung zwischen Schädigungsgrad und Blattfall der Eschen fest¹⁶. Da diese unterschiedlichen Ergebnisse möglicherweise durch die verwendete Methodik zu begründen sind (u. a. Aufnahme der Phänologie an nur einem Stichtag, Untersuchung von Sämlingen), waren detaillierte und regelmäßige Untersuchungen an Altbäumen im Rahmen von FraxMon notwendig. Neben der Phänologie eignen sich möglicherweise auch weitere Pflanzenmerkmale wie der Blattchlorophyllgehalt sowie die Pollenviabilität als Indikatoren für eine Anfälligkeit gegenüber dem ETS. All dies wurde jedoch seither nicht umfassend und systematisch untersucht, und sollte im Zuge dieses Projektes näher erforscht werden.

Die Verbreitung der Ascosporen von *Hymenoscyphus fraxineus* ist Grundvoraussetzung für die Schädigung der Eschen. Daher ist die Detektion der infektiösen Vermehrungseinheiten von erheblicher Bedeutung für das Management des ETS^{17, 18, 19, 20}. Ein umfassendes Monitoring der Sporen kann dabei helfen, den Infektionsdruck zu ermitteln, ohne die Symptome oder sogar die Wirtsbäume selbst verfolgen zu müssen. Wichtige Plot-basierte Erkenntnisse zum Infektionsdruck mit Hilfe von aerobiologischen Sporenmessungen sollten in FraxMon erzielt werden. Hauptaugenmerk sollte auf den Zusammenhang mit meteorologischen Bedingungen liegen, da dieses Wissen noch sehr gering ist²¹ (Burns et al. 2022).

Markante Merkmale des ETS sind Veränderungen in Rinde und Holz von Zweigen, Ästen und Stamm, die bislang jedoch nur äußerlich bonitiert wurden. Die vom Pilz ausgelösten histologischen Veränderungen, die letztendlich zum Absterben von Organen und Baum führen, blieben in den bisherigen Forschungen unberücksichtigt. Vor diesem Hintergrund sollten biochemische und histologische Veränderungen des Holzes ebenfalls in das Untersuchungsprogramm einbezogen werden.

3. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Kooperationen beschränkten sich im Projekt nicht nur auf die verschiedenen Teilvorhaben im Unterverbund, wobei bereits nach neuen Quervernetzungen zwischen den Forschungsschwerpunkten und Untersuchungsebenen gesucht wurde, sondern erstreckten sich auch auf viele andere Institute im Gesamtverbund und Partner außerhalb der Forschungsgruppe.

Durch die Einrichtung der IBF für alle Partner in FraxForFuture gab es diesbezüglich mit diversen Institutionen Kontakte. Dies spiegelte sich z. B. bei der Probennahme wider. Auf den jeweiligen Flächen wurden die Probennahmen mit den zuständigen Flächenverantwortlichen der Bundesländer mit Unterstützung weiterer Projektpartner durchgeführt. Die zentralen Probennahmen ermöglichten eine maximale Übereinstimmung der

⁹ Enderle R & Metzler B (2017) Genetische Grundlagen der Resistenz gegenüber dem Eschentreibsterben. Präsentation beim Fachgespräch „Eschentreibsterben“, Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe e.V., 14.06.2017, Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft, Berlin.

¹⁰ Sollars ES, Harper AL, Kelly LJ, Sambles CH, Ramirez-Gonzales RH (2017) Genome sequence and diversity of European ash trees threatened by ash dieback. Nature, 541, 212–216.

¹¹ Hannerz M (1998) Genetic and seasonal variation in hardiness and growth rhythm in boreal and temperate conifers. Skogforsk. Report No. 2, Uppsala, 1–140.

¹² Pliūra A & Baliukas V (2007) Genetic variation in adaptive traits of progenies of Lithuanian and Western European populations of *Fraxinus excelsior* L. Baltic Forestry, 13(1), 28–38.

¹³ Bakys R, Vasaitis R, Skovsgaard JP (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 Sciences, 49, 120–126.

¹⁴ McKinney LV, Nielsen LR, Hansen JK, Kjær ED (2011) Presence of natural genetic resistance in *Fraxinus excelsior* (Oleaceae) to *Chalara fraxinea* (Ascomycota): an emerging infectious disease. Heredity, 106, 788–797.

¹⁵ Stener L-G (2012) Clonal differences in susceptibility to the dieback of *Fraxinus excelsior* in southern Sweden. Scandinavian Journal of Forest Research, 28(3), 205–216.

¹⁶ Kirisits T & Freinschlag C (2012) Ash dieback caused by *Hymenoscyphus pseudoalbidus* in a seed plantation of *Fraxinus excelsior* in Austria. Journal of Agricultural Extension and Rural Development, 4(9), 184–191.

¹⁷ Timmermann V, Børja I, Hietala AM, Kirisits T, Solheim H (2011) Ash dieback: pathogen spread and diurnal patterns of ascospore dispersal, with special emphasis on Norway. EPPO Bulletin 41(1), 14–20.

¹⁸ Chandelier A, Nelson M, Dvorak M, Gischer F (2014) Detection and quantification of airborne inoculum of *Hymenoscyphus pseudoalbidus* using real-time PCR assays. Plant Pathology, 63(6) 1296–1305.

¹⁹ Lenz H & Mayer A (2016) Eschentreibsterben: Erhöhter Sporenflug nach Niederschlag. AFZ-DerWald, 8, 10–12.

²⁰ Dvořák M. (2022) Detection of airborne inoculum of *Hymenoscyphus fraxineus*: The causal agent of ash dieback. Methods in Molecular Biology (Clifton, N.J.) 2536, 119–137.

²¹ Burns P, Timmermann V, Yearsley JM (2021) Meteorological factors associated with the timing and abundance of *Hymenoscyphus fraxineus* spore release. International Journal of Biometeorology, 66, 493–506.

Proben (und damit bestmögliche Vergleichbarkeit der Analysen) und reduzierte für andere Unterverbünde den zeitlichen und personellen Aufwand sowie Reisekosten. Insgesamt wurden 2021 beispielsweise Proben für das LFE, die HU Berlin, der KU Eichstätt-Ingolstadt, dem ZALF, dem JKI, der HNEE, der Uni Göttingen und der FVA-BW gleichzeitig genommen.

Alle Verbünde aus FraxForFuture arbeiteten eng im Rahmen ihrer Funktion als Flächenverantwortliche zusammen. Insbesondere bei der Durchführung der Bonituren auf den IBF, inklusive Datenzusammenführung und -auswertung.

In enger Abstimmung mit dem Teilvorhaben FraxPath 4.1 wurde die Auswertung der bestehenden Daten zur Esche aus der Wald- und Bodenzustandserhebung durchgeführt. Dort sind auf 109 Eschenplots der WZE aktuelle Erhebungen mit dem im Projekt entwickelten Boniturschlüssel durchgeführt worden.

Die standorts- und bodenkundlichen Erhebungen auf den IBF wurden nach den Vorgaben der bundeseinheitlichen Bodenzustandserhebung durchgeführt und zentral über die Projektdatenbank allen Teilvorhaben von FraxForFuture zur Verfügung gestellt. Damit haben alle Teilvorhaben, die auf den IBF arbeiteten, Zugriff auf einheitliche Basisdaten zu den Untersuchungsflächen.

Mehrere Partner aus FraxMon waren neben der Entwicklung des Boniturschlüssels (Zusammenarbeit FraxMon / FraxPath / FraxGen / FraxConnect) auch auf anderen Ebenen mit FraxPath und FraxGen vernetzt. Beispielsweise wurde Pilzmycel von FraxPath biochemisch untersucht und durch den Austausch der Proben mit Partnern aus FraxGen konnten auch hier Ergebnisse verglichen und Zusammenhänge aufgedeckt werden. So hat die HU Berlin ebenfalls phenolische Analysen durchgeführt, allerdings auf anderer biochemischer Ebene als das LFE. Gemeinsam mit der HNEE untersuchte die HU Berlin Proben, um die Einlagerung von Phenolen bei Abschottungsversuchen zu überprüfen. Dafür wurden aus Infektionsversuchen der Uni Göttingen Triebe genutzt. Durch den direkten Austausch der Proben konnte eine sehr enge Zusammenarbeit und eine gemeinsame Auswertung der überschneidenden Daten ermöglicht werden. Dies erlaubte eine bessere Einschätzung der eigenen Ergebnisse bezüglich künftiger Forschungsarbeiten. Gleichermaßen ergab sich aber beispielsweise auch durch die Kooperation innerhalb von FraxMon. Durch den Austausch von Daten mit anderen Projektpartnern und den Vergleich von Messwerten, die mit unterschiedlichen Methoden erhoben worden sind (z. B. Chlorophyll), hat sich ein großer Mehrwert für das Projekt ergeben.

Da Recherchen ergaben, dass sich die genetische Analyse zur Bestimmung der Sporen aus der Luft möglicherweise besser eignet als die morphologische, erfolgte die Bestimmung der Sporenanzahl mit Hilfe der qPCR-Methode in Zusammenarbeit mit dem Projektpartner Universität Hohenheim (FraxPath / FraxVir). Die Aufbereitung der Filter (DNA-Extraktion), fand dabei in den Laboren der KU Eichstätt-Ingolstadt statt.

II. Ergebnisse

1. Erzielte Ergebnisse

1. Retrospektive

Bei Eschenbeständen, die dem Erreger des ETS (*H. fraxineus*) ausgesetzt sind, manifestieren sich die Symptome des ETS über ein bis mehrere Jahre unter anderem in den strukturellen Eigenschaften der Baumkronen (abnehmende Belaubung, transparente Krone, zunehmender Totastanteil). Die WZE erfasst seit 1983 den Kronenzustand von Waldbäumen auf einem Raster über ganz Deutschland, wobei die Rasternetzweite je nach Bundesland und Region zwischen 2 x 2 und 8 x 8 km variiert. Pro Stichprobenpunkt wird ein Kollektiv von 24 Bäumen angesprochen, welches sukzessions- und mortalitätsbedingt einer gewissen Fluktuation unterliegt. Ebenso unterlag die Methodik und die Rasternetzweite der WZE historisch sehr starken Schwankungen - insbesondere in den 80er und 90er Jahren. Aus diesem Grund konnten zur Analyse der räumlich-zeitlichen Ausbreitung des ETS nur die Daten von 2002 bis 2020 genutzt werden. Für die Abhängigkeit von Umweltvariablen wurde nur der Zeitraum von 2010 bis 2020 genutzt, da erst seit 2010 davon auszugehen ist, dass der Erreger in allen Bundesländern präsent war²² (Enderle et al. 2017).

Als einzige in Raum und Zeit vergleichbar und regelmäßig aufgenommene Variable wurde die Kronenverlichtung der WZE als Proxy für das ETS genutzt. Dieses Vorgehen ist valide, da auf den IBF nachgewiesen werden konnte, dass zwischen Kronenschadstufen und Kronenverlichtung ein sehr enger Zusammenhang besteht (erklärte Varianz von 80%, Fuchs et al. 2024, in review). Die Kronenverlichtung unterschätzt zwar über lange Zeiträume den tatsächlichen Fortschritt des ETS, da absterbende Bäume in der WZE aus methodischen Gründen durch noch lebende Bäume derselben oder einer anderen Art ersetzt werden, für überschaubare Zeiträume und insbesondere für kurzfristige Effekte von Jahr zu Jahr eignet sich die Kronenverlichtung jedoch gut als Proxy für das Triebsterben in Eschenkronen. Um die Kronenverlichtung

²² Enderle R, Fussi B, Lenz H, Langer G, Nagel R, Metzler B (2017a) Ash dieback in Germany: research on disease development, resistance and management options. In: Vaisatis R, Enderle R (eds) Dieback of European Ash (*Fraxinus spp.*) - Consequences and Guidelines for Sustainable Management. SLU Uppsala, Uppsala, pp 89–105

zu modellieren wurde dem Ansatz von Eickenscheidt et al. (2019)²³ gefolgt und gemischte generalisierte additive Modelle mit Logit-Linkfunktion auf Plot-Ebene mit Raum-Zeit-Glätter angepasst. Für eine ausführlichere Beschreibung der Methodik sei an dieser Stelle auf den Abschlussbericht des Verbundvorhabens FraxPath verwiesen (Kapitel 2.1, TV4.1, AP3).

Die Esche ist seit dem Stichjahr 2002 nur auf 243 WZE-Plots im Probekollektiv vertreten. Dabei ist sie standortsbedingt viel seltener in Nord- und Ostdeutschland als in Süddeutschland (Abbildung 1). Dadurch ist die Analyse der ETS-Ausbreitung erschwert und Raum-Zeit-Modelle sind gerade im Norden Deutschlands mit großen Unsicherheiten behaftet (Abbildung 1). Gut lässt sich jedoch retrospektiv die Abhängigkeit der Kronenverlichtungsentwicklung von Standort, Bestandesalter, Eschendichte und den Witterungsbedingungen im Sommer des Vorjahrs ableiten (Abbildung 2). Die ersten Anzeichen erhöhter Kronenverlichtungswerte zeigten sich in den späten 2000er Jahren in Mecklenburg-Vorpommern, wo der Erreger auch als erstes in Deutschland nachgewiesen wurde. Ein weiterer räumlicher Hotspot für hohe Kronenverlichtungswerte mit leichter zeitlicher Verzögerung ist der eschenreiche Süden der Bundesrepublik. Dagegen zeigten die Eschen der Mittelgebirgsschwelle bis 2020 nur moderate Kronenverlichtungswerte. Nach der Ausbreitung des Erregers über das gesamte Bundesgebiet (etwa seit 2010) erhöhte sich die Kronenverlichtung der Eschen mit einigen ausgeprägten räumlichen Hotspots und jährlichen Schwankungen (Abbildung 1). Auffällig sind z. B. die starke Zunahme der Kronenverlichtung nach dem Jahr 2017, in dem der Hochsommer sehr feucht war, und der leichte Rückgang der Kronenverlichtung nach ausgeprägten Trockenjahren (z. B. 2018). Die ökologische Erklärung dafür ist die Abhängigkeit des Fruktifikations- und Sporulationserfolges des Erregers *H. fraxineus* von feuchten Bedingungen in der Laubstreu im Hochsommer. Dieser Effekt spiegelt sich auch direkt in den erklärenden Umweltvariablen: Sowohl edaphisch bedingt feuchtere Standorte (hydromorphe Böden) als auch feuchtere Witterungsbedingungen im Hochsommer des Vorjahrs (Abbildung 2 b und d) haben einen signifikant positiven Effekt auf die Kronenverlichtung. Unter den Bestandesvariablen, die im WZE-Datensatz verfügbar waren, begünstigte in erster Linie eine höhere Eschendichte (angenähert durch den Anteil von Eschen an der 24-Baum-Stichprobe) die Kronenverlichtung (Abbildung 2 c). Das Bestandesalter spielt auch eine wesentliche Rolle: Waren junge Eschenbestände zu Beginn des ETS noch weniger stark verlichtet (wie für Laubbäume im Allgemeinen üblich), nahm ihre Verlichtung über den Zeitraum von 2011-2020 erheblich stärker zu, als bei Altbeständen. Dies spiegelt sich im 2D-Effekt des Tensorprodukts aus Bestandesalter und Aufnahmehr Jahr wieder (Abbildung 2 a).

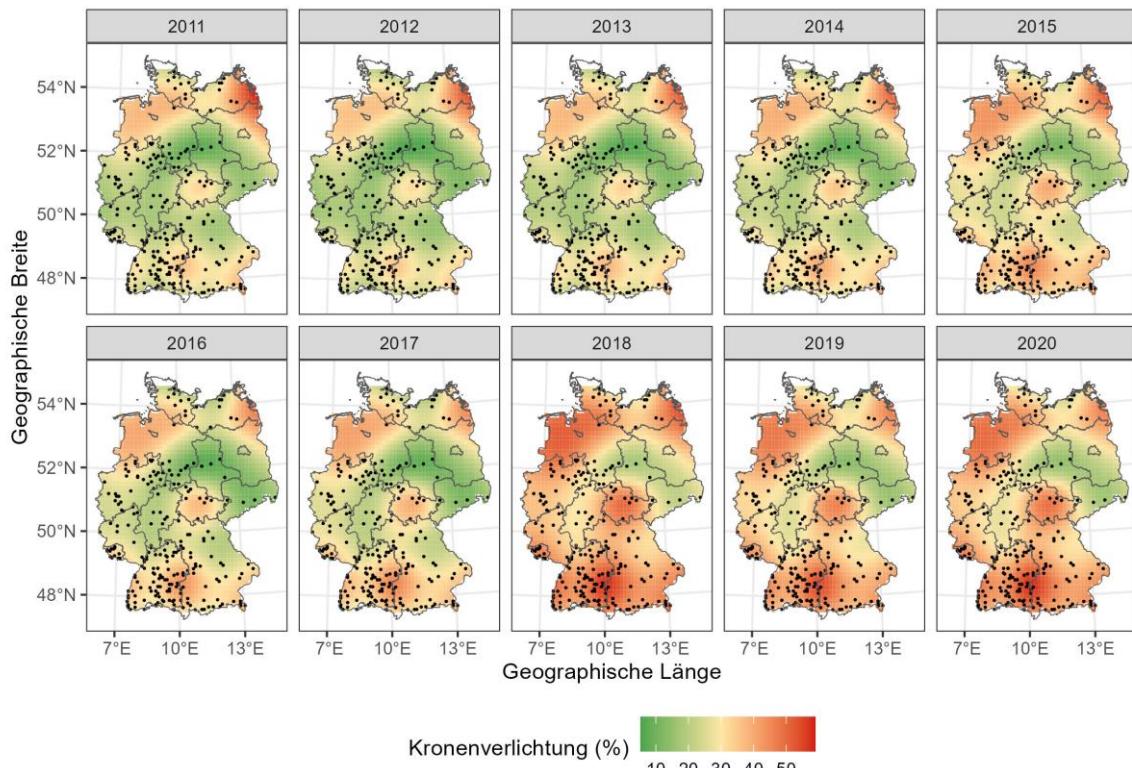


Abbildung 1: Räumlich-zeitliche Darstellung der modellierten Kronenverlichtung auf Basis der Waldzustandserhebung von 2011 bis 2020 für einen fiktiven 60-jährigen Eschenbestand. Grundlage ist ein generalisiertes additives Modell auf Plotebene mit Raum-Zeit-Glättung. Auffällig ist der sprunghafte Anstieg der Kronenverlichtung nach dem nassen Sommer 2017. Die schwarzen Punkte repräsentieren die WZE-Datenpunkte mit Esche. Bemerkung: Aufgrund der schlechten Datenlage in Nordwest- und Nordostdeutschland sind hier die Modellvorhersagen mit sehr großen Unsicherheiten behaftet.

²³ Eickenscheidt N, Augustin NH, Wellbrock N (2019) Spatio-temporal modelling of forest monitoring data: modelling German tree defoliation data collected between 1989 and 2015 for trend estimation and survey grid examination using GAMMs. iForest - Biogeosciences and Forestry 12(4):338. <https://doi.org/10.3832/ifor2932-012>

Neben der Kronenverlichtung wären Absterbe- oder Ausfallraten weitere interessante Parameter der WZE, die Rückschlüsse auf die Verbreitung und den Fortschritt des ETS zuließen. Hier kommt allerdings die dünne Datenlage noch deutlicher zum Tragen, da Absterbeereignisse statistisch viel seltener sind als die regelmäßig erhobene Kronenverlichtung. Grundsätzlich enthält die WZE auch Daten zum Befall und zur Befallsintensität einzelner Pathogene. Allerdings sind die Aufnahmerichtlinien dazu erst im Laufe des letzten Jahrzehnts in allen Bundesländern vereinheitlicht worden. Hinzu kommt, dass sich die eindeutige Zuordnung der Symptomatik zum Erreger bei neu eingeschleppten Pathogenen (so auch bei *H. fraxineus*) erst im Laufe der Jahre klärt und damit auch erst mit Verzögerung bundesweit einheitlich angesprochen werden kann.

Um das ETS (und in Zukunft auch andere forstpathologische Entwicklungen) automatisierter, großflächiger und lückenloser überwachen können, bieten sich z. B. die Methoden der Fernerkundung an. Um dafür standardisierte Verfahren zu entwickeln, sind Untersuchungsflächen mit Einrichtungskriterien notwendig, die über die der Level I (WZE) und Level II (intensives Forstmonitoring) hinausgehen. Zu diesem Zweck und um eine gemeinsame Forschungsplattform für alle Teilvorhaben zu bieten, wurden für den Projektverbund FraxForFuture IBF für die Esche eingerichtet.

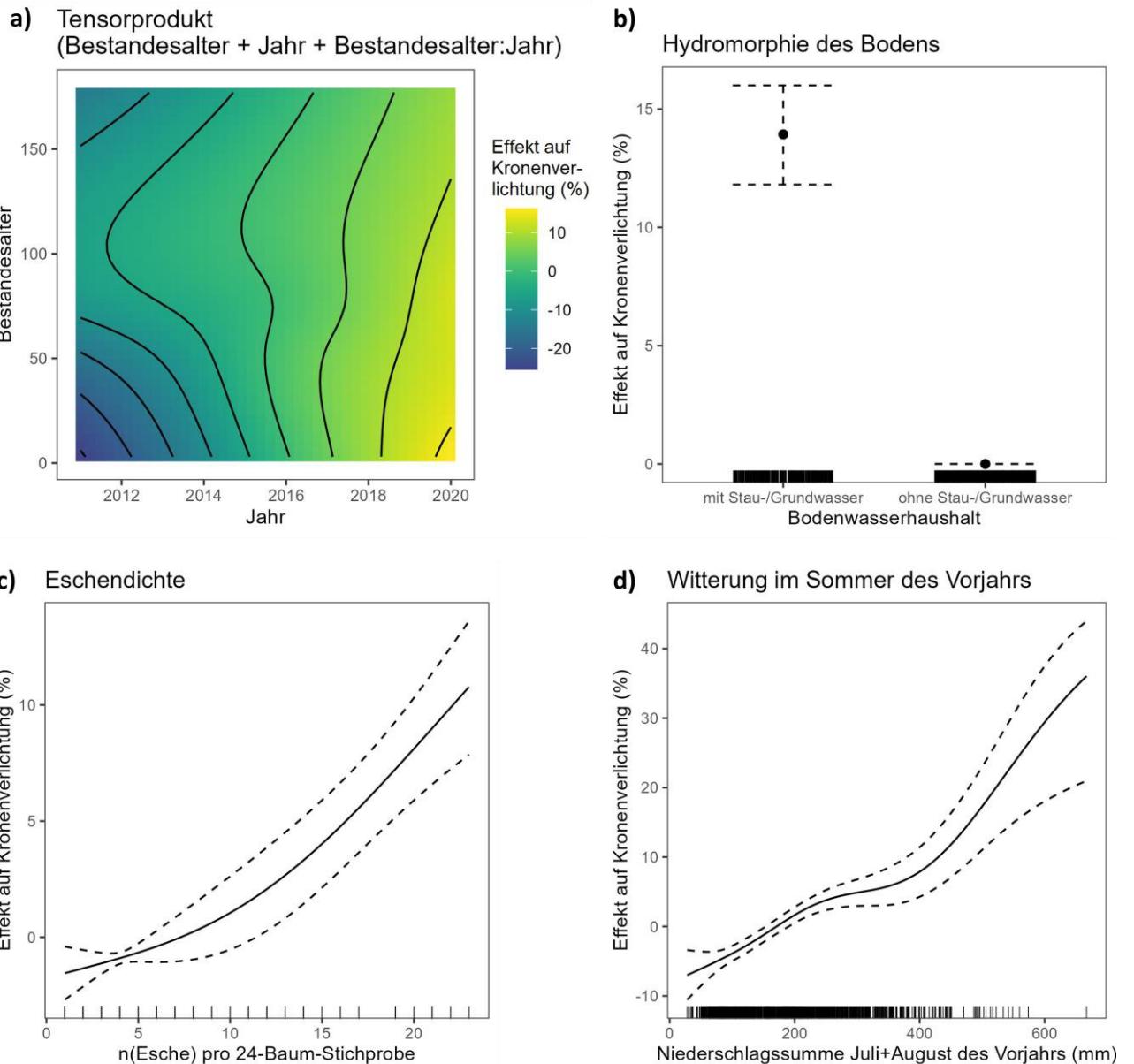


Abbildung 2: Partielle Effekte der meisterklärenden Umwelt- und Bestandesvariablen auf die Kronenverlichtung von Eschen im WZE-Kollektiv anhand eines gemischten generalisierten additiven logit-link-Modells. Alle Effektgrößen sind rücktransformiert auf Prozentpunkte der Kronenverlichtung. Die Einflüsse von a) Bestandesalter, Erhebungsjahr und ihrer Interaktion, b) Grund- und stauwasserbeeinflussten Böden, c) Eschendichte im Bestand und d) der Niederschlagssumme der Sommermonate Juli und August des Vorjahres auf die Kronenverlichtung sind dargestellt. Gestrichelte Linien repräsentieren die 95%-Konfidenzintervalle.

2. Einrichtung der Intensivbeobachtungsflächen

Die IBF bildeten im Rahmen des Projektes die Grundlage für das Verständnis des Fortschreitens des ETS in Deutschland. Dieses Verständnis ist unverzichtbar für die Entwicklung geeigneter Gegenmaßnahmen zur Bewältigung der ökologischen und wirtschaftlichen Probleme, die durch das ETS entstehen. Die IBF dienten nicht nur als Momentaufnahme, sondern bieten auch künftig die Möglichkeit, Bonituren langfristig fortzusetzen und für kommende Forschungsprojekte zu nutzen. Dies ermöglicht eine kontinuierliche Überwachung und die Erfassung von Langzeitveränderungen im Zusammenhang mit dem ETS.

Unmittelbar nach Beginn des Projektes wurden kurzfristig Auswahlkriterien für die IBF festgelegt und es wurden die ersten Flächen in vier Bundesländern eingerichtet, sodass hier bereits 2020 die Arbeiten beginnen konnten. Bei der Auswahl der Flächen wurde ein möglichst breites Spektrum an Standorten (z. B. geografische Lage, Bodenbeschaffenheit, lokales Klima, Naturräume) und eine große Diversität in den Eschenpopulationen abgedeckt. Außerdem sollten auf den Flächen Eschen möglichst aller Vitalitätszustände vorkommen. Auf den 1 ha großen Flächen wurde eine Teilfläche oder die gesamte Fläche eingezäunt, um die Naturverjüngung vor Verbiss zu schützen und die Entwicklung des ETS an Jungpflanzen beobachten zu können. Es wurden alle Alteschen nummeriert, vermessen und eingemessen. 2021 erfolgten die Auswahl und Einrichtung weiterer Flächen nach denselben Kriterien. Insgesamt wurden 14 IBF eingerichtet (Abbildung 3). Eine Zusammenfassung über die IBF als Grundlage vieler Arbeiten, vor allem im Monitoring wurde veröffentlicht (siehe Veröffentlichungen). Für die Betreuung der Flächen waren die jeweiligen Forstlichen Versuchsanstalten der Länder zuständig. Diese führten alle Basisarbeiten auf den IBF durch, waren Ansprechpartner bei Arbeiten anderer Institute auf ihren Flächen und führten kontinuierlich Bonituren durch.

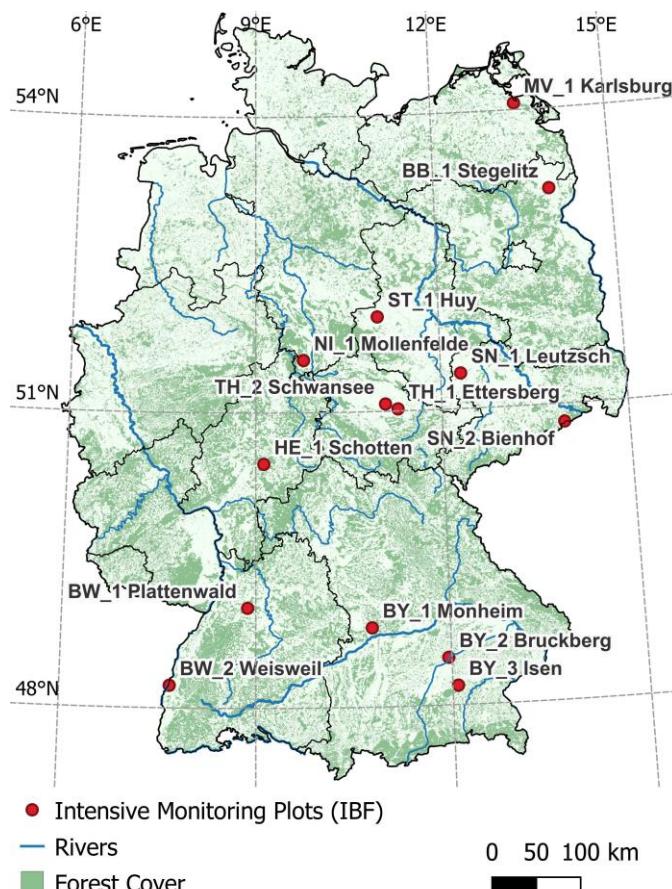


Abbildung 3: Karte der Intensivbeobachtungsflächen (übernommen aus Langer et al. 2022). Insgesamt wurden 14 IBF in 8 Bundesländern eingerichtet. Bei der Auswahl wurde auf eine große Standortsdiversität geachtet.

Die IBF waren Ausgangspunkt für einen großen Teil der Arbeiten von FraxForFuture. So wurde auf allen 14 Flächen ein Bodenprofil angelegt, bodenmorphologisch nach KA5 (Bodenkundliche Kartieranleitung, 5. Auflage) beschrieben und bis 2 m Tiefe in sieben Tiefenstufen nach der Anleitung zur zweiten Bodenzustandserhebung im Wald beprobt. Davon ausgehend wurde jede IBF mit je 10-12 Bodenbohrungen flächig feinkartiert und in mehrere Teilflächen mit vergleichbaren Eigenschaften hinsichtlich Bodenwasserhaushalt, Trophie und Substratlagerung untergliedert. Alle dabei erhobenen Daten wurden aufbereitet und dem Gesamtverbund zur Verfügung gestellt. Die Daten wurden außerdem genutzt, um Zusammenhänge zwischen Eschenzustand und kleinräumigen Standortsunterschieden zu analysieren.

Außerdem wurden zwei Mal jährlich (im Winter und Sommer) Bonituren aller Alteschen durchgeführt. Es erfolgten darüber hinaus eine Bonitur der Naturverjüngung, Messungen von Sporen und Pilzabundanz, Luftbilderfassungen (auf 10 IBF) und Entnahmen von Probenmaterial (Holz, Triebe, Blätter, Zweige, Blattspindeln mit Pilzfruchtkörper) für diverse Projektpartner in FraxForFuture. Nahe der IBF wurden auch Probefällungen durchgeführt. Die IBF wurden auch zur Plusbaumauswahl und für genetische sowie virologische Untersuchungen genutzt.

Insgesamt konnte durch diese intensive Beobachtung ein breit gefächertes Bild der einzelnen, ganz verschiedenen Flächen entstehen. Die interdisziplinäre Zusammenarbeit und Überschneidung der Daten trug zu einem umfassenden Verständnis des ETS in Deutschland bei, ermöglichte das Identifizieren neuer, sinnvoller Schnittstellen und trägt somit zum bestmöglichen Verständnis des ETS bei. Die vollständige Verschneidung der Daten in einer zentralen Datenbank ist erst zum Projektende hin möglich. Dies eröffnet jedoch die Chance zur noch umfassenderen Auswertung und kann weitere Synergien zwischen verschiedenen Disziplinen zu Tage fördern.

Durch die langfristige interdisziplinäre Zusammenarbeit bieten die IBF eine Plattform zur Optimierung der entwickelten Monitoring-Methoden, insbesondere im Bereich der Fernerkundung. Der Erhalt vieler IBF ist seitens der flächenverantwortlichen Institute gewünscht und wird von diesen nach Möglichkeit auch durchgeführt. Dies unterstreicht die Bedeutung dieser Forschungsplattformen und die Bereitschaft zur langfristigen Zusammenarbeit in der Eschenforschung.

3. Bonituren

November 2020 begannen die ersten Abstimmungen mit FraxPath und später auch mit FraxGen zur Entwicklung eines bundesweit einheitlichen Boniturschlüssels. Mit Hilfe dieses Schlüssels sollte eine möglichst objektive und einheitliche Ansprache der Eschen, speziell in Hinblick auf das ETS ermöglicht werden. 2021 wurde der Schlüssel für die Winter- und Sommeransprache von Alteschen sowie ein Schlüssel für die Verjüngung fertiggestellt und veröffentlicht („Eschentreibsterben – Kriterien zur Schadensbonitur an Eschen“ (Peters et al. 2021a), siehe Kapitel II.4 Veröffentlichungen).

Die ersten Bonituren wurden bereits im Winter 2020/21 auf den eingerichteten IBF durchgeführt. Seitdem erfolgten halbjährlich die Vitalitätsansprachen. Für ein einheitliches Vorgehen erfolgten Einweisungen in die Bonitur (Boniturworkshops) und zusätzliche Schulungen bei Änderungen. Hierbei konnten praktische Fragen und Probleme besprochen werden. Daraus ergaben sich Anpassungen in den folgenden Bonituren und der Schlüssel wurde überarbeitet. Verbundübergreifend wurden die Daten aus den Bonituren der Alteschen ausgewertet. Diese mündeten in der verbundweiten Publikation „Ash dieback assessments on intensive monitoring plots in Germany: Influence of stand, site and time on disease progression“ (Fuchs et al., in review, siehe Publikationen). Hier wurde zum ersten Mal die Bonitur von Eschen mit dem neuen Boniturschlüssel bei geschulter und systematischer Anwendung überprüft und ausgewertet. Der Boniturschlüssel wurde im Laufe des Projektes auf Grundlage der gesammelten Erfahrungen angepasst und als überarbeitete Auflage zum Projektende erneut veröffentlicht.

Für die Jungeschen wurde einmalig 2022 eine Bonitur auf vier Plots je Fläche durchgeführt. Im Winter 2021/22 gab es auf den IBF MV1 und BB1 starke Schäden durch zwei Sturmereignisse. Auf beiden Flächen wurde die Winterbonitur bereits vor den Stürmen durchgeführt. Es wurde aber klar: Selbst eine Wiederholung der Winterbonitur wird in ihrem Gesamtbild dem Schadensbild nicht gerecht. Deshalb wurde eine weitere Boniturstufe für angeschobene und geworfene Eschen eingeführt. Somit konnte auch ein Zusammenhang zwischen Stammfußnekrosen und Windwurf überprüft werden.

Die Sommerbonitur der Alteschen fokussiert sich auf die Krone der Bäume. Die Winteransprache hingegen bietet ein umfassenderes Bild vom Schadensfortschritt, da zwischen intakten Kronen und Kronen mit hohem Wasserreiseranteil unterschieden werden kann und auch Schäden durch Folgeschaderreger oder Nekrosen an Stamm und Stammfuß erfasst werden.

Die Bonitur der Jungeschen ist für Pflanzen bis 2 m Höhe gedacht und umfasst den Zustand der Hauptachse, der Triebe und der Blätter und sollte im Hochsommer durchgeführt werden. Durch die Erfassung vieler einzelner Parameter sollte eine Einschätzung erfolgen, welche Merkmale im Zusammenhang mit dem ETS stehen und welche sich davon unabhängig ausbilden. Die wichtigsten Größen des Boniturschlüssels sind im Sommer die Kronenverlichtung und im Winter neben der Kronenansprache die Erfassung der Stammfußnekrosen. Details zu den erfassten Parametern sind im Boniturschlüssel zu finden (siehe Veröffentlichungen). Bei der Aktualisierung wurde die Kronenverlichtung als separater Parameter aufgenommen und orientiert sich an der WZE, womit eine Überschneidung der Eschenansprache des entwickelten Boniturschlüssels und der WZE erlaubt.

Bei der Auswertung der Boniturdaten der Alteschen konnte zunächst ein deutlicher Unterschied zwischen der Vitalitätseinschätzung der Sommer- und Winterbonitur festgestellt werden (Abbildung 4). Die Bewertung des Kronenzustandes fällt im Sommer tendenziell besser aus als im Winter. Dies lässt sich gut durch die

Kompensation mit Wasserreisern in der Krone erklären. Die Kronen wirken im Sommer dicht belaubt und lassen wenige Strukturfehler erkennen, während viele Wasserreiser im Winter sich negativ auf die Gesamtbewertung auswirken. Zusätzlich können im Winter abgebrochene Triebspitzen und eine unregelmäßige Kronenperipherie besser erkannt werden. Im Sommer hingegen ist bei fast allen bonitierten Eschen die Sicht teilweise eingeschränkt und kann zu Ungenauigkeiten führen. Stammfußnekrosen der Stufe 2 erwiesen sich als sehr guter Indikator für die Standsicherheit: Das Risiko einer Esche mit Nekrosenstufe 2, innerhalb des Beobachtungszeitraums von 2,5 Jahren umzufallen, war etwa fünfmal höher als ohne oder nur mit kleinen Stammfußnekrosen. Generell waren Kronenzustand und Stammfußnekrosen hochgradig korreliert. Der Anteil der toten Eschen mit starker Stammfußnekrose ist in beiden Stufen nahezu identisch (67 % Stufe 5 und 68 % Stufe 6).

Über den Beobachtungszeitraum verschlechterte sich der Kronenzustand der Eschen im Allgemeinen, was hauptsächlich von Mortalitätsereignissen getrieben war (Tabelle 1 und Abbildung 4). Vom Sommer 2021 zum Sommer 2022 verschlechtert sich der Kronenzustand insgesamt, während er sich von 2022 zu 2023 wieder verbessert. Insbesondere hat sich der Anteil der Stufe 2-Kronen deutlich erhöht, während Stufe 3 und 4 rückläufig waren. Die besten Boniturstufen insgesamt wurden auf ST1 erreicht, während in Baden-Württemberg und Bayern, gefolgt von Brandenburg die Kronenzustände am schlechtesten ausfielen. Die Entwicklung der Stammfußnekrosen zeichnen ein noch deutlicheres Bild: Während auf BB1 und MV1 bereits länger das ETS existiert, ist der Sporendruck in Kombination mit den feuchteren Böden auf den südlichsten Flächen ausschlaggebend für das schnelle Absterben der Eschen.

Die Abbildung 4 zeigt auch, dass es zumindest auf den ausgewählten Flächen so gut wie keine völlig vitalen Eschen (Stufe 0) gibt und auch die Stufe 1 immer seltener auftritt. Dennoch: Insgesamt verbesserte sich der Zustand der überlebenden Eschenpopulation auf 6 von 11 Flächen signifikant. Allgemein waren Eschen mit niedrigem Brusthöhendurchmesser (BHD) stärker betroffen als dicke Eschen. Räumlich betrachtet war der Eschenzustand innerhalb von Beständen (sowohl Krone als auch Stammfußnekrosen) immer dort schlechter, wo die Böden hydromorphe Merkmale aufwiesen (also stau- oder grundwasserbeeinflusst waren) oder wo die Eschengrundflächendichte lokal höher war. Insbesondere bei flächenhaften, kostenintensiven Wiederanbauversuchen von Eschen, die entweder durch Auslese oder Bekämpfungsverfahren toleranter gegenüber dem Erreger sind, sollten deshalb in Zukunft Reinbestände und hydromorphe Bodenverhältnisse vermieden werden.

Insgesamt erklärten die aufgenommenen Parameter zum Standort und Bestand sowie zu grundlegenden Einzelbaumeigenschaften (BHD, lokale Eschendichte) zusammen mit den zufälligen Effekten auf Flächenlevel nur einen einstelligen Prozentsatz der beobachteten Gesamtvarianz im Eschenzustand. Der zufällige Effekt auf Einzelbaumebene hingegen erklärte nahezu 50 % der Gesamtvarianz. Dies bedeutet, dass Unterschiede zwischen Individuen, die nicht direkt mit dem BHD zusammenhängen, einen Großteil der Anfälligkeit gegenüber dem Eschentreibsterben erklären. Dies sind vermutlich individuelle Unterschiede in der genetischen Ausstattung und der phänotypischen Plastizität. Bestandes- und Standortparameter sowohl klein- als auch großräumig haben dagegen nur eine untergeordnete Vorhersagekraft für die Symptomatik des Eschentreibsterbens.

Tabelle 1: Tendenzen der Schadstufe für jede IBF. Ein „+“ zeigt eine Zunahme der Schäden (Erhöhung der Boniturstufe) über den Beobachtungszeitraum, das „-“ hingegen eine Abnahme der Schäden Verbesserung der Boniturstufe über den Beobachtungszeitraum an, ein „.“ hingegen eine Verschlechterung. „Alle Eschen“ bezieht sich auf die Gesamtmenge der bonitierten Eschen auf den IBF, „Überlebende Eschen“ umfasst nur Eschen, die bis zum Ende des Zeitraums lebten bei der jeweiligen Bonitur lebende Eschenpopulation (Boniturstufe 0 bis 4). Hinter den Trends sind die p-Werte angegeben.

IBF	Boniturstufe (mit p-Wert)			
	Alle Eschen		Überlebende Eschen	
BB1	+	<0.0001	+	<0.0001
BW1	Keine Tendenz	0.2166	-	<0.0001
BW2	-	<0.0001	-	<0.0001
BY1	+	<0.0001	+	<0.0001
HE1	Keine Tendenz	0.434	-	0.0133
MV1	+	<0.0001	+	<0.0001
NI1	Keine Tendenz	0.3827	-	0.0189
SN1	Keine Tendenz	0.572	-	0.0323
SN2	Keine Tendenz	0.3551	-	0.0134
ST1	+	0.0012	+	0.0087
TH1	+	<0.0001	+	<0.0001

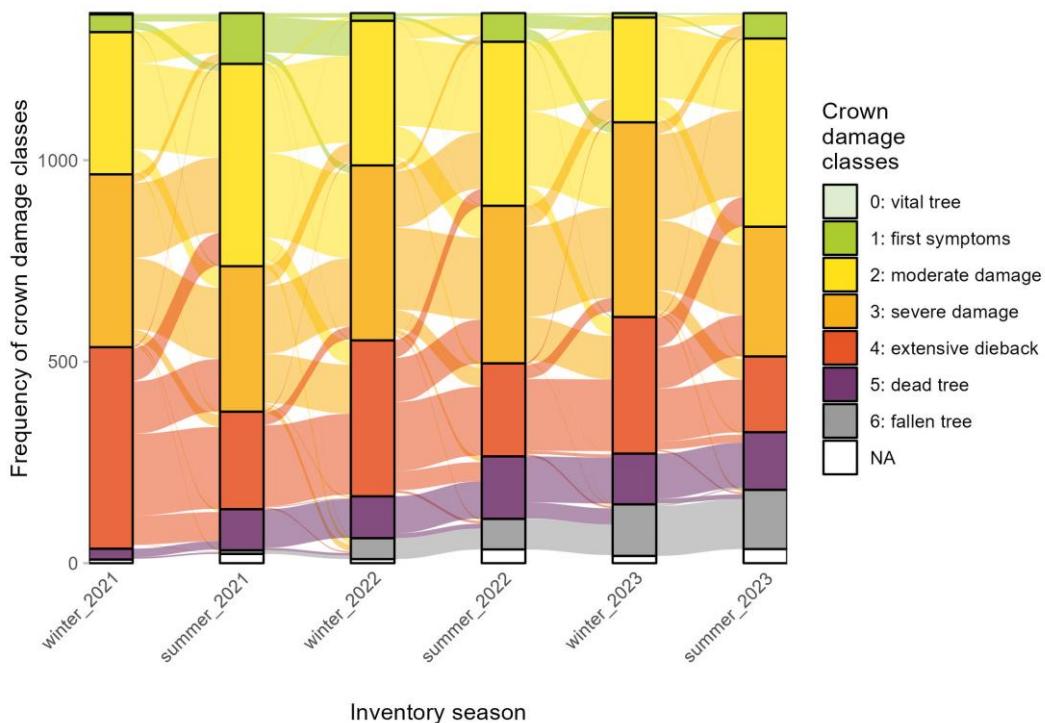


Abbildung 4: Paretdiagramm der Bonituren aller IBF von Winter 2021 bis Sommer 2023. Die Boniturstufen sind in unterschiedlichen Farben dargestellt. (übernommen aus Fuchs et al. 2024, eingereicht)

Der Zusammenhang zwischen Kronenverlichtung (Blattverlust) und Kronenzustand wird in Abbildung 5 verdeutlicht. Die Boniturstufe im Sommer ließ sich bereits am Blattverlust gut ablesen. Auch die feine Graduierung in 5-Prozent-Schritten erwies sich als sinnvoll. Anzumerken sei hier aber, dass die Boniturstufe im Sommer per Definition von der Kronenverlichtung abhängt.

Die detaillierten Boniturdaten zeigten außerdem, dass Wasserreiser am Stamm eher auf bestimmten Flächen vermehrt auftraten, aber vor allem ab Boniturstufe 4 häufiger zu finden sind. Wasserreiser in der Krone hingegen sind auf allen Flächen mit zunehmender Schadstufe häufiger geworden. Besonders viele Wasserreiser an Stamm und Krone zeigten Eschen auf der Fläche BW1, wo hingegen auf der IBF TH1 Wasserreiser in der Krone relativ selten auftraten.

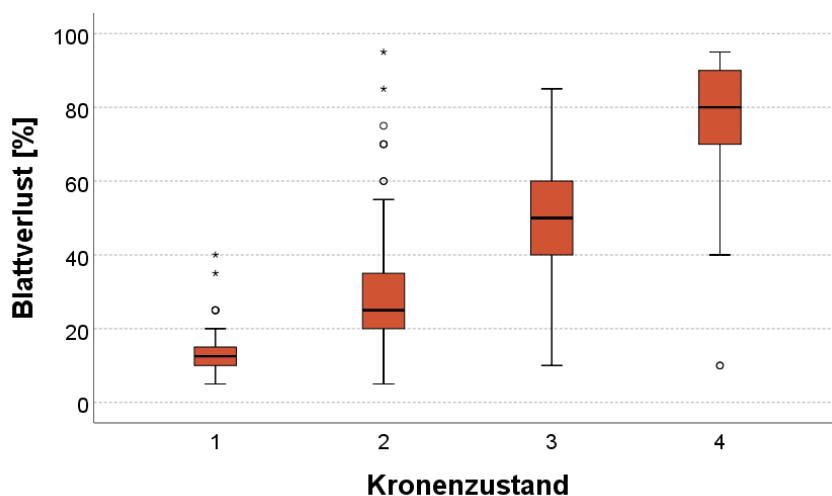


Abbildung 5: Beziehungen zwischen dem Blattverlust und dem Kronenzustand. Stufe 0 fehlt, da der Blattverlust erst Sommer als eigenständige Größe eingeführt wurde und es auf den IBF keine Eschen dieser Stufe gab. Stufe 5 und 6 wurden außenvorgelassen, da hier bis auf spezielle Individuen (z. B. keine Krone, aber Ausbildung von Wasserreisern am Stamm) 100 % Blattverlust Voraussetzung für diese Stufen sind.

4. Fernerkundung

4.1 Anpassung des Interpretationsschlüssels zur Identifizierung von Eschenbeständen und deren Vitalität

An der Entwicklung des Interpretationsschlüssels waren in sehr enger Kooperation LFoA, NW-FVA und FVA-BW beteiligt.

Vor Beginn der Entwicklung eines Interpretationsschlüssels zur Identifizierung von Eschenbeständen und deren Vitalität erfolgte nochmals die Sichtung der Literatur bezüglich bisher vorhandener Interpretationsschlüssel für die Ansprache sowohl vom Boden aus als auch über Luftbilder. Ein Interpretationsschlüssel für die stereoskopische Auswertung von Luftbildern zur Einstufung der Kronenverlichtung von Eschen lag bis zu diesem Zeitpunkt noch nicht vor. Zur terrestrischen Ansprache der Vitalität von Eschen hingegen wurden Literaturquellen gefunden. Diese wurden als Grundlage kritisch begutachtet, in einer Übersicht gebündelt und die wichtigsten Merkmale gegenübergestellt.

Als weitere Arbeitsgrundlage wurden die vorhandenen Interpretationsschlüssel für die stereoskopische Auswertung von Luftbildern herangezogen. Diese Schlüssel beziehen sich vor allem auf Fichte, Tanne, Kiefer, Buche und Eiche (AFL 1998²⁴, 1999²⁵, 2003²⁶, 2012²⁷, European Commission 1992²⁸, VDI²⁹). Die verwendete Terminologie und die Beschreibung der Merkmale wurde auf den zu erstellenden Eschenschlüssel übernommen.

Der bisher in Mecklenburg-Vorpommern verwendete Luftbildinterpretationsschlüssel der Esche bildete die Basis für den neuen Vitalitäts- und Interpretationsschlüssel aus Luftbildern. Dieser wurde für die jährliche Vitalitätsansprache der Eschen aus Luftbildern im FoA Schuenhagen (Revier Lendershagen) in den Jahren 2009 – 2019 entwickelt und ist durch die Aufnahmen und Auswertungen vom GFZ Tereno Kranprojekt Drönnewitz in den Jahren 2012 – 2019 ergänzt worden. Es lagen die terrestrischen Ansprachen mit Fotos, sowie die Luftbildansprache vor. Für die Fläche Drönnewitz waren darüber hinaus noch die Aufnahmen aus der Krangondel verfügbar.

Die Projektpartner NW-FVA und FVA-BW testeten diesen Schlüssel mit Hilfe des vom LFoA zur Verfügung gestellten Datenmaterials. Nach zahlreichen Abstimmungen, Corona-bedingt ausschließlich per E-Mail, Telefon und zahlreichen Online-Meetings, konnte der fertige Interpretationsschlüssel allen Projektpartnern von FraxMon im Juni 2021 vorgestellt werden. Nach den Befliegungen der IBF im Jahr 2021 wurde dieser Schlüssel anhand der neuen Luftbildaufnahmen getestet. Es erfolgte nach Abschluss dieser Arbeiten eine weitere Überarbeitung des Luftbildinterpretationsschlüssels.

Die Abbildung 6 zeigt den tabellarischen Teil des entwickelten Interpretationsschlüssels für die Sommeransprache der Gemeinen Esche mittels der 3D-Auswertung digitaler Luftbilder.

Ein weiterer Aufgabenschwerpunkt bildete die Entwicklung eines Schlüssels zur Identifizierung von Eschen und Eschenbeständen. Die Identifizierung verschiedener Laubgehölze im Luftbild ist sehr schwierig. Darum wurde sich auf die Frage konzentriert: Wie unterscheidet sich die Gemeine Esche im Luftbild von anderen Baumarten?

Grundlage waren hier vorhandene Luftbilder und terrestrische Informationen der Landesforst MV, die auch den Projektpartnern zur Verfügung gestellt wurden.

²⁴ Arbeitsgruppe Forstlicher Luftbildinterpreten (AFL) (1998): Luftbild-Interpretationsschlüssel, Bestimmung der natürlichen Altersklasse von Waldbeständen im Color-Infrarot-Luftbild. LÖBF-Mitteilungen Nr. 1/1998, Seiten 45-50.

²⁵ Arbeitsgruppe Forstlicher Luftbildinterpreten (AFL) (1999): Luftbild-Interpretationsschlüssel II, Bestimmung der natürlichen Altersklassen und der Baumarten von Waldbeständen im Color-Infrarot-Luftbild. LÖBF-Mitteilungen Nr. 4/1999, Seiten 51-56.

²⁶ Arbeitsgruppe Forstlicher Luftbildinterpreten (AFL) (2003): Luftbildinterpretationsschlüssel - Bestimmungsschlüssel für die Beschreibung von strukturreichen Waldbeständen im Color-Infrarot-Luftbild. Landesforstpräsidium Sachsen Schriftenreihe Nr.26 ISBN 3-932967-29-3

²⁷ Arbeitsgruppe Forstlicher Luftbildinterpreten (AFL) (2012): Das digitale Luftbild – Ein Praxisleitfaden für Anwender im Forst- und Umweltbereich; Beiträge aus der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt Band 7

²⁸ EUROPÄISCHE KOMMISSION (Hrsg.) (1992): Anwendung der Fernerkundung zur Beurteilung des Gesundheitszustandes der Wälder. Verlag Walpot S. A. Belgien.

²⁹ VDI (Verein deutscher Ingenieure) (1993): VDI 3793 Messen von Vegetationsschäden am natürlichen Standort, Blatt 1 Verfahren der Luftbildaufnahmen mit Color-Infrarot-Film, Blatt 2 Interpretationsschlüssel für die Auswertung von CIR-Luftbildern zur Kronenzustandserfassung von Nadel- und Laubgehölzen; Fichte, Buche, Eiche und Kiefer.

Interpretationsschlüssel für die Sommeransprache der Gemeinen Esche bei der 3D-Auswertung digitaler Luftbilder					
Der Beurteilungsbereich ist die gesamte luftbildsichtbare Krone!					
Das Hauptkriterium ist die Kronenverlichtung!!!					
Schadstufe	Kronenverlichtung	Gestaltmerkmale (Luftbild)		Fotos	
		Type	Merkmale	Kran	terrestrisch
0	0-10 %	Kronenrand	Kronenrand scharf abgegrenzt	Bildquelle: LfDA MV - Nr. 207 [2016] im Schlosspark Ludwigsburg	
		Struktur	voll belaubte dichtbepackte Krone	Esche Nr. 86 (2016, 2017) in Drönnewitz	
		Totäste	keine Totäste		
1	11-25 %	Kronenrand	Kronenrand scharf abgegrenzt		
		Struktur	leichte Netzstrukturen zwischen den Kronenelementen (Blattbüschel / Ballen) kein Kroneneinblick		
		Totäste	keine Totäste		
2	26-50 %	Kronenrand	Kronenrand mit Einbuchtungen		
		Struktur	vereinzelte Löcher keine Starkäste im Kroneninneren erkennbar Ballenstruktur noch erkennbar	Esche Nr. 59 (2019) in Drönnewitz	
		Totäste	keine Totäste ggf. abgestorbene Zweigspitzen als helle Flecken sichtbar		
3	51-75 %	Kronenrand	Kronenrand zerfranst		
		Struktur	deutlicher Kroneneinblick einzelne Äste im Kroneninneren erkennbar, aufgrund von Wasserrisiken Borke der Äste jedoch nicht immer sichtbar		
		Totäste	Totäste erkennbar	Esche Nr. 88 (2019) in Drönnewitz	
4	76-99 %	Kronenrand	Kronenrand stark zerfranst bis aufgelöst		
		Struktur	durchsichtige Krone Astsystem erkennbar		
		Totäste	Totäste dominieren die Krone	Esche Nr. 413 (2019) in Drönnewitz	
5	100%	Kronenrand, Struktur und Totäste	Astsystem deutlich erkennbar Krone besteht ausschließlich aus Totästen Baum anscheinend abgestorben	Esche Nr. 317 (2015, 2016) in Drönnewitz	

Abbildung 6: Tabellarischer Interpretationsschlüssel für die Sommeransprache der Krone der Gemeinen Esche mittels 3D-Auswertung digitaler Luftbilder.

Anhand der vorhandenen Luftbildaufnahmen wurden ein Baumartenkatalog, ein Bestimmungspfad (Abbildung 7), eine Übersicht zur Mischungshäufigkeit der beschriebenen Baumarten mit der Esche und eine tabellarische Einschätzung der Anwendbarkeit in Abhängigkeit der Kronenverlichtung erarbeitet. Der Baumartenkatalog beinhaltet 16 verschiedenen Baumarten mit Luftbildern. Um die Erkennung der Baumart zu vereinfachen wurde ein Bestimmungspfad erarbeitet. Dieser beinhaltet die Merkmale, nach dem sich bestimmte Baumartengruppen und am Ende einzelne Baumarten identifizieren lassen. Da diese Merkmale nicht immer eindeutig zu erkennen sind, was auch an der Bildqualität liegen kann, wurde eine Tabelle erarbeitet, die darstellt, mit welchen Baumarten die Esche am häufigsten vergesellschaftet ist (Mischungshäufigkeit). Diese Einteilung dient dem Beurteiler als Hilfestellung, um von vornherein bestimmte Baumarten ausschließen zu können.

Ein großes Problem bei der Identifizierung der Esche und auch der anderen Baumarten ist der jeweilige Vitalitätszustand. Zur Vereinfachung wurde im ersten Schritt von relativ gesunden Bäumen ausgegangen und deren Unterscheidungsmerkmale in der Luftbildinterpretation herangezogen. Der Bereich der Gültigkeit

(Schadstufen) wurde in der zuvor genannten Tabelle mit dargestellt. Der Gültigkeitsbereich bezieht sich auf die Kronenverlichtung des begutachteten Baumes. Damit werden die Grenzen der Anwendbarkeit des Bestimmungspfades gekennzeichnet. Dieser wurde erprobt und anschließend wurde der Identifizierungspfad durch zahlreiche Zusammenkünfte optimiert und abgestimmt.

Für beide Schlüssel existiert zudem eine textliche Beschreibung mit detaillierten Erläuterungen zur Vorgehensweise bei der stereoskopischen Auswertung. Beide Schlüssel (inklusive der textlichen Beschreibung) wurden in die neue Auflage der FNR-Veröffentlichung „ESCHENTRIEBSTERBEN – Kriterien zur Schadensbonitur an Eschen“ integriert und stehen zur Veröffentlichung an.

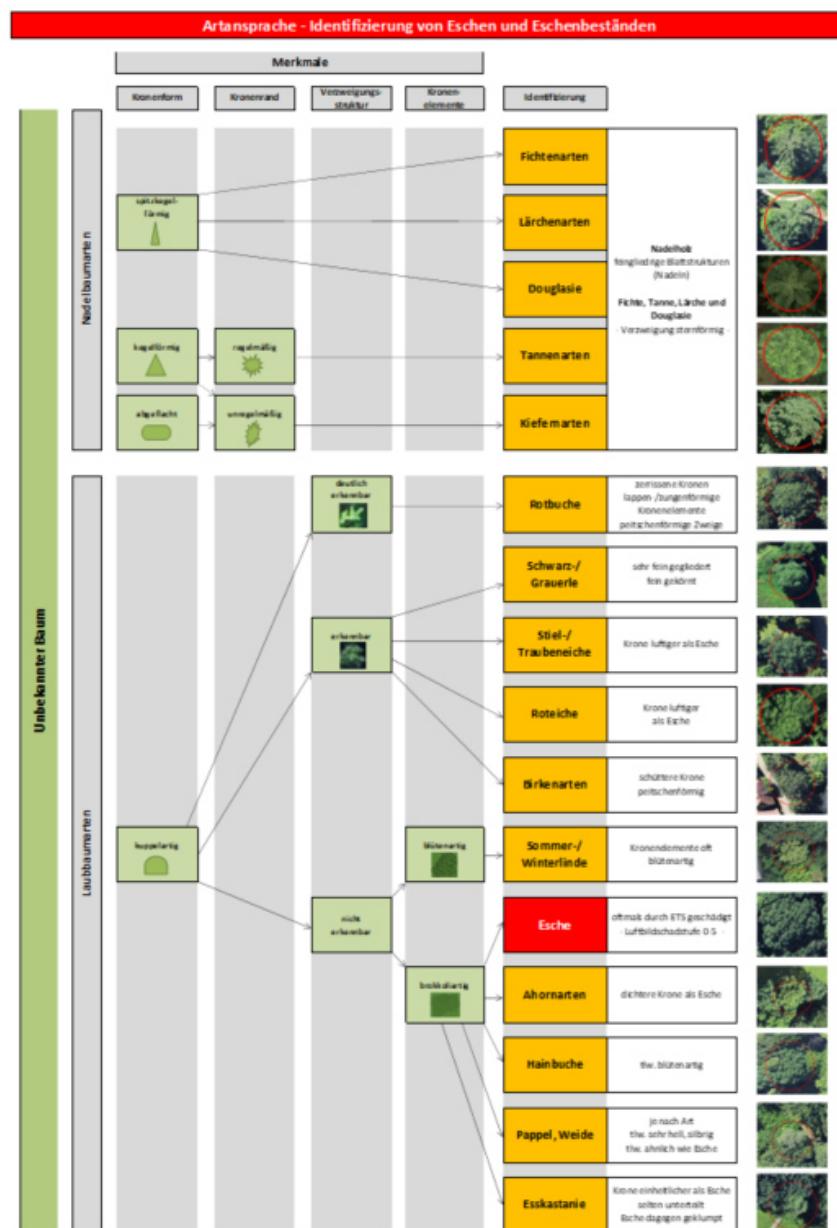


Abbildung 7: Bestimmungspfad zur Ansprache und Identifizierung von Eschen und Eschenbeständen.

4.2 Methodenentwicklung für eine bundesweite Modellierung von Eschenpotentialflächen

AP 2.2 zielt auf die Entwicklung von Methoden, die es ermöglichen, potentielle, flächige Eschenvorkommen bundesweit mit Hilfe von Modellierungsverfahren zu erfassen. Hauptverantwortlich für die Bearbeitung war die FVA-BW mit Unterstützung durch NW-FVA und LFoA MV.

Die Verfügbarkeit von flächigen Standortdaten wurde untersucht. Dabei konnte auf Erkenntnisse aus dem ebenfalls FNR-getragenen Projekt F³ – Flächendeckende Fernerkundungsbasierte Forstliche Strukturdaten³⁰ aufgebaut werden. Ein deutschlandweit einheitlich und flächendeckend verfügbarer Datensatz mit Bezug zu

³⁰ <https://www.waldwissen.net/de/technik-und-planung/waldinventur/f3-fernerkundungsbasierte-walddaten> [letzter Zugriff 21.09.2023].

Standortinformationen ist die Kartierung der potentiellen natürlichen Vegetation (pnV)³¹. Eine genauere Untersuchung der Datenstruktur ergab, dass sich die Daten nicht für eine direkte Verwendung in einem Modellierungsprozess eignen. Stattdessen wurde ein Prozess entwickelt, der die Informationen aus der pnV-Kartierung nutzt, um die Fläche für die Modellierung auf solche Gebiete zu beschränken, auf denen ein Vorkommen der Esche überhaupt möglich ist. Hierfür wurden die ausführlichen Beschreibungen^{32, 33} zu den Kartierungseinheiten analysiert und gutachterlich, basierend auf den bekannten Standortsansprüchen von Eschen³⁴, die Einheiten bestimmt, die aufgrund der standörtlichen Verhältnisse ein Vorkommen von Eschen ausschließen.

Für folgende Kartiereinheiten wird ein Eschenvorkommen ausgeschlossen: A11, A21, A22, B10, B20, B21, C10, C11, C12, C13, C21, C22, C23, C24, C25, C26, D11, D12, D13, D21, D22, D23, D24, D33, E33, F13, F14, G11, G25, H10, H20, H21, H22, H24, H30, H31, H32, H33, H34, H35, H36, J10, J11, J12, J14, J15, J16, J17, K20, K22, L13, L22, L28, L29, L31, L38, L53, L57, L58, L59, L60, L61, L30T, L31T, L35T, L49T, L61T, L71, L74, N26, P10, P11, P12, P13, P14, P20, P21, P22, P23, Q11, R12, R13, R14, R21, S11, S12, S21, S40, T11, T21, T22, U10, V10, W1, W5, Y1

Eine weitere Reduktion der Flächen, auf denen Eschen möglicherweise vorkommen, lässt sich durch die Anwendung von Wald- und Nadelwaldmasken erreichen, die üblicherweise flächendeckend in den einzelnen Bundesländern vorliegen. Entsprechende deutschlandweit flächendeckend vorliegende Datensätze sind das Digitale Basis-Landschaftsmodell (Basis-DLM)³⁵, aus dem eine deutschlandweite Waldmaske extrahiert werden kann, und die Copernicus „Dominant Leaf Type“-Kartierung³⁶ zur Extraktion einer Nadelwaldmaske.

Die Restflächen (Eschenpotentialflächen) geben noch keinen Hinweis auf tatsächliches Eschenvorkommen, grenzen das Suchgebiet jedoch stark ein. Eine weitere Verfeinerung des Suchgebiets wurde mit der Erstellung statistischer Modelle, die Sentinel-2-Satellitendaten sowie Gelände- und Vegetationshöhenmodelle nutzen, angestrebt. Um Sentinel-2-Satellitendaten für die großflächige Modellierung von potentiell Eschenvorkommen nutzen zu können, müssen diese mittels geeigneter Vorprozessierungsmethoden aufbereitet werden. Hierzu gehören eine atmosphärische Korrektur, eine topografische Korrektur sowie eine Ko-Registrierung, die den räumlichen Versatz einzelner Satellitenszenen zueinander ausgleicht. Außerdem müssen Wolken sowie Wolkenschatten detektiert und die hierdurch beeinflussten Flächen von der weiteren Prozessierung ausgeschlossen werden. Verfahren der Vorprozessierung, die für forstliche Anwendungen optimiert wurden, existierten bereits an der FVA und NW-FVA und wurden in den Workflow zur Modellierung potentieller Eschenvorkommen integriert.

Des Weiteren wurden Anforderungen an die Referenzdaten und Verfahren zu deren Aufbereitung definiert. Die Referenzdaten müssen tatsächlich bekannte Eschenvorkommen geografisch verorten. In Forschungsprojekten zur fernerkundungsbasierten Baumartendetektion werden hierfür häufig Forsteinrichtungspolygone verwendet, weshalb auch bei der Definition der Anforderungen an die Referenzdaten und deren Aufbereitung Forsteinrichtungspolygone als Datenquelle im Fokus standen. Um die Einflüsse anderer Baumarten auf die spektrale Signatur zu minimieren, sollten nur solche Forsteinrichtungspolygone verwendet werden, in denen der Eschenanteil mindestens 80 % beträgt. Zusätzlich sollten weitere Störeinflüsse reduziert werden, indem Randbereiche von Eschenflächen (z. B. entlang von Bestandesgrenzen, Wegen und Straßen) nicht bei der Referenzdatenerstellung berücksichtigt werden. Anschließend wurden die auf diese Weise identifizierten Eschenflächen mit den Sentinel-2-Satellitenbilddaten verschnitten, um die Spektralwerte zu extrahieren. Da das Bestandesalter einen Einfluss auf die spektrale Signatur einer Baumart haben kann, wurden zusätzlich zu den Spektralwerten den Referenzdaten auch Höhenwerte aus einem Vegetationshöhenmodell hinzugefügt, die einen Hinweis auf das Alter geben können. Der resultierende Datensatz wurde in zwei Schritten um mögliche Ausreißer reduziert, um den Einfluss von Datenartefakten sowie beigemischten Baumarten auf die spektrale Signatur der Eschen zu vermindern. Dies geschah mit Hilfe des Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), der Hinweise auf bereits sehr kranke oder abgestorbene Vegetation gibt, und mittels der R-Funktion ‚Isolation Tree‘. Neben den Eschen-Referenzdaten wurde für die Modellierung auch ein vergleichbar großer Datensatz von nicht-Eschen-Referenzdaten benötigt, der analog zu den Eschen-Referenzdaten hergeleitet wurde, jedoch unter Nutzung von Forsteinrichtungspolygone, in denen keine Eschen vorkommen.

³¹ Bundesamt für Naturschutz, o. J.: Karte der potentiellen natürlichen Vegetation Deutschlands (PNV). Verfügbar online: <<https://www.floraweb.de/lebensgemeinschaften/vegetationskarte.html>> [letzter Zugriff 21.09.2023]

³² Suck, R., Bushart, M., Hofmann, G., Schröder, L., 2013. Karte der Potentiellen Natürlichen Vegetation Deutschlands - Band II Kartierungseinheiten. BfN-Skripten 349. Verfügbar online <https://www.floraweb.de/pdf/skript349_band2.pdf> [letzter Zugriff 21.09.2023].

³³ Suck, R., Bushart, M., Hofmann, G., Schröder, L., 2014. Karte der Potentiellen Natürlichen Vegetation Deutschlands - Band I Grundeinheiten. BfN-Skripten 348. Verfügbar Online <https://www.floraweb.de/pdf/skript348_band1.pdf> [letzter Zugriff 21.09.2023].

³⁴ Ebert, H.-P., 2002. Die Behandlung von nicht häufig vorkommenden Baumarten (Nebenbaumarten). Fachhochschule Rottenburg, Hochschule für Forstwirtschaft, 1. Aufl. 1998. 4. Bearb. Auflage 2002, 235 S. (Schriftenreihe der Fachhochschule Rottenburg, Hochschule für Forstwirtschaft; 10).

³⁵ Bundesamt für Kartografie und Geodäsie, o. J.: Digitales Basis-Landschaftsmodell (Ebenen) (Basis-DLM). Verfügbar online: <<https://gdz.bkg.bund.de/index.php/default/digitale-geodaten/digitale-landschaftsmodelle/digitales-basis-landschaftsmodell-ebenen-basis-dlm-ebenen.html>> [letzter Zugriff 21.09.2023].

³⁶ Copernicus, o. J.: Dominant Leaf Type. Verfügbar online: <<https://land.copernicus.eu/pan-european/high-resolution-layers/forests/dominant-leaf-type/status-maps/dominant-leaf-type-2018?tab=metadata>> [letzter Zugriff 21.09.2023].

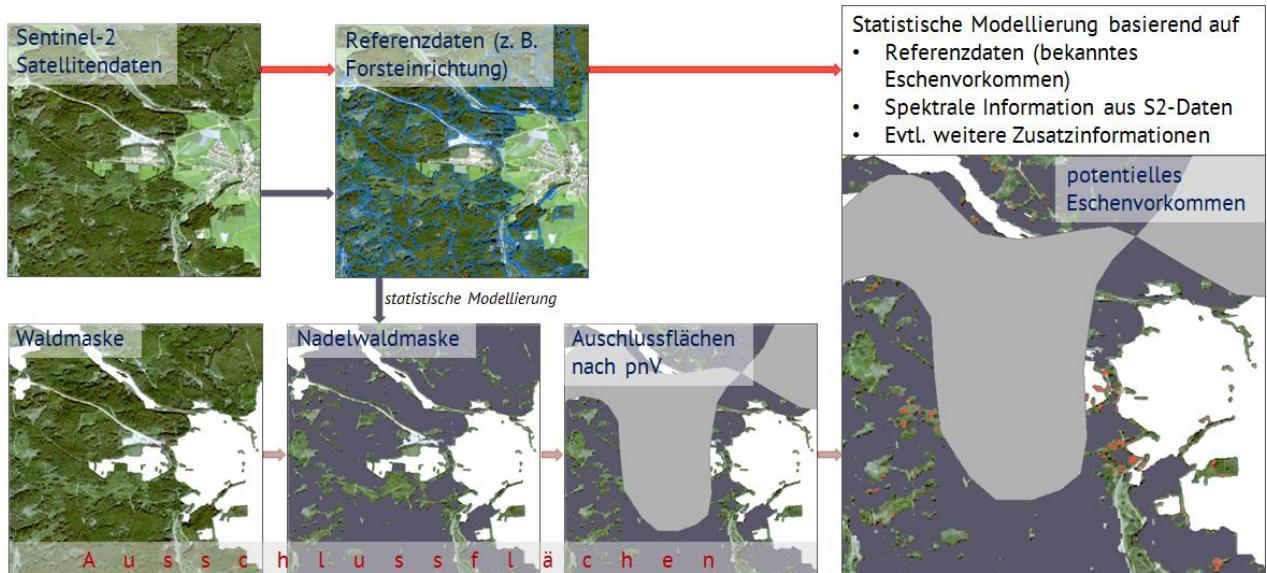


Abbildung 8: Workflow Eschenpotentialflächen und Modellierung tatsächliches Eschenvorkommen.

Zuletzt wurde ein Datensatz mit Prädiktoren zur An- (presence) und Abwesenheit (absence) von Eschen erfasst, in dem auch die Position jedes Punktes angegeben ist. Zu den Prädiktoren gehören die Spektralbandwerte für jede Jahreszeit, die Vegetationshöhe und das digitale Oberflächenmodell.

Als Modellierungsmethode wurde Maximum Entropy gewählt. Diese Methode bietet sich vor allem dann an, wenn die Referenzdaten sehr unausgeglichen sind und eine Unterrepräsentanz des Vorkommens einer Art besteht. Dies ist bei der Esche der Fall. Deshalb wurde angenommen, dass die Anwendung von Maximum Entropy die automatische Klassifizierung von Eschen auf Basis von Sentinel-2-Satellitendaten im Vergleich zu bereits durchgeföhrten, großflächigen Baumartenklassifikationen (siehe 2: Stand der Technik) verbessern könnte. Die Modellergebnisse sollen Hinweise auf tatsächliches Eschenvorkommen innerhalb der Eschenpotentialflächen liefern.

Die bewusste Auswahl der Maximum Entropy-Methode für die Modellierung röhrt von ihrer Fähigkeit her, komplexe, nicht-lineare Beziehungen zwischen den Vorhersagevariablen effektiv zu erfassen. Dies ist besonders bei der ökologischen Modellierung von zentraler Bedeutung, da die Beziehungen von einfachen linearen Mustern abweichen können. Darüber hinaus sind diese Modelle robust gegenüber Kollinearität innerhalb der Prädiktorvariablen, ein entscheidendes Merkmal bei der Verarbeitung korrelierter Spektraldaten. Das Modell liefert auch ein quantifizierbares Maß für den Beitrag und die Bedeutung der einzelnen Prädiktoren und erleichtert so die sorgfältige Auswahl der entsprechenden Spektraländer und Indizes. Maximum Entropy Modelle sind vielseitig einsetzbar und ermöglichen die Klassifizierung mit nur einer Klasse.

Ein entscheidender Aspekt des Modellierungsprozesses besteht darin, die Verzerrung des Datensatzes hin zu negativen Fällen zu beseitigen. Eine Strategie besteht darin, ein Modell mit Pseudo-„Absences“ (MPA) für das Training zu erstellen. Zur Bewertung der Leistung wird auch ein anderes Modell in Betracht gezogen, das sowohl „presence“ als auch „absence“ Daten (MA) für das Training verwendet. Bei der Bewertung werden „absence“-Daten für beide Modelle verwendet, was eine vergleichende Analyse ihrer Effektivität ermöglicht.

Die Auswahl der Prädiktoren erfolgte anhand einer Hauptkomponenten-Analyse (Principal Component Analysis; PCA), die auf jahreszeitlich getrennte Referenzdaten angewandt wurde. Die Ergebnisse führten zur Auswahl von acht Prädiktoren: Vegetationshöhe, dem digitalen Oberflächenmodell, ein Spektralband im roten Spektrum (Rotes Band 705 nm) für Frühling, Sommer und Herbst sowie der „normalized multiband drought index“ für Frühling, Sommer und Herbst.

Im MPA-Modell sind die Pseudo-Absences zufällige Pixel aus einem Raster mit mehreren Ebenen, wobei jede Ebene einen für das Modell ausgewählten Prädiktor darstellt. Dieses Raster enthält Zonen mit Mischwald und Laubwald sowie für Esche geeignete Gebiete aus der pNV-Karte. Pseudoabwesenheitspunkte sind Pixel mit unbekannten Informationen über das Vorhandensein oder Nichtvorhandensein der Esche.

Für die Kreuzvalidierung (cross-validation) wurde ein „blocked schema“ verwendet (Abbildung 9), bei dem die Daten in Blöcke unterteilt werden, die auf dem geografischen Gebiet der Präsenz basieren. Dieser methodische Ansatz berücksichtigt inhärente Muster oder Gruppierungen im Datensatz. Cluster sind in den Referenzdaten offensichtlich, und die block cross-validation stellt sicher, dass bei jeder Testiteration alle Datenpunkte innerhalb eines bestimmten Blocks im Trainings- oder Testsatz verbleiben, wodurch eine unbeabsichtigte Aufdeckung verwandter Informationen sowohl während der Trainings- als auch der Testphase verhindert wird. Dadurch wird das Risiko einer Überschätzung der Leistung des Modells verringert.

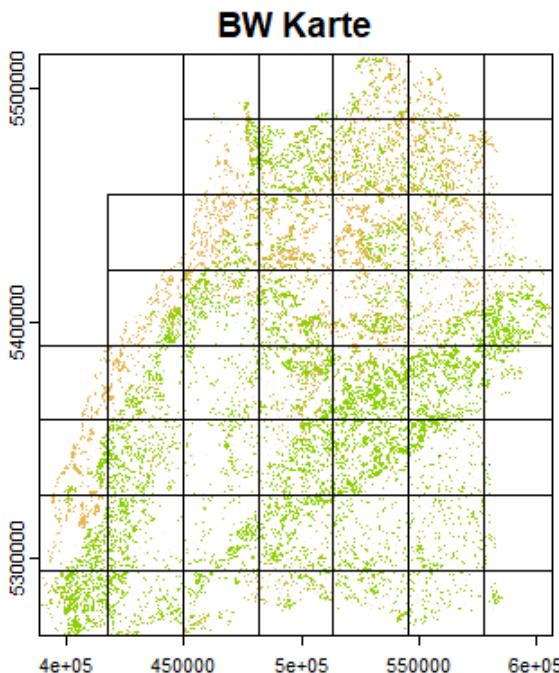


Abbildung 9: Blocks für Kreuzvalidierung in Baden-Württemberg.

Die Ergebnisse der MPA- und MA-Modelle zeigen bei den ausgewählten Bewertungsindizes, die für den Modellvergleich verwendet wurden, ähnliche Ergebnisse. Insgesamt ist die Modellgenauigkeit niedrig, was auf eine pessimistische Vorhersage der positiven Fälle hindeutet. Eine kritische Beobachtung ist, dass in diesem Modelltraining versäumt wurde, die Häufigkeit des Vorkommens der Eschen in den Daten zu berücksichtigen. Dies führte zu einer potenziellen Verzerrung (Unter- oder Überschätzung der positiven Klasse), wenn die Prävalenz im Testblock signifikant von der im Trainingsblock abweicht. Als Reaktion darauf wurden die Blöcke in einer zweiten Iteration auf der Grundlage der Prävalenz in fünf Gruppen eingeteilt: sehr niedrig (weniger als 1 %), niedrig (zwischen 1 % und 2,5 %), mittel (zwischen 2,5 % und 5 %), hoch (zwischen 5 % und 10 %) und sehr hoch (mehr als 10 %), je nach der Menge der Präsenzdaten in jedem Block.

Die Ergebnisse dieser zweiten Iteration verbesserten die Vorhersagen in Blöcken mit einer Prävalenz von mehr als 1 %. Die Vorhersagen für positive Fälle wurden jedoch weiterhin unterschätzt. Um dieses Problem zu beheben, wurden zusätzliche Referenzdaten zur Bewertung herangezogen, insbesondere Parzellen mit 75 % bis 50 % Eschen. Diese neuen Daten wurden in drei Chargen hinzugefügt: Die erste Charge umfasste Parzellen mit 75 % bis 70 % Esche, die zweite Charge enthielt Parzellen mit 75% bis 65% Esche und die dritte Charge umfasste Parzellen mit 75 % bis 50 % Esche. Diese Chargen ergänzten die bestehenden Anwesenheitsdatensätze in den Referenzdaten.

Die Einbeziehung der neuen Daten führte zu verbesserten Modellergebnissen und zu einer erhöhten Vorhersage von positiven Fällen (Abbildung 10 und Abbildung 11 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Es ist jedoch von entscheidender Bedeutung, dass die Daten keine genaue Aussage über das Vorhandensein oder Nichtvorhandensein einer bestimmten Baumart auf einer Parzelle zulassen; stattdessen liefern sie Informationen über die Zusammensetzung der Parzelle. Folglich liefern die vom Modell erstellten Vorhersagekarten keine direkten Informationen über das Vorhandensein von Eschen, sondern bieten eine Wahrscheinlichkeit mit unbekannter Unsicherheit, dass die Parzelle Eschen enthalten könnte, wenn man die Ähnlichkeit der spektralen Signatur mit Parzellen mit bestätigtem Eschenvorkommen berücksichtigt.

Für eine weitere Verbesserung des Modells könnte eine detailliertere Analyse von Vorteil sein, bei der Parzellen mit unterschiedlichem Eschenanteil kombiniert werden, insbesondere in kleineren und eingeschränkten Gebieten mit Eschenvorkommen. Leider ist die Untersuchung von Daten mit höherer Auflösung durch zusätzliche Modelle und Tests aufgrund von Zeit- und Kostenbeschränkungen im Rahmen des Projekts weiterhin eine Herausforderung.

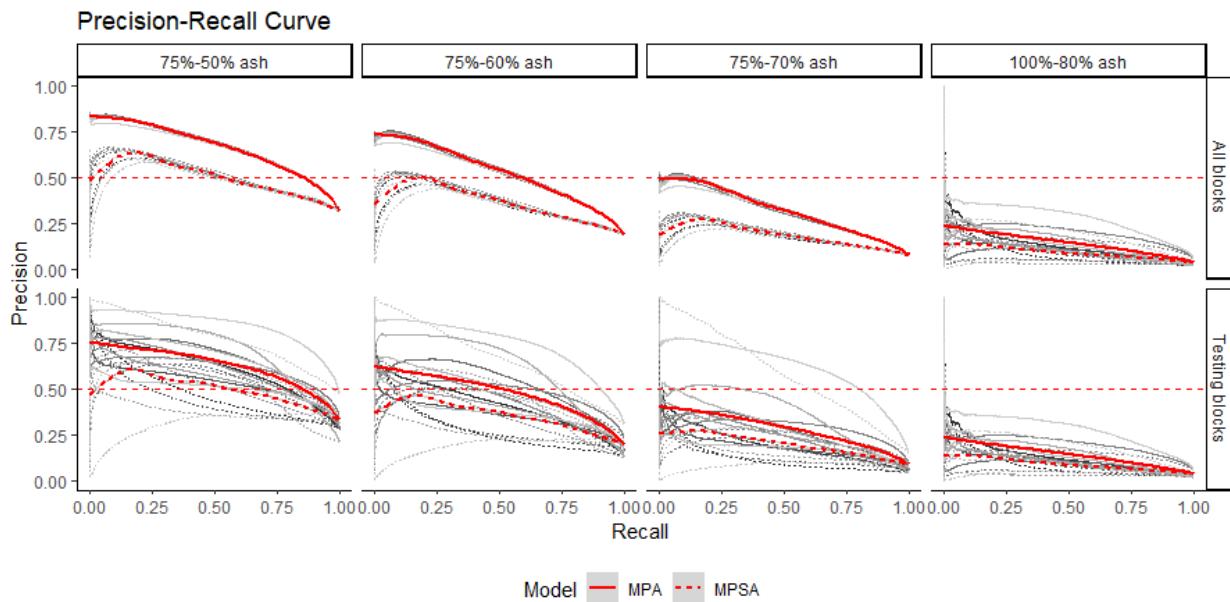


Abbildung 10: Nutzergenauigkeit (Precision) und Produzentengenauigkeit (Recall) aus der Block-Kreuzvalidierung in Baden-Württemberg für Validierungsdaten mit verschiedenen Mindestanteilen von Eschen.

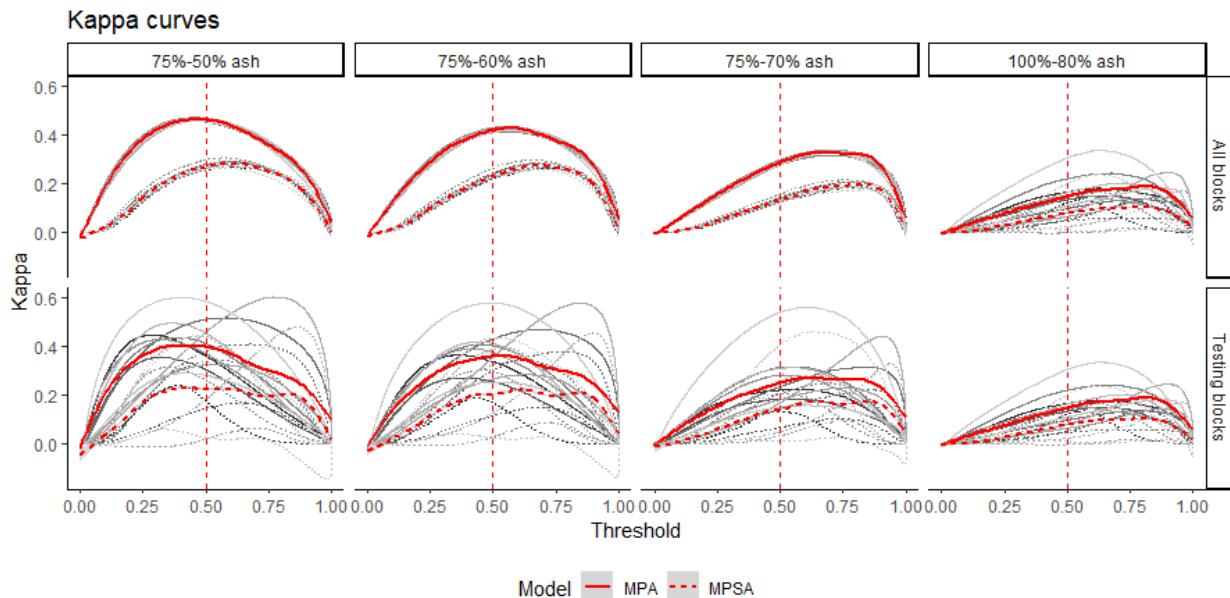


Abbildung 11: Kappa aus der Block-Kreuzvalidierung in Baden-Württemberg für Validierungsdaten mit verschiedenen Mindestanteilen von Eschen.

4.3 Modellierung der potentiellen Eschenflächen am Beispiel von drei Bundesländern

Ziel von AP 2.3 war die flächige Modellierung der potentiellen Eschenvorkommen in ausgewählten Wuchsgebieten der Bundesländer Baden-Württemberg, Niedersachsen und Mecklenburg-Vorpommern. Für diese drei Bundesländer liegen jeweils Wald- und Nadelwaldmasken vor. Zusammen mit den deutschlandweit verfügbaren Ausschlussflächen basierend auf der pnV (siehe AP 2.2) sind für diese Bundesländer die Ausschlussflächen bzw. Eschenpotentialflächen definiert.

Für die weitere Verfeinerung des Suchgebiets für tatsächliches Eschenvorkommen basierend auf Sentinel-2-Satellitendaten sowie Gelände- und Vegetationshöhenmodellen wurden Sentinel-2-Szenen beschafft. Dabei war das Ziel, möglichst Szenen aus dem Jahr 2017 zu nutzen, da erwartet wird, dass zu diesem Zeitpunkt das ETS etwas weniger weit fortgeschritten war als heute. Die zu identifizierenden Eschen weisen daher eine einheitlichere spektrale Signatur auf, was Ihre Erfassung erleichtert. Auch ist davon auszugehen, dass Forsteinrichtungsdaten und Satellitenbilddaten späterer Zeitpunkte nicht ohne weiteres miteinander kombiniert werden können, da die Extremjahre ab 2018 drastische Veränderungen der Waldvegetation aufgrund von

Sturm, Dürre etc. mit sich brachten, sodass die Forsteinrichtungsdaten vielfach an Aktualität verloren haben. In den Fällen, in denen es nicht möglich war, brauchbare Sentinel-2-Szenen (Bewölkung $\leq 10\%$) zu finden, wurde auf das Jahr 2018 ausgewichen. Für jede Sentinel-2-Kachel wurde je eine Szene aus Frühjahr, Sommer und Herbst ausgewählt und über den Copernicus Open Access Hub heruntergeladen. Anschließend wurden die Daten nach dem an der FVA-BW vorhandenen Workflow vorprozessiert. Eschen- und Nicht-Eschen-Referenzdaten wurden nach den in AP 2.2 festgelegten Anforderungen aus Forsteinrichtungspolygonen extrahiert und aufbereitet. Diese Datengrundlage wurde genutzt, um die Maximum Entropy Modelle in AP 2.2 zu erstellen. Wie sich dabei herausstellte, kann zum derzeitigen Stand die automatisierte, großflächige Erfassung von tatsächlichem Eschenvorkommen basierend auf Sentinel-2-Satellitendaten nicht mit ausreichender Verlässlichkeit durchgeführt werden. Bei der Auswertung der Daten für Baden-Württemberg zeigte sich, dass lediglich lokal gefittete Modelle für ein lokal abgegrenztes Gebiet Vorhersagen mit akzeptabler Genauigkeit liefern. Deshalb ist die Übertragung der entwickelten Maximum Entropy Modelle auf die drei Bundesländern zurzeit nicht sinnvoll.

4.4 Inventurdesign und Luftbildinterpretation

Die Erstellung des Inventurdesigns baut auf die Ergebnisse aus den AP 2.2 und 2.3 auf. Die bisher definierten Eschenpotentialflächen sind noch vergleichsweise grob und konnten bislang nicht weiter verfeinert werden. Aus so groben Flächen, ohne verlässlichen Hinweis auf tatsächliches Eschenvorkommen, ist die Entwicklung eines eigenen Inventurdesigns aufgrund der Unsicherheit, ob an den definierten Stichprobenspunkten tatsächlich Eschen vorkommen nicht effizient. Deshalb wurde die Nutzbarkeit des Stichprobensystems der Bundeswaldinventur (BWI) geprüft. Die Nutzung dieses Systems hat den Vorteil, dass an den Punkten bekannt ist, ob Eschen vorkommen. Für Baden-Württemberg beispielsweise wurden an 1037 Trakten bzw. 1398 Traktecken der BWI3 insgesamt 2786 Eschen aufgenommen, deren BHD ≥ 18 cm war, was nahelegt, dass diese Eschen aufgrund ihrer Größe auch in Luftbildern sichtbar sein sollten. Die aktuelleren Daten der BWI4 sind derzeit noch nicht veröffentlicht. Die Nutzung des bereits etablierten BWI-Stichprobensystems hilft die Zeit zu überbrücken, bis eine automatisierte Erfassung des tatsächlichen Eschenvorkommens ausreichend verlässliche Ergebnisse liefert und ein auf das Eschenvorkommen optimiertes Inventursystem aufgebaut werden kann. Bei weiterhin abnehmenden Eschenbeständen wird dies in der Zukunft nötig sein, da das Stichprobennetz der BWI zu grob ist, um belastbare Informationen über selten vorkommende Baumarten zu liefern.

4.4.1 Jährliche Befliegung der IBF in den Jahren 2020, 2021 und 2022

Luftbildbefliegungen der IBF wurden in den Sommermonaten der Jahre 2021 und 2022 durchgeführt. Aufgrund des verzögerten Projektstarts erfolgte in 2020 keine Befliegung.

Die Bedingungen für die Befliegung der 10 IBF wurden in Absprache mit den relevanten Projektpartnern abgestimmt und festgelegt. Im Jahr 2021 fand die Befliegung der 10 IBF aufgrund des wolkenreichen Sommers an mehreren Tagen statt und konnte erst am 6. September 2021 abgeschlossen werden. Die Luftbilddaten wurden vom Auftragnehmer prozessiert und am 8. November 2021 an die NW-FVA übermittelt.

Im Jahr 2022 waren die Wetterbedingungen besser und die Befliegung der IBF erfolgte an zwei unmittelbar aufeinanderfolgenden Tagen. Die Luftbilddaten wurden vom Auftragnehmer prozessiert und am 7. Oktober 2022 an die NW-FVA übermittelt. Aufgrund der teilweise problematischen Abgrenzung von Baumkronen, die sich bei der Auswertung der Befliegung 2021 zeigte, wurden nach Rücksprache mit der FNR für einen Teil der Flächen ergänzende Luftbildaufnahmen mit einer höheren räumlichen Auflösung von 4 cm angefertigt.

Alle Luftbilddaten wurden an der NW-FVA auf Qualität und Vollständigkeit geprüft und anschließend an die FVA weitergeleitet. Die Luftbilddaten stehen seither allen Partnern im Rahmen ihrer projektbezogenen Arbeiten zur Verfügung und werden auf Anfrage von der NW-FVA bereitgestellt.

Bildflugdaten 2021	Bildflugdaten 2022
21.07.2021: BY1, BW1, BW2	19.07.2022: HE1, BY1, BW1, BW2, TH1
24.07.2021: BB1, ST1, NI1	20.07.2022: SN1, BB1, ST1, NI1, MV1
27.07.2021: MV1	
04.09.2021: HE1	
06.09.2021: SN1, TH1	

4.4.2 Interpretation der aktuellen Luftbilddaten der IBF

Die im Jahr 2021 und 2022 auf 10 IBF durchgeführten Befliegungen wurden mit Hilfe der in AP 2.1 entwickelten Luftbildinterpretationsschlüssel zur Identifizierung von Eschen und zur Ansprache des Kronenzustands der Esche ausgewertet. Dabei wurde die Interpretationsarbeit in 2021 von FVA und NW-FVA zu gleichen Teilen durchgeführt. Zum Zwecke der Standardisierung der Auswertung wurden Teile der Eschenkronen von Bearbeitenden beider Einrichtungen interpretiert und miteinander abgeglichen. Die dabei gesammelten Erfahrungen in der Anwendung des Interpretationsschlüssels wurden genutzt, um diesen zu überarbeiten.

Auf der Fläche BY1 Monheim ergaben sich Schwierigkeiten bei der Zuordnung der im Luftbild sichtbaren Baumkronen zu den terrestrisch eingemessenen Stammfußpositionen. Dies hat die Auswertung der Luftbilddaten nicht beeinflusst, führte jedoch bei Auswertungen bzgl. der Vergleichbarkeit von terrestrischer Bonitur und Luftbildbonitur zu Problemen. Um Vergleiche auf Einzelbaumebene auf dieser IBF zu ermöglichen, müsste eine erneute und genauere Einmessung der Baumfußpositionen im Bestand oder eine manuelle Zuordnung vor Ort erfolgen.

Die Identifikation und Abgrenzung der Eschenkronen im Luftbild bei stark durchmischten, dichten Laubholzbeständen stellte sich als schwierig heraus. Die Bäume der Fläche TH1 Ettersberg in Thüringen konnten 2021 daher nicht ausgewertet werden. Die Stammverteilungspläne passten teilweise nicht zu den luftbildsichtbaren Baumkronen, was an schief stehenden Bäumen, stark ausladenden unregelmäßigen Baumkronen, der terrestrischen Aufnahme unsterdiger Bäume sowie an Ungenauigkeiten bei der Einmessung der Baumfußkoordinaten liegen kann.

Im Jahr 2023 wurde von der NW-FVA das Material aus den Befliegungen 2022 ausgewertet. Die 4 cm aufgelösten Luftbilddaten von 2022 erlaubten die im vorherigen Jahr nicht gelungene Abgrenzung der Bäume der Fläche TH1, die allerdings mit einem deutlich niedrigeren Genauigkeitsniveau als bei den anderen IBF im selben Jahr erfolgte.

Durch die Arbeit mit den 4 cm aufgelösten Luftbilddaten konnte man erkennen, dass diese Steigerung der Auflösung die Differenzierung der Eschen und die Abgrenzung der Baumkronen verbessern und die Genauigkeit der Bonitierung erhöht. Um die Vergleichbarkeit mit den anderen Bonitierungen nicht zu beeinträchtigen, wurden allerdings solche Bilder nicht systematisch für die Kronenansprache verwendet.

4.5 Weiterentwicklung der fernerkundungsbasierten Erfassung der Eschenvitalität

Aufnahmen der Waldbestände mit Hyperspektralkamerasystemen bieten in der Fernerkundung Potenzial zur Unterscheidung verschiedener Baumarten einerseits und verschiedener Vitalitätszustände innerhalb einer Baumart andererseits. Die Zielstellung des Arbeitspaketes bestand darin, anhand solcher räumlich und spektral hochaufgelöster Aufnahmen mit Methoden des maschinellen Lernens und statistischer Datenanalysen Indizes zur Erfassung der Esche und deren Vitalität abzuleiten. Die Bearbeitung von AP 2.5 erfolgte in Zusammenarbeit des Fraunhofer IFF und ThüringenForst.

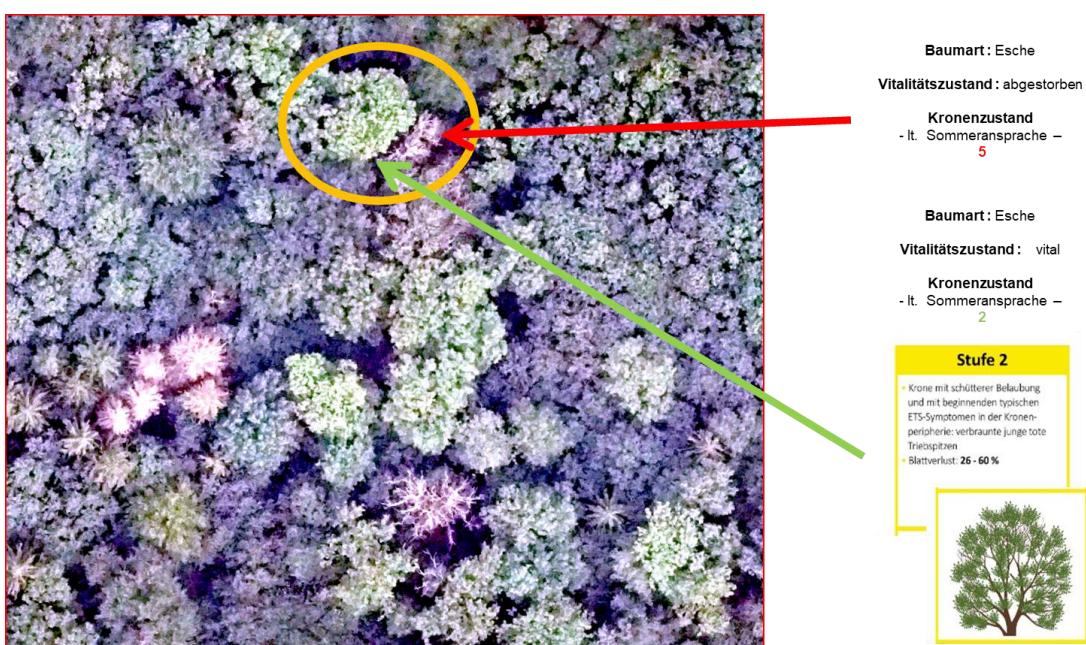


Abbildung 12: Beispiel für eine Kronenzuordnung anhand einer Hyperspektralbefliegung (TH1)

Es wurden vier Befliegungen (jeweils Frühjahr und Sommer, 2021 und 2022) mit Hyperspektralkameras im VNIR und SWIR Bereich und einer hochauflösenden RGB Kamera durchgeführt. Für die Bildauswertung wurde eine Verarbeitungspipeline entworfen und eingesetzt, welche die Radianzkorrektur, Ortho-rektifizierung, Boresight-Kalibrierung und Atmosphärenkorrektur umfasst. Die Kronenzuordnung der Bildpunkte erfolgte auf Grundlage des VNIR Hyperspektralbildes mit einem dafür entwickelten Algorithmus, der mit Hilfe von interaktiv eingezeichneten Baumkronen an Beispielbilder parametrisiert wurde. Die Kronenzuordnung der Reflektanzspektren einzelner Bildpunkte erlaubt eine Validierung (Leave-One-Out-Kreuzvalidierung) der ermittelten ML-Modelle sowohl über Baumkronen als auch über die einzelnen Flächen.

Es wurde über die drei Flächen eine gemittelte (klassen- und baumkronenbalancierte) Erkennungsrate der Eschen von 81% erzielt, wobei die flächenspezifische Erkennungsrate der Baumkronen von 69% in Schotten über 85% in Huy bis zu 90% in Mollenfelde schwankt. Für die Schadstufenerkennung wurden intensive Relevanzanalyse möglicher Indizes durchgeführt. Da die Schadstufen sich sehr inhomogen über die drei Flächen verteilen wurden die Flächen zusammengeführt und die Schadstufen in zwei Klassen (0-2 und 3-5) zusammengefasst. So ließ sich ein Kandidat für die Erkennung des Luftkronenzustandes mit der balancierten Genauigkeit von 83% ableiten, der nur zwei Wellenlängen 1450nm und 1650 im SWIR Bereich verwendet.

4.6 Auswertung von historischen Luftbildern der IBF

4.6.1 Datenbeschaffung historischer Luftbilder für die IBF

Die Beschaffung und Aufbereitung historischer Luftbilder der IBF wurde plangemäß durchgeführt (Meilenstein 6.1). Geeignete Luftbilddaten wurden über die Landesvermessungsinstitutionen der jeweiligen Bundesländer akquiriert, wobei hierzu in einigen Ländern intensiver Emailverkehr notwendig war, in anderen Ländern hingegen Daten über frei zugängliche Geodaten-Portale bequem in Eigenregie heruntergeladen werden konnten. Wie der Datenbezug, war auch die Qualität der bereitgestellten Daten sehr variabel. Teilweise mussten Daten nachgefordert werden, bzw. durch eigene Prozessierungen erzeugt werden, falls diese nicht verfügbar waren. Auch die in den Ländern verwendeten Datenformate unterscheiden sich, sodass die Datenformate harmonisiert werden mussten. Die räumliche Auflösung der unterschiedlichen historischen Bildsätze variierte zwischen 0,2 und 0,1 m.

Ziel der Datenbeschaffung war, für jede IBF vier historische Luftbildaufnahmen zu erhalten, deren Aufnahmezeitpunkt in der Vegetationsperiode (Mai - September) liegt. Im Laufe der Arbeit wurde allerdings festgestellt, dass Luftbildaufnahmen aus dem Monat Mai für die Auswertung ungeeignet sind, da sich aufgrund des zu diesem Zeitpunkt noch nicht immer vollständig abgeschlossenen Blattaustriebs nicht feststellen lässt, ob Kronenverlichtungen durch Vitalitätseinschränkungen bedingt sind oder durch den noch nicht komplettierten Blattaustrieb. Dasselbe gilt für die zweite Hälfte des Monats September, wo der herbstliche Blattfall ein ähnliches Problem verursacht. Die Akquise von vier historischen Luftbilddatensätzen konnte somit nur bei den IBF SN1 und BW1 erfolgen (Tabelle 2). Für den Fall von TH1 und BB1 waren keine geeigneten Aufnahmen zu finden. Für den Rest der IBF wurden zwischen einer und zwei Befliegungen gefunden, die die Bedingungen für ihre Integration in die Zeitreihe erfüllten.

Tabelle 2: Verfügbarkeit von historischen Luftbildaufnahmen der IBF. Aufnahmen vom 15. September bis 31. Mai wurden nicht berücksichtigt. Ob Aufnahmen aus dem Mai für die Auswertung geeignet sind, hängt davon ab, ob die Eschen zu diesem Zeitpunkt schon ausgetrieben haben. Dasselbe gilt für den herbstbedingten Blattverlust ab etwa Mitte September.

Befliegungszeitpunkte																		
Jahr		06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
Fläche	BB1																	
	NI1																	
	BW1																	
	BW2																	
	BY1																	
	TH1																	
	ST1																	
	SN1																	
	HE1																	
	MV																	

4.6.2 Auswertung von historischen Luftbildern der IBF und Auswertung der Luftbildinterpretation

Die Ergebnisse der Interpretation der Luftbilddaten aus den Jahren 2021 und 2022 wurde zusammen mit denen der historischen Luftbilder ausgewertet. Die Auswertung der historischen Luftbilder wurde wie geplant 2023 abgeschlossen. Jede digitalisierte Esche auf jeder IBF wurde mittels des Bilddatensatzes bonitiert. Somit konnte der zeitliche Verlauf der Entwicklung des Kronenzustands auf den unterschiedlichen IBF erfasst werden. Die Abbildung 13 zeigt exemplarisch die Kronenzustandsentwicklung auf der IBF Schotten in Hessen. Die Verschlechterung des Zustands der Eschenkronen im Laufe der Zeit zeigt sich sowohl in den zusammenfassenden Flächenstatistiken (Boxplots) als auch in den Karten zur räumlichen Visualisierung der Kronenzustände (Abbildung 14).

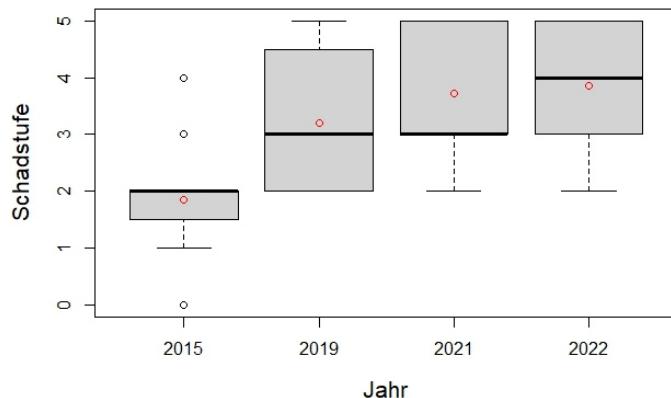


Abbildung 13: Zeitliche Entwicklung des Zustands der Eschenkronen auf der IBF Schotten in Hessen. Die Boxplots fassen die in Abbildung 14 dargestellten Schadstufen der Fläche zusammen und visualisiert anhand des steigenden Medians sowie der Mittleren Schadstufe (rote Punkte), dass sich der Kronenzustand des Eschenkollektivs im Laufe der Zeit verschlechtert hat.



Abbildung 14: Räumlich explizite Darstellung des Kronenzustands und seiner zeitlichen Entwicklung auf der IBF Schotten in Hessen. Die Farbkodierung der Kronen-Polygone zeigt eine deutliche Zunahme der Kronenschädigung.

Abbildung 15 visualisiert die Entwicklung der Kronenschädigungen aller IBF. Es wird deutlich, dass die Kronenschädigungen auf allen IBF zugenommen haben. Eine Ausnahme bildet die IBF ST1 Huy in Sachsen-Anhalt, die zwischen 2009 und 2013 eine leichte Erholung zeigt, und die IBF NI1 Mollenfelde in Niedersachsen, die zwischen 2016 und 2022 keine Verschlechterung der Situation zeigte. Eine Erklärung für die temporäre Erholung der Kronenzustände könnte eine Analyse der auf der IBF herrschenden Witterungsbedingungen liefern. Die Kurven zeigen ebenfalls, dass die Geschwindigkeit der Verschlechterung des Kronenzustands zwischen den IBF variiert. Hierbei können Standorteffekte, Klima, Altersstruktur der Eschenpopulation und Genotypen eine Rolle spielen. Für die Analyse der Rolle dieser Faktoren und ihren Interaktionen miteinander, zeigt sich das im Rahmen dieses Projekts entwickelte Verfahren zur luftbildgestützten Vitalitätsdiagnostik von Eschenkronen als gut geeignet. Es generiert zahlreiche und standardisierte bzw. miteinander vergleichbare Beobachtungen, die über große Flächen verteilt werden können und somit eine *systematische* Erfassung der Baumvitalität an unterschiedlichen Standorten mit unterschiedlichen Entwicklungsbedingungen für die Krankheit, für Bäume unterschiedlicher Genotypen und unterschiedlichen Alters schafft. Diese Information bildet sehr gute Voraussetzungen für die Charakterisierung der Kronenzustände und deren Verlauf in Deutschland anhand von Luftbildzeitreihen.

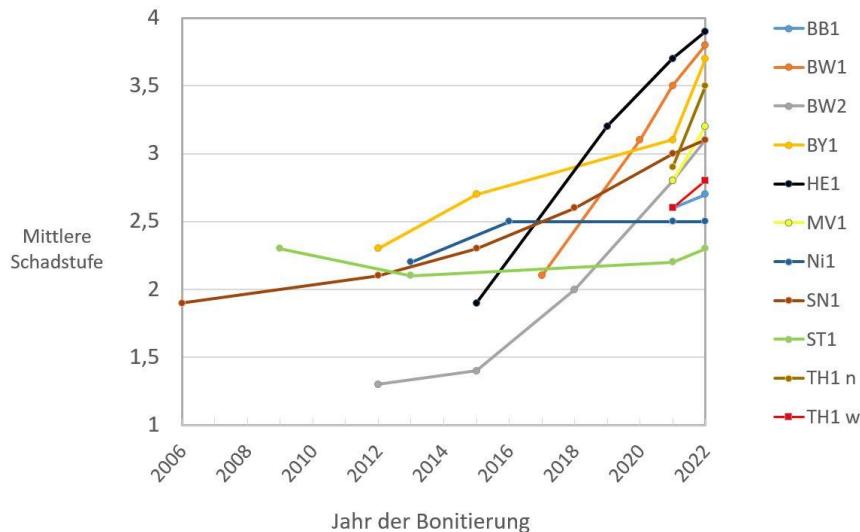


Abbildung 15: Entwicklung des Kronenzustandes aller IBF. Der Vitalitätsverlust in den unterschiedlichen Regionen zeigt unterschiedliche Fortschrittsgeschwindigkeiten.

Die Ergebnisse der luftbildbasierten Bonitierungen 2022 wurden mit denen der terrestrischen Bonitierung anhand der gemittelten Schadstufe pro IBF verglichen. Dabei ließ sich die Tendenz erkennen, dass die luftbildbasierten Bonitierungen die Schadstufe tendenziell schlechter einstuft als das terrestrische Verfahren. Lediglich die IBF BB1 und Ni1 zeigten diese Tendenz nicht (Abbildung 16). Gründe für die Abweichungen zwischen den Ergebnissen der Boniturverfahren können in den Kriterien liegen, die bei den Bewertungen verwendet wurden. Zum einen wurde die Baumkrone aus sehr unterschiedlichen Perspektiven betrachtet, zum anderen wurden verschiedene Baumerkmale zur Bewertung herangezogen werden. Die Stärke der terrestrischen Beurteilung liegt in der Detailliertheit der Informationen, die aufgenommen werden kann, während die Stärke der luftbildbasierten Beurteilung in der gleichzeitigen Wahrnehmung der Oberkrone vom selben Ort aus liegt. Die Bewertung aus der Luft ermöglicht auch den gleichzeitigen Vergleich der Situation verschiedener Kronen auf einer Parzelle vom selben Standpunkt aus, was dem Operator einen wertvollen visuellen Bezugsrahmen während des Bewertungsprozesses bietet. Bei Betrachtung einer Zeitreihe kann der zeitliche Verlauf der Kronenentwicklung weitere wichtige Anhaltspunkte für eine solide Einstufung des aktuellen Kronenzustands liefern.

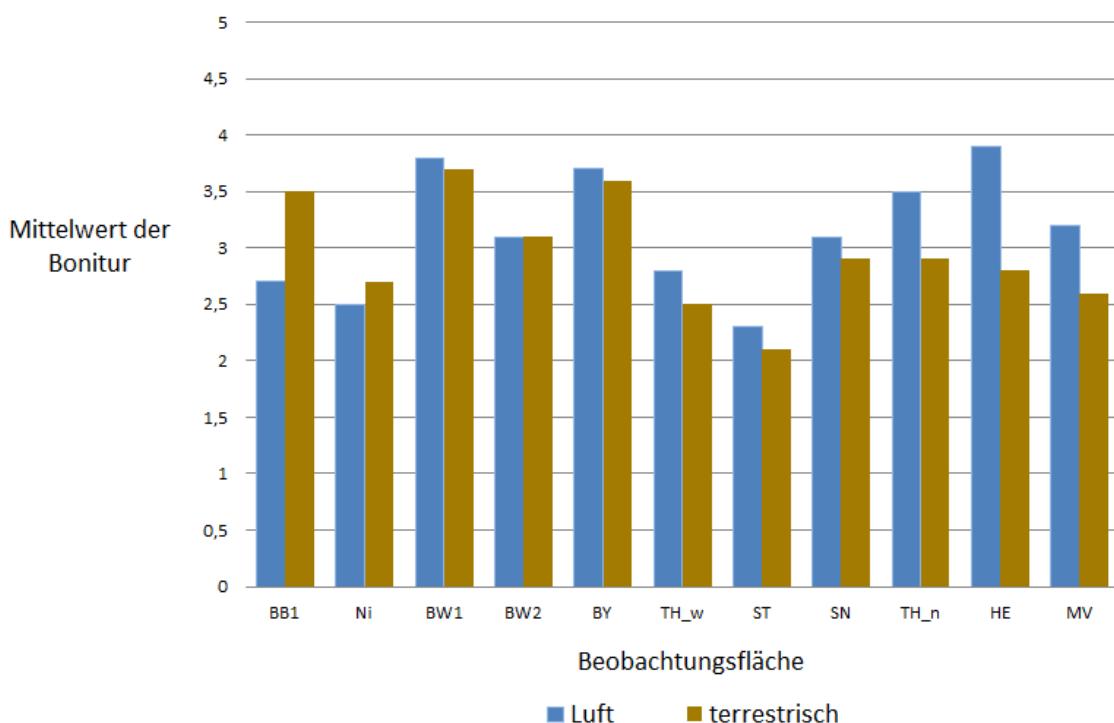


Abbildung 16: Vergleich zwischen bodengestützten und luftbildbasierten Bonitierungen für das Jahr 2022. Für jede IBF wurde die mittels beider Verfahren erhobene mittlere Schadstufe berechnet und zum Vergleich gegenübergestellt.

5. Phänologie, Polleneigenschaften und Chlorophyll (SPAD-Werte)

Die Beobachtung der Blattentwicklung im Frühjahr und im Herbst auf den drei bayerischen IBF erfolgte in einem regelmäßigen und kurzen zeitlichen Abstand an je 50 Bäumen. Zu Beginn der Blüte fand die Sammlung der Pollen zur Untersuchung ihrer Viabilität statt. Außerdem wurden zu sechs Terminen über die Vegetationsperiode verteilt Chlorophyllmessungen (SPAD-Werte) an 30 Bäumen durchgeführt. Zur Abschätzung des Infektionsdruckes wurden auf zehn IBF im Jahr 2021 und 2022 Sporenfallen aufgestellt, die Filter wöchentlich gewechselt und im Labor biochemisch (qPCR) untersucht. Die Zählung der Pilzabundanz fand jeweils im Sommer statt. Zusätzlich wurde die Phänologie auf den nicht-bayerischen IBF zu einem Zeitpunkt im Frühjahr und in Herbst an je 30 Eschen aufgenommen; die Blattchlorophyllwerte dieser Bäume zu einem Termin im Juli.

5.1 Frühjahrs- und Herbstphänologie

5.1.1 Ergebnisse der bayerischen IBF

Die regelmäßigen phänologischen Beobachtungen auf den drei bayerischen IBF lieferten neue Erkenntnisse über die Blattentwicklung und den Blattverlust der Esche und deren Eignung als Resistenzindikatoren. Dabei hat sich gezeigt, dass sich der vollständige Blattverlust (BBCH 97) als Indikator für eine mögliche Resistenz (resp. Schädigung) der Esche gegenüber dem Eschentreibsterben gut eignet. Geschädigte Bäume mit der Bonitur 3 und 4 verlieren die letzten Blätter früher als weniger geschädigte Eschen mit einer Bonitur von 1 und 2. In sieben von neun Fällen war der Unterschied zwischen den Gruppen (weniger geschädigte vs. stärker geschädigte Eschen) statistisch signifikant (Abbildung 17).

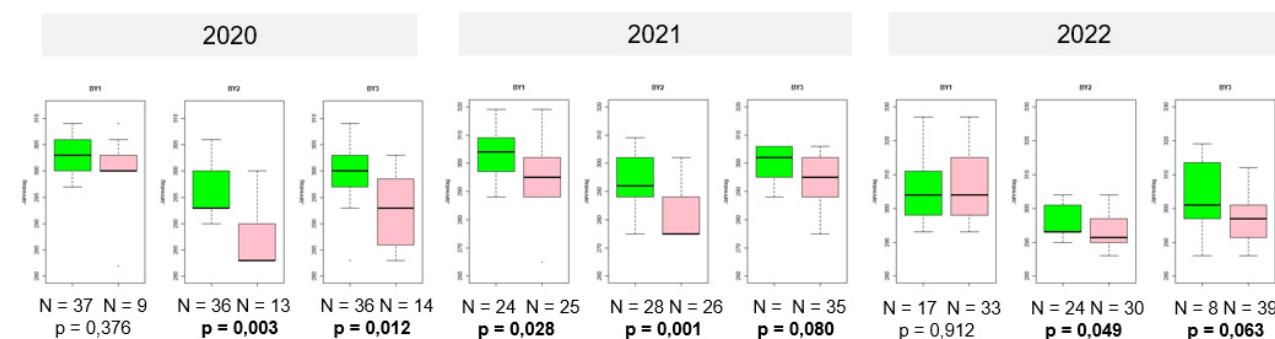


Abbildung 17: Vergleich des Eintrittsdatums des vollständigen Blattverlustes (BBCH Code 97) im Herbst zwischen Bäumen mit der Bonitur 1/2 (grün) und 3/4 (rot), dargestellt mittels Boxplots für die Jahre 2020, 2021 und 2022; fett gedruckte p-Werte repräsentieren signifikante Unterschiede.

Für die Frühjahrsphänologie sind die Ergebnisse der Beobachtungen auf den IBF weniger eindeutig. Für das BBCH Stadium 15, den Zeitpunkt der ersten vollständigen Blattentfaltung, ist der Unterschied zwischen geschädigten und weniger geschädigten Bäumen nur für die Fläche BY1 signifikant (Abbildung 18). Tendenziell neigen kränkere Bäume dazu, später auszutreiben. Gestützt würde diese Beobachtung auch durch die phänologischen Experimente im Wachstumsschrank (signifikant nur für BBCH 1; Abbildung 19).

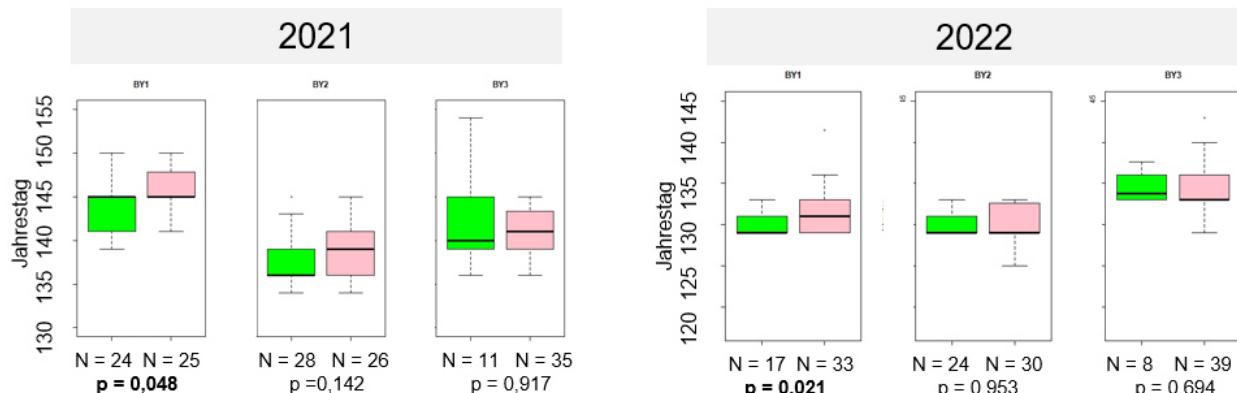


Abbildung 18: Vergleich des Eintrittsdatums der ersten Blattentfaltung (BBCH Code 15) im Frühjahr zwischen Bäumen mit der Bonitur 1/2 (grün) und 3/4 (rot), dargestellt mittels Boxplots für die Jahre 2021 und 2022, fett gedruckte p-Werte repräsentieren signifikante Unterschiede.

Zusammengefasst ergibt sich aus der Analyse der phänologischen Beobachtungen, dass stärker geschädigte Bäume tendenziell eine kürzere Vegetationsperiode aufweisen (2021 im Mittel um 8 Tage, 2022 im Mittel um 6 Tage). Diese kürzere Assimilationsperiode hat eine weitere physiologische Relevanz für die Esche, was u. a. den Wasser- und Kohlenstoffhaushalt betrifft. Eine Veranschaulichung dieser Ergebnisse findet sich im Anhang (Abbildung 45 im Anhang des TV 8, FKZ 2219WK20H4).

5.1.2 Experimentelle Phänologie

Um die Blattentwicklung unterschiedlich geschädigter Bäume bei gleichbleibenden Umwelteinflüssen zu beobachten, wurden zu Ende der Dormanz Zweige von 40 Eschen abgeschnitten und in der Klimakammer in wassergefüllte Behälter gestellt. Da aufgrund von Insektenbefall im Jahr 2022 nur sehr wenige Zweige das BBCH Stadium 7 erreicht haben, wurde das Experiment im Frühjahr 2023 wiederholt und die Zweige präventiv mit einem Insektizid behandelt. Deutlich sieht man in den Boxplots in Abbildung 3, dass Bäume der Bonituren 1 und 2 dazu neigen, früher mit der Blattentwicklung zu starten, für das erste BBCH Stadium ist dies sogar signifikant. Im Laufe der Entwicklung relativiert sich das allerdings wieder. Da nur noch vereinzelte Bäume ihre Blätter vollständig entwickelten (BBCH Stadium 15), wurden die statistischen Auswertungen mit Stadium 11 beendet.

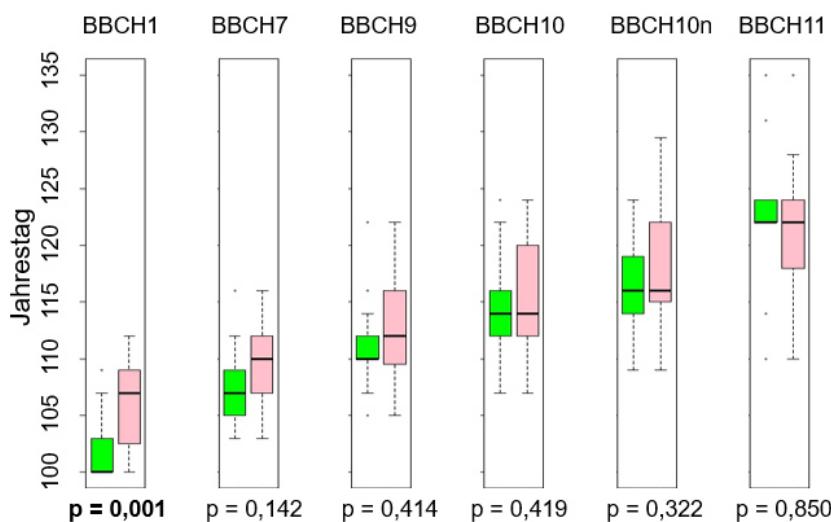


Abbildung 19: Experimentelle Untersuchungen der Phänologie in einem Wachstumsschrank: Vergleich der Eintrittsdaten der phänologischen Phasen (BBCH-Code 1 bis 11) zwischen Bäumen mit der Bonitur 1/2 (grün) und 3/4 (rot), dargestellt mittels Boxplots; fett gedruckte p-Werte repräsentieren signifikante Unterschiede.

5.1.3 Gesamtdeutscher Überblick

Die Aufnahme der Frühjahrs- und Herbstphänologie auf 13 untersuchten IBF ergab, dass sowohl die Zeitpunkte der Blattentwicklung als auch des Blattverlustes innerhalb Deutschlands stark variierten (Abbildung 46 im Anhang des TV 8, FKZ 2219WK20H4). In beiden Jahren war die Frühjahrsphänologie auf der Fläche BW2 (Weisweil) am weitesten fortgeschritten. Die Fläche MV1 (Karlsruhe) war im Frühjahr 2021, die Fläche BB1 (Melzower Forst) im Frühjahr 2022 die Fläche, auf denen noch der geringste Entwicklungszustand der Eschenblätter zu beobachten war. Im Herbst 2021 hatten die beiden Flächen in Thüringen bereits die meisten Blätter verloren; 2022 traf dies für die Fläche ST1 (Huy) zu. Nur in sechs von 13 IBF war zu beobachten, dass die Mehrheit der am weitesten entwickelten Bäume der Bonitur 1 oder 2 angehört haben. Daher zeigt sich auch hier, dass die Frühjahrsphänologie keinen eindeutigen Indikator für die Anfälligkeit der Eschen darstellt. Für die Herbstphänologie hat sich gezeigt, dass die am weitesten entwickelte Bäume in neun von 13 Fällen der Bonitur 3 und 4 angehörten. Dies verdeutlicht, dass die Herbstsesenz mehrheitlich bei kräckeren Bäumen früher einsetzt.

5.2. Polleneigenschaften

5.2.1 Pollenviabilität

Untersuchungen zur Lebensfähigkeit der Pollen erfolgten auf den drei bayerischen Flächen zu Beginn der Blüte in den Jahren 2021 und 2022. Mit Hilfe der TTC-Lösung wurde mit einem Mikroskop quantifiziert, wie viele von 400 untersuchten Pollen lebensfähig sind. Die Auswertung ergab jedoch keine signifikanten

Unterschiede zwischen beide Gruppen (weniger geschädigte vs. stärker geschädigte Eschen). Aufgrund der Verfügbarkeit der Blüten und somit Pollen konnten in beiden Jahren pro Fläche zwischen zwölf und 23 Eschen beprobt werden.

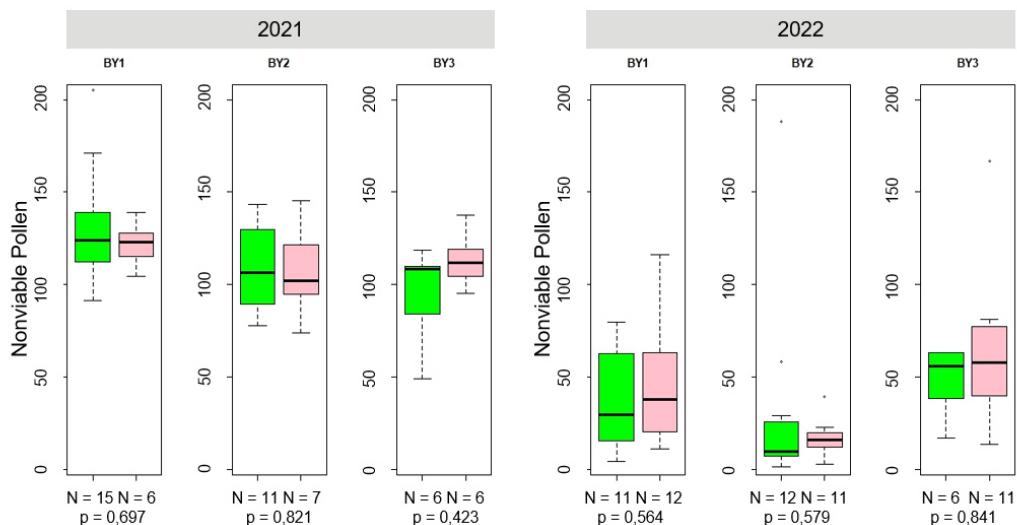


Abbildung 20: Vergleich der Anzahl viabler Pollen von Bäumen mit der Bonitur 1/2 (grün) und 3/4 (rot), dargestellt mittels Boxplots für die Jahre 2021 und 2022 auf den bayerischen IBF.

5.2.2 Pollenkeimung

Zusätzlich wurden im Jahr 2022 Untersuchungen zur Pollenkeimung durchgeführt. Dazu wurden die Pollen auf einer Agar-Nährstofflösung zur Keimung angeregt und nach 24 h wurde der Anteil der gekeimten Pollen von einer Gesamtheit von 400 Pollen mit Hilfe eines Mikroskops quantifiziert. Als gekeimt zählten jene Pollen, welche einen Pollenschlauch ausgebildet haben, dessen Länge mindestens dem Durchmesser des Pollenkorns entsprach. Obwohl im Mittel gesündere Bäumen mit einem höheren Anteil gekeimter Pollen in Verbindung stehen, ist der Unterschied zwischen den Gruppen nicht signifikant.

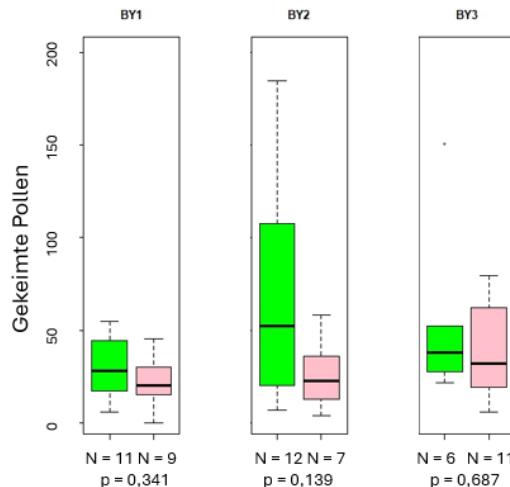


Abbildung 21: Vergleich der Anzahl gekeimter Pollen von Bäumen mit der Bonitur 1/2 (grün) und 3/4 (rot), dargestellt mittels Boxplots für das Jahr 2022 auf den bayerischen IBF.

5.3 Chlorophyllmessungen

Die Analyse der Chlorophyllwerte, gemessen mit dem Gerät SPAD 502 Plus von Konica Minolta, ergab, dass das Blattchlorophyll nicht als Resistenzindikator herangezogen werden kann. Sowohl im Jahr 2021 als auch 2022 wurden keine signifikanten Unterschiede zwischen geschädigten und weniger geschädigten Eschen festgestellt. Für die Darstellung in Abbildung 22 wurde die Messung Ende Juli gewählt, da zur selben Zeit auch von allen anderen Projektpartnern physiologische Daten sowie die Bonitur erhoben wurden.

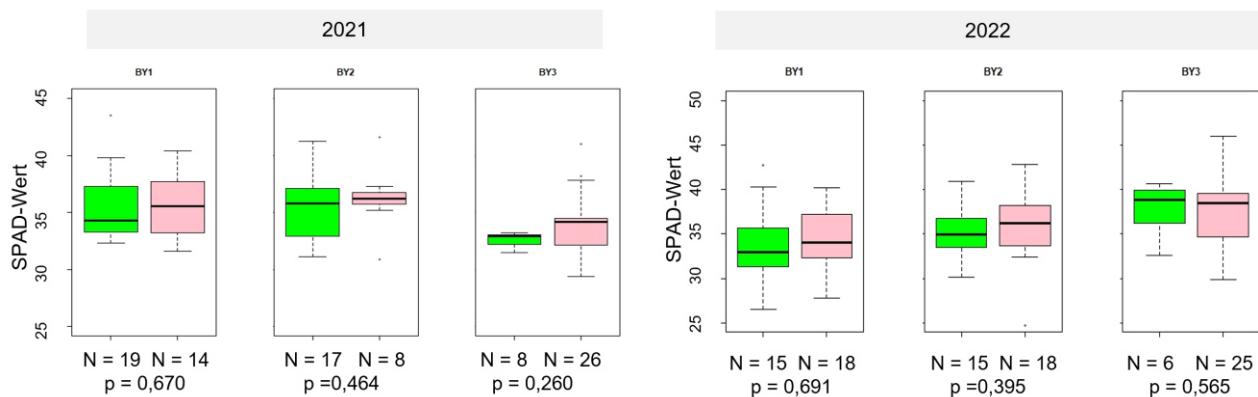


Abbildung 22: Vergleich des Chlorophyllwertes (SPAD-Wert) Ende Juli zwischen Bäumen mit der Bonitur 1/2 (grün) und 3/4 (rot), dargestellt mittels Boxplots für die Jahre 2021 und 2022.

Da es bisher nur sehr wenige Untersuchungen zum Chlorophyllgehalt in Eschenblätter gibt, bringen die Analysen jedoch weitere Einblicke über den Verlauf der Chlorophyllwerte innerhalb der Vegetationsperiode (Abbildung 23). In beiden Jahren erreichten die Chlorophyllwerte zum Zeitpunkt der vierten Messung (Anfang September) ihren Höhepunkt. Die starken Unterschiede zwischen den Standorten zu Beginn der Messungen (Anfang Juni) lassen sich durch die phänologische Entwicklung erklären. In beiden Jahren war BY2 (Bruckberg) der Standort, an dem die Blätter der Eschen als erstes vollständig entwickelt waren. Dies wiederum spiegelt sich in den hohen Chlorophyllwerten wider.

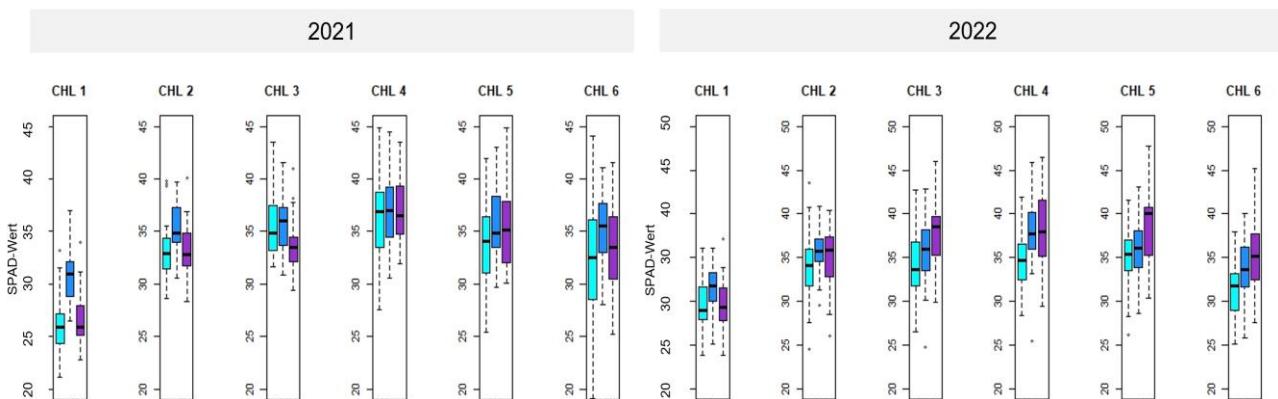


Abbildung 23: Boxplots der gemessenen Chlorophyllwerte (SPAD-Wert) über die Vegetationsperiode in den Jahren 2021 und 2022. BY1: cyan, BY2: blau, BY3: violett.

5.4 Infektionsdruck

5.4.1 Pilzabundanz

Die Anzahl der Fruchtkörper, welche im Mittel auf $10 \times 1 \text{ m}^2$ großen Flächen zu einem Zeitpunkt im Sommer bestimmt wurde, schwankte in den Jahren 2021 und 2022 zwischen den elf untersuchten IBF stark (Tabelle 3). Der höchste Mittelwert wurde jeweils auf der bayerische Fläche BY2 Bruckberg festgestellt (2021: 864 Pilze m^{-2} ; 2022: 445 Pilze m^{-2}), die geringste Pilzabundanz jeweils für SN1 Leutzsch (2021: 1 Pilz m^{-2} ; 2022: 2 Pilze m^{-2}). Beide Flächen sind mit einem sehr schlechten Vitalitätszustand verbunden (Modalwert Bonitur = 3). Die geringe Pilzabundanz verbunden mit der schlechten Vitalität der Eschen in Leutzsch scheint auf den ersten Blick ungewöhnlich zu sein. Da die Blattspindeln der vorjährigen Blätter als Habitat für den Pilz dienen, kann vermutet werden, dass der abnehmende Nachschub an Blätter bei zunehmender Triebsschädigung einen negativen Rückkopplungsprozess darstellt. In Zusammenhang mit dem Erstauftreten der Krankheit im jeweiligen Bundesland ergibt sich eine positive Tendenz: Vor allem in Beständen, bei denen das ETS verhältnismäßig spät auftrat (z. B. in Bayern) zeigten sich sehr hohe mittlere (2021-2022) Pilzabundanzen. Letztlich zeigt sich auch der Einfluss der Witterung, da höhere Niederschlagsmengen (basierend auf $1 \times 1 \text{ km}$ DWD-Rasterdaten für die Monate Mai-Oktober) und somit feuchtere Bedingungen tendenziell zu höheren Abundanzen der Fruchtkörper führten (Pearson Korrelation: $r = 0,589$). Die statistische Auswertung mit einem ANOVA-Modell zeigte, dass die meteorologischen Variablen (Temperatur, Feuchte, Niederschlag), der Zeitpunkt des Erstauftretens des ETS und der Anteil der Eschen im Bestand sogar 62 % der Variabilität der Pilzabundanz erklären lassen ($p = 0,025$).

Tabelle 3: Pilzabundanz (Mittelwert, Maximum und Standardabweichung für 10 x 1 m² Flächen) auf elf IBF in den Jahren 2021-2022 (inkl. Differenzen Δ) sowie jahresspezifische Modalwerte der Bonitur in den Beständen (Bon.), Anteil % und Anzahl N (1 ha) der Eschen und Zeitpunkt des Erstauftretens des ETS im jeweiligen Bundesland^{37, 38, 39, 40, 41, 42}. Rote Zellen: Maximalwerte, blaue Zellen: Minimalwerte.

IBF	% und N Esche	Auf- treten ETS	2021					2022					Δ [%]
			Datum	Mittel	Max	SD	Bon.	Datum	Mittel	Max	SD	Bon.	
BB1 Melzower F.	41 / 112	2002	07.07.	18	69	23	2	11.07.	62	224	75	3	244
BW1 Maulbronn	50 / 235	2006	05.07.	16	94	25	2	14.07.	29	112	34	1	81
BW2 Weisweil	45 / 94	2006	05.07.	576	4018	800	3	13.07.	214	1008	284	3	-63
BY2 Bruckberg	70 / NA	2008	14.07.	864	4608	1607	2	15.07.	445	2083	565	3	-48
HE1 Schotten	37 / 45	2008	06.07.	49	220	61	2	13.07.	54	319	92	2	10
MV1 Greifswald	69 / 123	2002	07.07.	70	235	62	2	12.07.	17	123	32	2	-76
NI1 Münden	46 / 111	2006	06.07.	9	32	10	2	12.07.	29	97	39	2	222
ST1 Huy	54 / 104	2002	06.07.	17	62	20	1	12.07.	17	112	31	2	0
SN1 Leipzig	36 / 38	2005	08./20.07.	1	12	3	3	11.07.	2	22	5	3	100
TH1 Ebersberg	30 / 180	2009	08.07.	97	420	98	2	10.07.	80	1200	281	2	-18
TH2 Schwansee	NA	2009	08.07.	139	379	145	NA	10.07.	106	544	169	NA	-24

Ein hochaufgelöstes zeitliches Monitoring im Jahre 2022 auf der Fläche BY1 Kaisheim gab Aufschluss über den Verlauf des Fruchtkörperwachstums auf 20 fest installierten Plots (Abbildung 24). Dabei hat sich gezeigt, dass höhere Werte der Pilzabundanz erst im Juli auftraten, ihr Maximum im August erreicht wird und im Herbst stark abfallen (Abbildung 25, blaue Kurve). Auf Standorten, die größtenteils mit Vegetation bedeckt waren, wurden die höchsten Werte ermittelt.

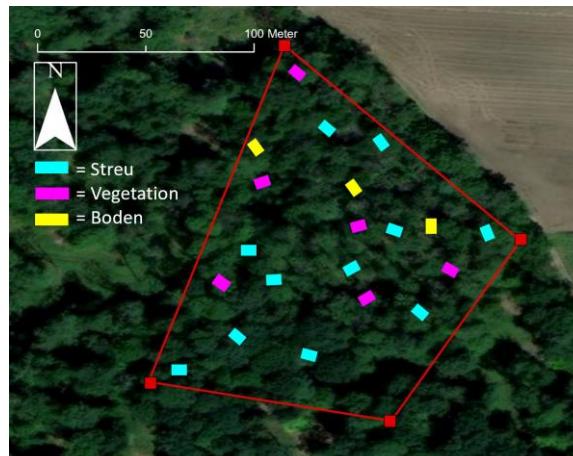


Abbildung 24: Verteilung der 20 Monitoringplots (1 m²) für die Bestimmung der Pilzabundanzen mit unterschiedlichen Bodenbeschaffenheiten auf der Fläche BY1 Kaisheim.

5.4.2 Sporenmessungen

Gleichzeitig wurde die Luftsponenkonzentration (volumetrisch und morphologisch) erfasst, sodass ein Vergleich zwischen Aerobiologie und Pilzwachstum möglich war. Abbildung 25 zeigt, dass mit der Erfassung erster Fruchtkörper auch Sporen in der Luft detektiert wurden. Während der Peak der Sporenkonzentration in der Luft im Juli auftrat, wurden die meisten Pilze erst im Spätsommer gezählt. Die Pilzabundanz allein ist daher nicht ausschlaggebend für den Sporendruck, da meteorologische Parameter einen wesentlichen Einfluss auf die Sporeneisetzung und -dispersion ausüben können. In Kaisheim sank der Sporendruck nach Beginn der Sporensaison sogar an mehreren Tagen auf 0 ab, bevor die Werte wieder anstiegen (Abbildung 25).

³⁷ Straßer L, Nannig A (2010) Das Eschenjahr 2009 – Eschentreibsterben in Bayern. Blickpunkt Waldschutz Nr. 2.

³⁸ Baumann M (2012) Die Esche – Vom Hoffnungsträger zum Sorgenkind. Waldpost 2012/2013, 14-15.

³⁹ MV (2014) Waldzustandsbericht 2014 – Ergebnisse der Waldzustandserhebung und Mecklenburg-Vorpommern.

⁴⁰ NW-FVA (2016) Praxis-Information Nr. 4: Eschentreibsterben (August 2016).

⁴¹ FVA BW (2016) Waldzustandsbericht 2016 für Baden-Württemberg.

⁴² ForstBrandenburg (2018) Waldzustandsbericht 2018 des Landes Brandenburg. 34 pp.

Sporenkonzentration auf der Fläche BY1 2022

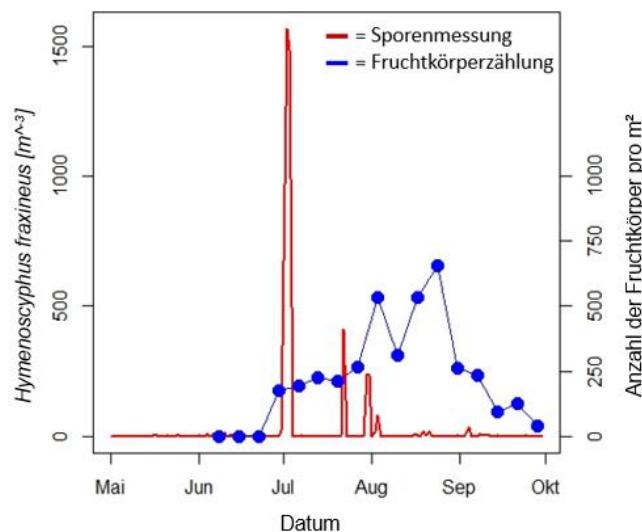


Abbildung 25: Sporenkonzentration auf der Fläche BY1 im Jahr 2022 (rote Kurve, linke y-Achse) sowie Anzahl der Fruchtkörper auf 20 Monitoringplots (blaue Kurve, rechte y-Achse).

5.4.3 Auswertung der Filter

Ausgewertet wurden Filter von insgesamt zwölf verschiedenen Standorten (siehe Tabelle 4), wobei sich die Aufnahme für die Flächen Weisweil und Melzower Forst auf jeweils eines der beiden Jahre beschränkt, da hier für das andere Jahr keine Person für den wöchentlichen Filterwechsel gefunden wurde. Die Flächen Emmendingen und Vervais wurden als zusätzliche Flächen ausgewählt, da sie nahe zu Weisweil und dem Melzower Forst liegen; hier findet sich eine weitere Analyse der Daten für das Jahr 2022 bzw. 2023 in den Berichten von FraxGen und FraxVir. Auf den meisten Flächen wurden Filter im Zeitraum von Mitte Mai (KW 22) bis Anfang Oktober (KW 40) gesammelt. Um allerdings eine Vergleichbarkeit innerhalb der Daten zu schaffen, wurde für die Analyse der Zeitraum von Ende Mai (KW 23) bis Ende September (KW 38) gewählt, was für jeden Standort 16 Wochen ergibt. Aufgrund von Umwelteinflüssen (Sturm und Flut), Krankheit oder fehlendem Personal war es nicht immer möglich, an allen Standorten die Filter regelmäßig zu wechseln. In Tabelle 2 ist vermerkt, wie viele Filter pro Fläche tatsächlich analysiert wurden.

Tabelle 4: Sporenbelastung in Target Copy's pro 40 ng DNA-Input (Summe, Maximum, Minimum und Mittelwert) aller zwölf IBF in den Jahren 2021 und 2022. Pro Fläche wurden maximal 16 Filter ausgewertet. Filter ohne Befund sind jene, auf denen keine Sporen gefunden wurden (Nachweisgrenze: 40 ng).

IBF	2021						2022					
	Anzahl Filter	Filter ohne Befund	Σ	Max	Min	MW	Anzahl Filter	Filter ohne Befund	Σ	Max	Min	MW
BB1 Melzower F.	0	NA	NA	NA	NA	NA	9	7	38	26	0	4,2
BW2 Weisweil	10	7	310	261	0	31	0	NA	NA	NA	NA	NA
BY1 Monheim	16	3	20167	5738	0	1260,4	16	9	381	157	0	23,8
BY2 Bruckberg	15	3	73555	40898	0	4903,4	16	6	1142 5	7787	0	714,1
Emmendingen	0	NA	NA	NA	NA	NA	15	13	114	96	0	7,6
HE1 Schotten	16	6	942	210	0	58,9	16	15	40	40	0	2,5
MV1 Greifswald	16	13	43	20	0	2,6	16	11	130	46	0	8,1
NI1 Münden	15	11	112	45	0	7,5	16	12	143	44	0	8,9
ST1 Huy	16	16	0	0	0	0	16	13	82	30	0	5,1
TH1 Ettersberg	15	3	1267	453	0	90,5	6	3	274	54	0	45,6
TH2 Schwansee	10	2	13673	11002	0	1367,3	7	5	1493	1098	0	213,3
Vervais	16	10	163	35	0	10,18	NA	NA	NA	NA	NA	NA

Die Auswertung der Daten hat ergeben, dass nicht nur das Auftreten der Fruchtkörper innerhalb Deutschlands stark variiert, sondern auch die Sporenbelastung und somit der Infektionsdruck auf den Flächen sehr unterschiedlich ist. In beiden Jahren war, wie bereits bei den Fruchtkörpern, die Fläche BY2 der Standort mit den höchsten gemessenen Werten. Ebenfalls spiegelt sich die Tatsache wider, dass im Jahr 2021 die Sporenbelastung deutlich höher war, was sich auf die feuchteren Bedingungen zurückführen lässt.

5.4.4 Zusammenhang zwischen der Phänologie und der Sporenbelastung

Nur in Einzelfällen wurde Sporen bereits Mitte Mai detektiert, die meisten Sporen wurden von Anfang Juni bis Mitte August detektiert. Der Großteil der Blätter war zu diesem Zeitpunkt schon vollständig entwickelt. Somit ist die Phänologie des Wirts vom Pathogenvorkommen zeitlich weitgehend entkoppelt. Dennoch ist denkbar, dass jüngere Blätter anfälliger sind. Um diese Vermutung zu untermauern, sind jedoch weitere Studien notwendig.

6. Mikroskopische Analyse der Gewebestruktur

6.1 Probennahme und Präparation

Die Probennahmen für die mikroskopischen Analysen 2020 – 2022 wurden erfolgreich abgeschlossen. Nach dem ersten Probennahmejahr 2020 wurde aufgrund des großen Probenumfangs und der verhältnismäßig nur sehr geringen Anzahl an Proben mit erkennbaren Symptomen die Anzahl der zu beprobenden Bäume pro IBF auf fünf reduziert. Der Fokus lag hierbei auf Bäume, bei denen die Bonitur auf eine verminderte Vitalität hinwies. Diese Bäume wurden von 2020 bis 2022 wiederholt beprobt, um mögliche Befallsdynamiken über den Projektzeitraum hinweg zu erfassen. Das Probenmaterial aus den Baumkronen stammte hauptsächlich aus Terminal- und Vorjahrestrieben. Neben der Beprobung von Trieben wurden vereinzelt Blätter und Petiole beprobt, die Anzeichen von Nekrosen aufwiesen. Zusätzlich wurden auf einigen Probeflächen Blattspindeln mit Fruchtkörpern des Erregers aus der Streu entnommen. Von den jeweiligen Trieben wurden Quer- und Radialschnitte mit einem Rotationsmikrotom angefertigt. Die histologischen Schnitte wurden, mit einer Schnittdicke von 10 µm präpariert. Zur besseren Differenzierung der Zell- und Gewebestrukturen wurden die Schnitte mit der Mehrfachfärbung nach ETZOLD⁴³ (Fuchsin, Chrysoidin, Astralblau) gefärbt. Das empfindliche Probenmaterial von Petiole, Blättern und Fruchtkörpern wurden mit Technovit nach KULZER (2-Hydroxyethylmethacrylat (HEMA)) eingebettet. Diese Kunststoffeinbettung ermöglichte Schnitte mit dem Mikrotom von unter 5 µm. Die Schnitte wurden mit der Bildanalysesoftware ZEN (Carl Zeiss AG, Oberkochen, Deutschland) im Durchlichtmikroskop untersucht.

Der Schwerpunkt der lichtmikroskopischen Analyse lag bei der Detektion von Pilzhyphenstrukturen und den Abwehrmechanismen des Wirtes. Durch die Färbung nach ETZOLD wird ligninhaltiges Gewebe hellrot, während sich Cellulose, Parenchym und vitale Zellen blau anfärben⁴³. Die Zellwände der Hyphen bestehen aus Chitin. Abgesehen von einer Stickstoffseitenkette ist Chitin in seinem chemischen Aufbau der Cellulose der Pflanzen sehr ähnlich⁴⁴. Daher konnten vermutlich durch das ETZOLD-Farbgemisch die hyalinen Hyphenstrukturen in blass- bis dunkelblauen Farben differenziert dargestellt werden (Abbildung 26 A). Nekrotisierte Rinde, also abgestorbene Zellen, welche im vitalen Zustand blau erscheinen, wurden dunkelrot eingefärbt. Phellemzellen, die auch zur Abschottung gebildet werden, nehmen keine Färbung an und traten blassweiß hervor. Neben den lichtmikroskopischen Analysen wurden an ausgewählten Proben Aufnahmen mit dem Rasterelektronenmikroskop durchgeführt. Dabei wurden insbesondere nekrotisierte Triebe und Rhachis mit Fruchtkörpern untersucht. Mittels der REM-Aufnahmen nekrotisierter Triebe konnten analog zu den lichtmikroskopischen Aufnahmen Hyphenstrukturen detektiert und ihre räumliche Ausbreitung dargestellt werden (Abbildung 26 B). Die lichtmikroskopischen und rasterelektronenmikroskopischen Analysen im Arbeitspaket 4.2. der Gewebeproben konnten gemäß den Teilzielen der Meilensteine für alle Probennahmen erfolgreich abgeschlossen werden.

⁴³ Etzold, Helmut (2002): Simultan färbung von Pflanzenschnitten mit Fuchsin, Chrysoidin und Astrablau. Mikrokosmos, Zeitschrift für Mikroskopie. In: *Mikrokosmos* 91 (5), S. 316–318. Online verfügbar unter https://www.zobodat.at/publikation_volumes.php?id=42973, zuletzt geprüft am 20.11.2023.

⁴⁴ Huckfeldt, Tobias; Schmidt, Olaf (2005): Hausfäule- und Bauholzpilze. Diagnose und Sanierung. Köln: R. Müller.

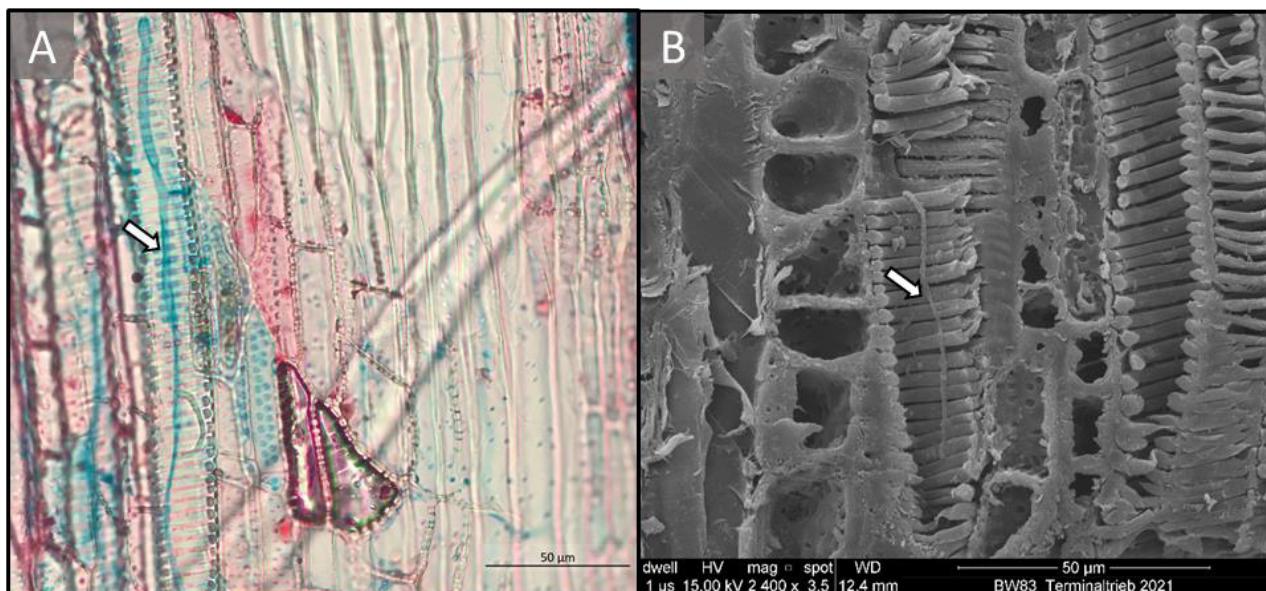


Abbildung 26 A und B: Aufnahmen von Radialschnitten befallener Eschentreibe mittels verschiedener mikroskopischer Verfahren. **A)** Durchlichtmikroskopische Aufnahme mit Unterstützung der histologischen Anfärbung nach ETZOLD zeigt die Differenzierung hyaliner Hyphenstrukturen (Pfeil) im Lumen eines Gefäßes in hellem Blau. **B)** REM-Aufnahme, welche eine Hyphenstruktur (Pfeil) innerhalb des Lumen eines Gefäßes (Pfeil) darstellt.

6.2 Ergebnisse der mikroskopischen Untersuchungen

Die bei der Beprobung makroskopisch überwiegend vital erscheinenden Triebe, deuteten auch bei den mikroskopischen Analysen nur in seltenen Fällen auf eine Infektion hin. Die daraufhin fokussierte Untersuchung von Probebäumen mit verminderter Vitalität (Bonitur 3 – 4) ergab standortübergreifend ebenfalls kaum Anzeichen eines Pathogenbefalls, sowohl makroskopisch als auch mikroskopisch. Diese Beobachtungen stimmen mit den Erkenntnissen von Adamčíková et al. (2018)⁴⁵ überein, welche feststellten, dass der visuelle Gesundheitsstatus nicht zwangsläufig mit dem Ausmaß von Nekrosen korreliert. Eschen mit starker Kronenverlichtung wiesen zuweilen geringere Nekrosen auf als solche mit gesünder erscheinenden Baumkronen. Eine Sonderstellung nehmen hier die bayrischen Standorte ein, denn hier waren die Symptome des ETS an den Proben häufiger erkennbar. Dies könnte auf die Methode der Probennahme zurückzuführen sein, die durch den Einsatz von Hubsteigern eine gezieltere Auswahl der Proben ermöglichte.

Die jährlichen Untersuchungen an denselben Bäumen, um die zeitlich dynamische Entwicklung des ETS zu verfolgen, führten zu keinen eindeutigen Ergebnissen. Mehrere Faktoren könnten dazu beigetragen haben: Die Probennahmen und Lokalisierung des Probenmaterials erfolgten sehr arbiträr. Erschwerend hinzukam, dass einige Bäume infolge von Windwurf, Mortalität oder Nichtauffindbarkeit nicht erneut beprobt werden konnten. Zudem könnte der sehr trockene Sommer im zweiten Probennahmeh Jahr (2021) ein begrenzender Faktor für die Pathogenese gewesen sein. Ein weiterer Aspekt könnte darin bestehen, dass für die gemeinsamen Proben mit der Phänologie vordergründig Äste mit Lichtblättern ausgewählt wurden, die der Sonneneinstrahlung stärker ausgesetzt waren. Diese überwiegend vitalen Äste könnten lokal höheren Temperaturen ausgesetzt gewesen sein, was möglicherweise für den Pilz ungünstige Wachstumsbedingungen geschaffen hat. Die Limitierung des Pilzwachstums durch höhere Temperaturen wurde von Grosdidier et al. (2018)⁴⁶ beschrieben und könnte einen Erklärungsansatz für die überwiegend vitalen Triebe der Lichtblätter liefern.

⁴⁵ Adamčíková, Katarína; Pažitný, Jozef; Pastirčáková, Katarína (2018): Individual resistance of *Fraxinus angustifolia* and *F. excelsior* clones to *Hymenoscyphus fraxineus*. In: *Journal of Plant Protection* 58 (3), S. 227–233. DOI: 10.24425/122937.

⁴⁶ Grosdidier, M.; Ios, R.; Marçais, B. (2018): Do higher summer temperatures restrict the dissemination of *Hymenoscyphus fraxineus* in France? In: *Forest Pathology* 48 (4), 1-11. DOI: 10.1111/efp.12426.

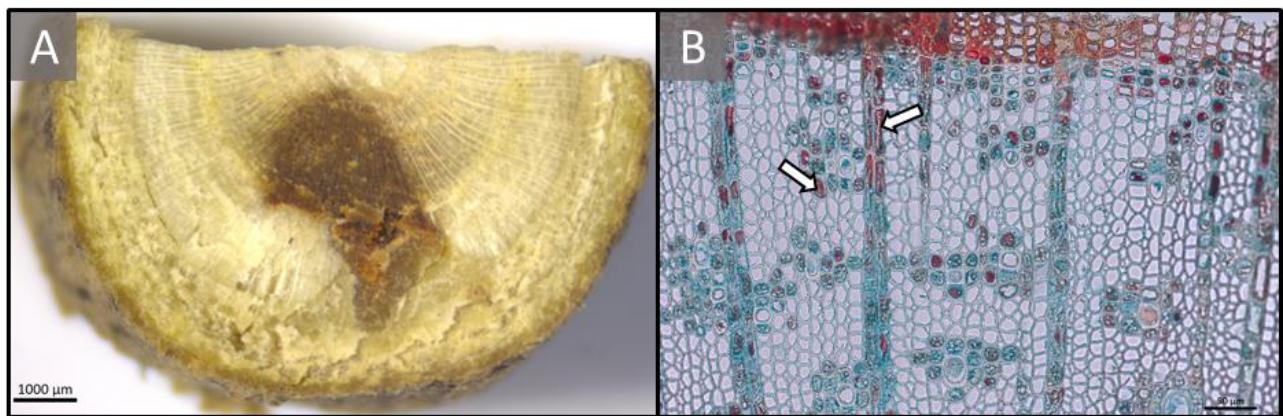


Abbildung 27 A und B: Aufnahmen verfärbter Bereiche im Querschnitt befallener Eschentriebe. **A)** Makroskopische Aufnahme zeigt ausgedehnte Verfärbungen im verholzten Bereich des Triebes, die äußerlich nicht sichtbar sind. **B)** Lichtmikroskopische Betrachtung der verfärbten Bereiche im Holz offenbart auffällige Verfärbungen parenchymatischer Zellen (Pfeile).

Angesichts der selten auftretenden Symptome an den Proben adulter Eschen und um zuverlässige Aussagen über das Erscheinungsbild des Erregers treffen zu können, wurde innerhalb des FraxForFuture-Verbunds ein Austausch von Probenmaterial organisiert. Dieses Material umfasste Sprossachsen von Jungpflanzen aus natürlicher Infektion (TU Dresden, Falk Schrewe) und Sprossachsen aus Inkulationsversuchen (JKI, Maia Ridley) mit *H. fraxineus* in Reinkultur. Die Proben von Jungpflanzen wiesen im Vergleich zu denen adulter Eschen eine deutlich ausgeprägtere Symptomatik auf. An den Jungpflanzen wurden Sprossachsen, ausgehend von äußerlich sichtbaren nekrotischen Läsionen, licht- und rasterelektronenmikroskopisch untersucht. Hierbei sollten die Proben der Inkulationsversuche einerseits als verlässliche Referenzproben dienen und andererseits bei der morphologischen Beschreibung des Erregers behilflich sein. Im Folgenden werden die Ergebnisse der makroskopischen und mikroskopischen Analysen des gesamten symptomatischen Probenmaterials bezüglich des Pathogenbefalls beschrieben. Makroskopisch manifestierte sich das ETS hauptsächlich durch nekrotische Läsionen an den Trieben oder nekrotische Flecken auf den Blättern. Mikroskopisch relevante Ergebnisse konnten mit der eingesetzten Methodik nur am Trieb- und Sprossmaterial gewonnen werden. Die äußerlich sichtbaren Nekrosen, sog. hypersensitive Reaktionen, erstreckten sich lokal radial über den gesamten Bast einschließlich des Cambiums. Eine Nekrosierung des angrenzenden Xylems wurde nicht beobachtet. Dennoch waren makroskopische Verfärbungen (Verbraunungen) im Xylem erkennbar, die sich in ihrer axialen Ausdehnung über die nekrotisierten Bereiche des Bastes hinaus erstreckten (Abbildung 27 A). Die clusterförmig expandierenden Verfärbungen im verholzten Spross verliefen üblicherweise parallel zum nekrotisierten Rindengewebe und umfassten auch Teile des Marks. Eine histologische Untersuchung dieser Bereiche zeigte auffällige Anfärbungen von Parenchymzellen (Abbildung 27 B).

Das Abschottungsgewebe besteht aus mehreren Reihen von Phellemzellen (Korkzellen) (Abbildung 28 B, Pfeil), die die nekrotisierten Bereiche vom vitalen Rindengewebe abgrenzen. Diese Abschottung wurde häufig als radiale Barriere zu beiden Seiten des nekrotisierten Rindengewebes angelegt, jedoch erfolgte keine Abschottung der nekrotisierten Bereiche zum Xylem hin. Sowohl unter- als auch oberhalb der äußerlich sichtbaren Rindenläsionen zeigten Längs- und Querschnitte häufig nekrotisiertes Phloem- und Cambiumgewebe, ohne dabei das Rindenperiderm zu durchdringen (Abbildung 29).

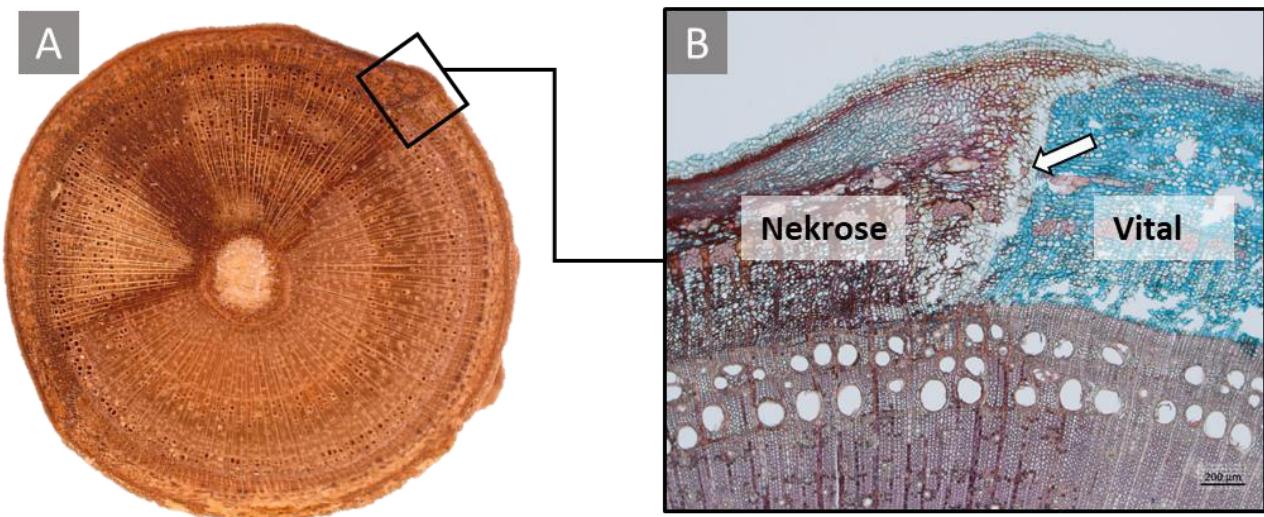


Abbildung 28 A und B: Makroskopische und mikroskopische Betrachtung im Querschnitt einer juvenilen Esche mit ETS. **A)** Zonierte Verfärbungen im Rinden- und Holzgewebe bereits makroskopisch deutlich erkennbar **B)** Durch Wundperiderm (Pfeil) abgeschottetes nekrotisiertes Rindengewebe durch histologische Anfärbung eindeutig differenzierbar. Nekrotisierte Rindenbereiche werden rot und vitale Rindenbereiche blau angefärbt.

Auch diese Bereiche wurden teilweise innerhalb des Bastes durch Wundperiderm abgeschottet. Daher scheint die initiale Nekrotisierung von cambialen Zellen und Phloemzellen mit dem direkt angrenzenden verfärbten Xylem zu korrespondieren. Diese initiale Nekrotisierung, das Fehlen einer Abschottung zum Xylem hin und die in ihrer axialen Ausdehnung, die nekrotischen Bereiche übertreffenden Verfärbungen im Xylem, deuten darauf hin, dass die Nekrotisierung des Rindengewebes eine Folge vorangegangenen Schädigung/Verfärbung im Holz ist⁴⁷ (vgl. Schumacher et al. 2010). Es scheint daher, dass nach dem initialen Befall, das Pathogen primär die axialen und radialen Strukturen des Xylems nutzt, um sich im Spross auszubreiten und so die charakteristischen Verfärbungen auslöst. Angrenzend zu den verfärbten Xylembereichen entstehen die hypersensitiven Reaktionen im Rindengewebe erst als Reaktion zum Befall im Xylem. Bei einigen Proben wurde selbst im Bereich des Infektionsherdes (Inokulation) kein Abschottungsgewebe zur Begrenzung nekrotischer Bereiche gebildet (Abbildung 29 B). Diese Beobachtung legt nahe, dass induzierte Abwehrmechanismen in ihrer Ausprägung stark variieren können und möglicherweise vom Genotyp oder vererbten Toleranzen abhängen.

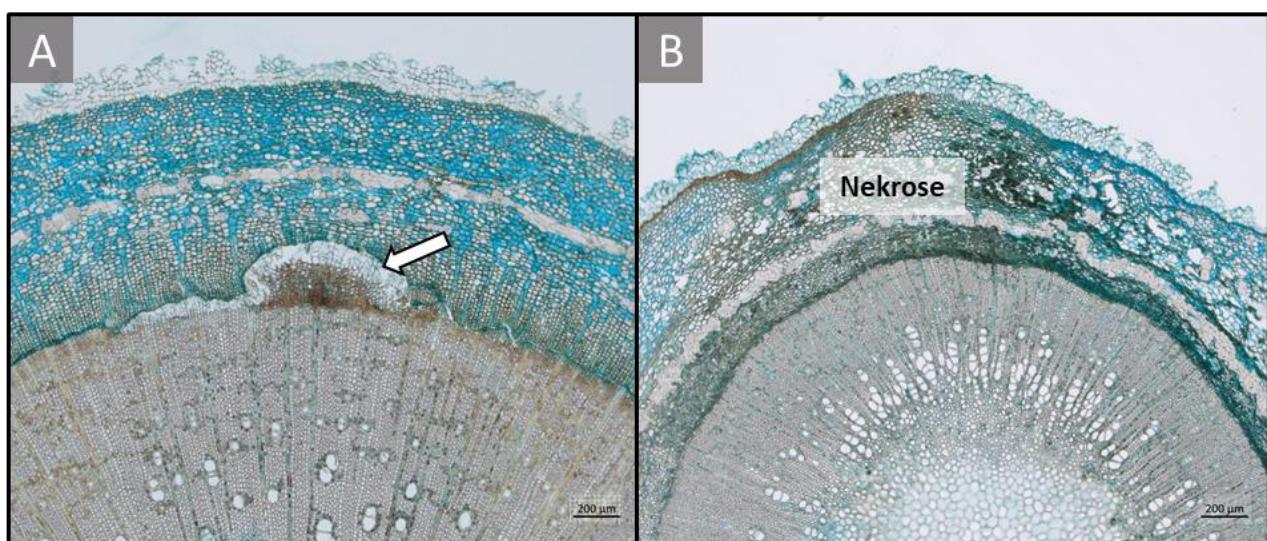


Abbildung 29 A und B: Lichtmikroskopische Betrachtung nekrotischen Rindengewebes im Querschnitt **A)** Inokulierter juveniler Spross: äußerlich nicht sichtbarer nekrotisierter Rindenbereich im Bast inklusive Cambiums. Eine Abschottung durch das Wundperiderm fand nur innerhalb des Bastes zum Xylem hin statt, keine Abschottung nach außen. **B)** Natürlicher infizierter Trieb aus der Baumkrone einer adulten Esche: nekrotisiertes Rindengewebe ohne Abschottung durch Wundperiderm.

⁴⁷ Schumacher, Jörg; Kehr, Rolf; Leonhard, Sindy; Wulf, Alfred (2010): Neue Erkenntnisse zur Pathogenese des Triebsterbens an Esche (*Fraxinus excelsior*). In: Journal für Kulturpflanzen 62, S. 1–8. DOI: 10.5073/JfK.2010.01.01.

Die zuvor beschriebene axiale und radiale Ausdehnung der Verfärbung im Xylem deutet darauf hin, dass weder konstitutive noch induzierte Abwehrmechanismen im Holzgewebe gemäß dem CODIT (Compartmentalization Of Damage In Trees) -Prinzip effektiv waren. Im verholzten Teil der Triebe konnten potenzielle physiologische Reaktionen als induzierte Abwehrmechanismen im Gegensatz zum Rindengewebe nur vereinzelt festgestellt werden. Diesbezüglich könnten die eingangs erwähnten auffallenden Anfärbungen der parenchymatischen Zellen auf die Einlagerung phenolischer Substanzen hindeuten. Allerdings konnte diese Vermutung bisher nicht bestätigt werden. Eine gemeinsame Probenauswertung mit der HU-Berlin (FraxGen) ergab keine Nachweise von Phenolen, die mit Abwehrprozessen in Verbindung stehen. Weitere typische induzierte Abwehrmechanismen wie der Verschluss der wasserleitenden Systeme im Xylem durch Verthyllung von Gefäßen wurden nur bei einer einzigen Probe mittels REM-Aufnahmen identifiziert. Diese Beobachtung legt nahe, dass eine induzierte Abwehrreaktion, die mit dem ETS assoziiert ist, nicht vorliegt. Es konnten keine komplett verstopften Gefäße, sogenannte Tracheomykosen, wie beim Ulmensterben, nachgewiesen werden.

Die Hyphenstrukturen wurden hauptsächlich innerhalb bzw. angrenzend verfärbter Bereiche im Xylem nachgewiesen und in unmittelbarer Nähe nekrotisierter Rindengewebe. Die Hyphen durchdrangen das Xylemgewebe sowohl axial über die Lumina von Gefäßen, Fasern, Axial- und Markparenchym als auch radial über das Strahlenparenchym (Abbildung 30 und Abbildung 31 A - C). Die höchste Hyphenakkumulation wurde im Markparenchym und in den Lumina von Gefäßen beobachtet.

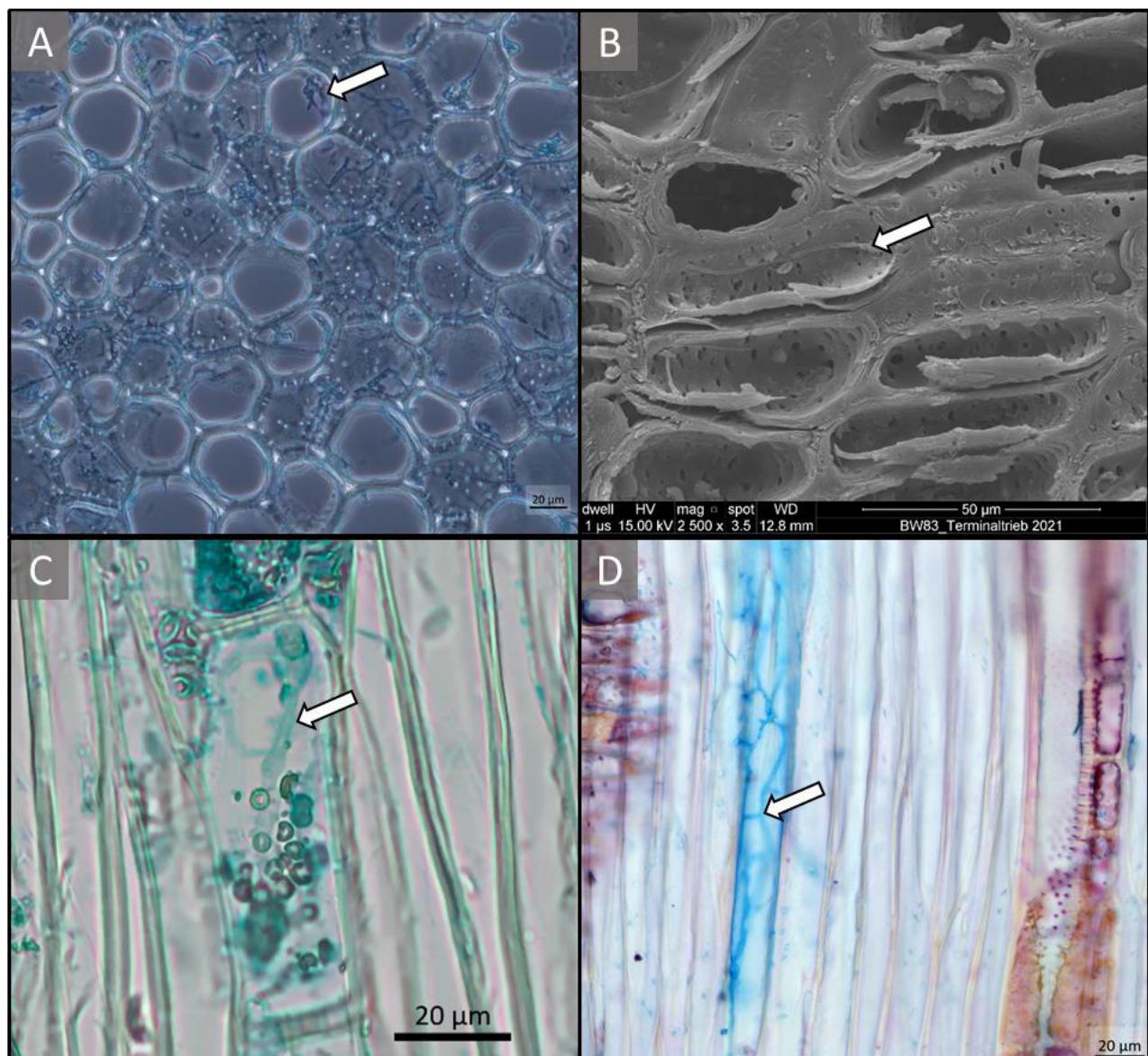


Abbildung 30 A - D: Hyphenstrukturen (Pfeile) im Lumina verschiedenem Zelltypen. **A)** Phasenkontrastaufnahme im Querschnitt: Zahlreiche Hyphenstrukturen im Markparenchym. **B)** REM-Aufnahme im Querschnitt: Hyphenstruktur im Strahlenparenchym **C)** Lichtmikroskopische Aufnahme im Radialschnitt: Hyphe im Axialparenchym **D)** Lichtmikroskopische Aufnahme im Radialschnitt: axial orientierte Hyphenstruktur im Faserlumen.

Die Ausbreitung der Hyphen erscheint systemisch zu erfolgen, d. h. sie erschließen das Xylemgewebe mehr oder weniger unspezifisch. Dabei nutzen sie vorwiegend die vorhandenen Wegbarkeiten via Tüpfel und Gefäßdurchbrechungen (Abbildung 31 C). Degradationserscheinungen von Zellwänden wurden dabei nicht sichtbar.

Die Erschließung der parenchymatischen Zellen könnte mit den dort gespeicherten Nährstoffen zusammenhängen, die dem Pilz als Nahrungsgrundlage dienen. Die auffälligen Verfärbungen dieser Zellen könnten somit einerseits wie bereits beschrieben auf die Einlagerung phenolischer Substanzen hindeuten und andererseits die Besiedlungswege des Pilzes anzeigen (Abbildung 27 B).

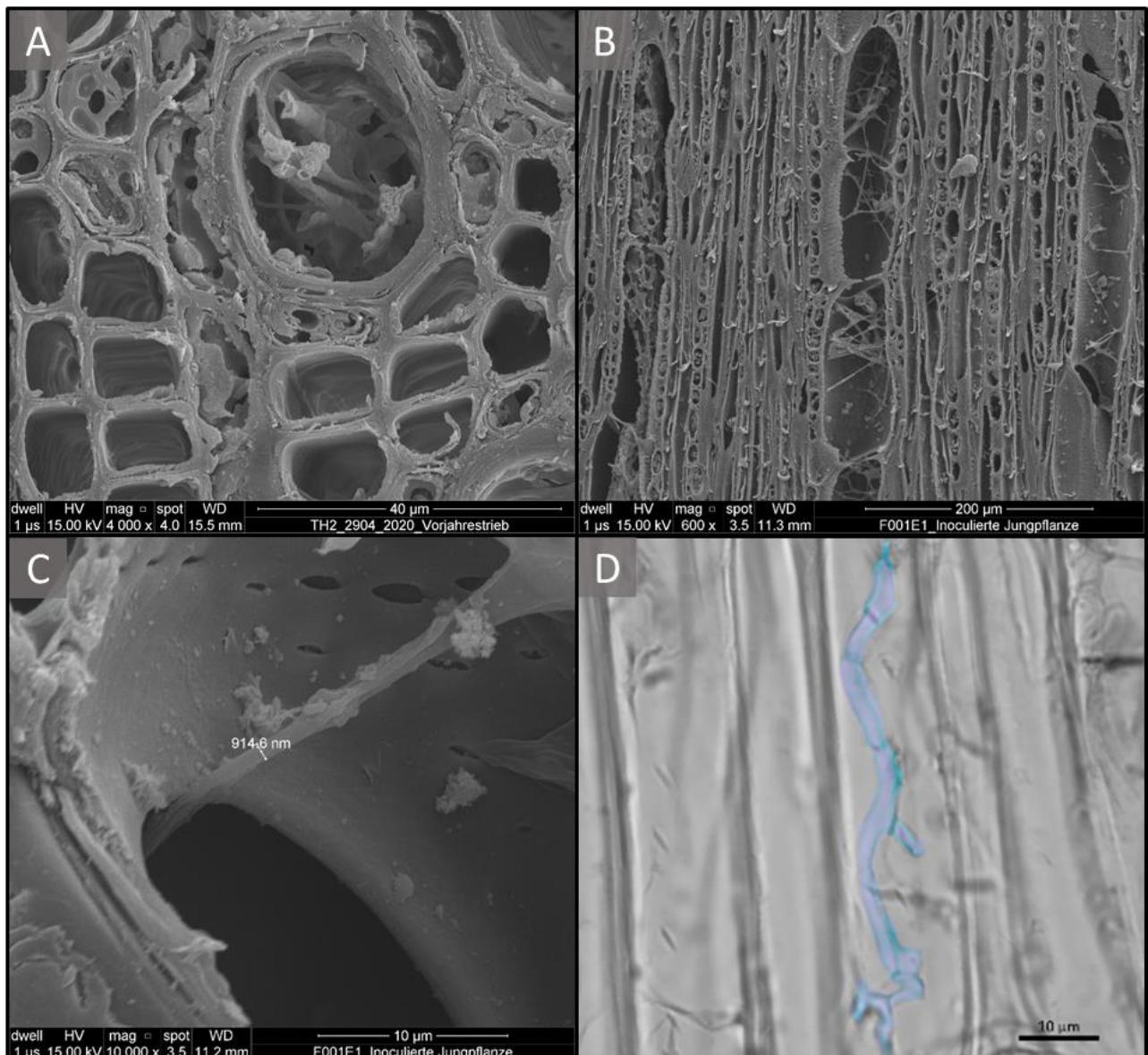


Abbildung 31 A - D: REM-Aufnahmen von Hyphenstrukturen im Gefäßlumina. **A)** Querschnitt mit sichtbaren Hyphenstrukturen im Gefäßlumen. **B)** Längsschnitt zeigt die Akkumulation von Hyphen in Gefäßlumina. **C)** Hyphenausbreitung via Gefäßdurchbrechung. **D)** axial orientierte septierte Hyphe im Faserlumen.

Die identifizierten Hyphen, im Holz auch als Substrathyphen bezeichnet³⁴, wiesen häufig Verzweigungen auf und bei ausreichend großem Durchmesser waren Septen erkennbar (Abbildung 31 D). Die Hyphendurchmesser variierten stark und lagen im Xylem zwischen 0,4 und 4,5 µm. Außerhalb des Wirtes, im Inokulat, wurden auch größere Hyphendurchmesser gemessen von bis zu 5,7 µm (Abbildung 32). Die Dimensionen der Hyphen und ihre Verbreitung war nahezu analog zwischen natürlich infizierten und inokulierten Jungpflanzen, wobei die Hyphendichte bei Letzteren höher war.

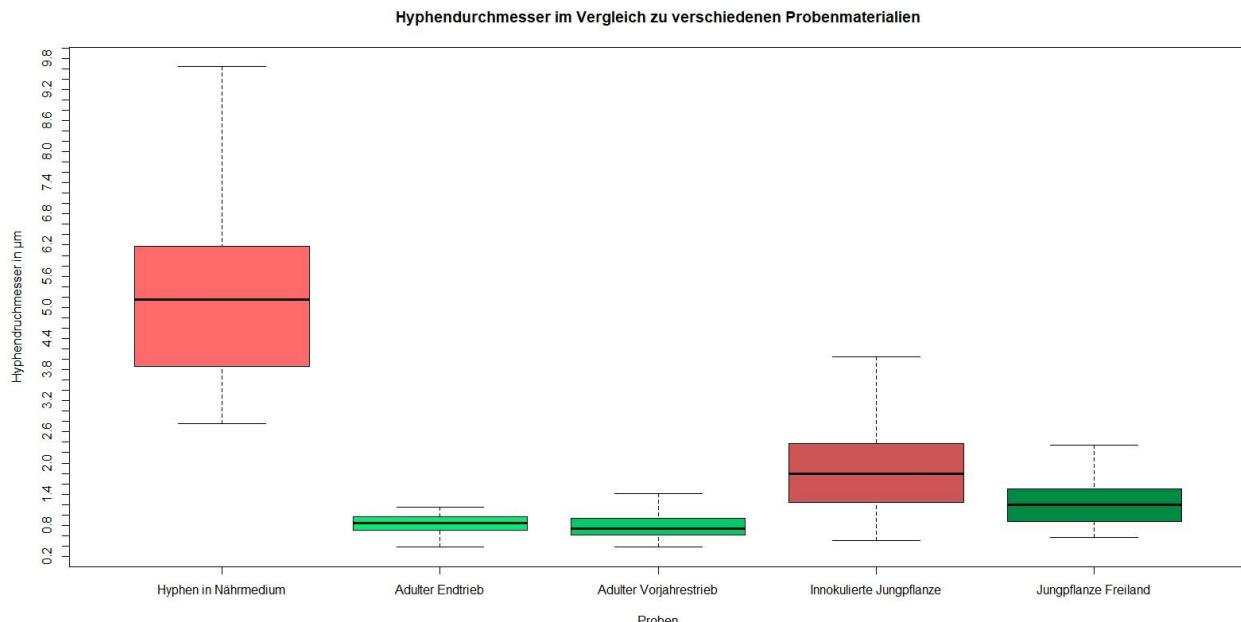


Abbildung 32: Messung der Hyphen von *H. fraxineus* in verschiedenen Wirten und Nährmedium. Rot stellt inkulierte und grün natürliche Situation da.

6.3 Gesammelte wesentliche Erfahrungen

Die Analysen der Proben zeigten nur an Trieben mit bereits makroskopisch sichtbaren Symptomen Reaktionen, die mit dem ETS in Verbindung standen. Mikroskopisch erkennbare Abwehrreaktionen beschränken sich auf das Rindengewebe. Der Pilz breitet sich bevorzugt im Xylem aus, da das nekrotisierte Rindengewebe weniger vorteilhafte Bedingungen für das Pilzwachstum bietet. Die Hyphen lassen sich in geringer Anzahl in allen Xylembestandteilen finden. Die expandierende Nekrosierung des Cambiums und die Behinderung des axialen Wasserleitsystems durch Hyphen könnten einen Erklärungsansatz für den letalen Verlauf der Krankheit bei Jungpflanzen liefern.

7. Biomarker

Im Rahmen des Projektes wurden rund 400 Blattproben von 14 IBF auf 91 biochemische Parameter (Biomarker) hin untersucht. Die etablierten Methoden wurden auf Holzmaterial aus Trieben und dem Stamm erweitert, wobei hier nur ausgewählte Biomarker untersucht wurden. Die Probennahmen erfolgten im Sommer 2020 bis 2022, wobei auf den meisten Flächen zwei oder drei Probennahmen durchgeführt werden konnten. 2023 wurden nur noch zusätzliche Untersuchungen der Stämme durchgeführt, welche bereits 2021 begannen.

Die Analysen erfolgten zunächst in Hinblick auf Unterschiede zwischen den Baumkompartimenten (Blatt, Trieb, Stammholz), IBF und Jahren. Anders als bei einem „Triebsterben“ zu vermuten ist, konnten in den Trieben keine Biomarker ausfindig gemacht werden, die eine potenzielle Aussage zum Vitalitätszustand der Eschen hätten geben können. Einige der Biomarker lagen kaum oberhalb der Nachweisgrenze. Aus diesem Grund wurde nach zwei Jahren von weiteren Beprobungen und Analysen der Triebe abgesehen. Der Fokus lag stark auf der Analyse der Blätter, da sich dort das Zentrum des Stoffwechsels befindet und sich Stressreaktionen auch in den Blättern zeigen sollten. Die biochemischen Inhaltsstoffe unterschieden sich sowohl nach den Jahren als auch nach den Flächen teilweise stark (Beispiel in Abbildung 33), sodass für jede einzelne Fläche ein Biomarkermuster erstellt werden konnte. Stärkere Unterschiede zwischen den Vitalitätsstufen wurden vor allem bei der Abgrenzung der Stufe 1 und Stufe 4 festgestellt. Diese waren jedoch auf jede der Flächen unterschiedlich. Es wurden für das Jahr 2021 Biomarkermuster identifiziert, die deutliche Unterschiede zwischen den Flächen aufzeigten (Abbildung 34), jedoch keine nennenswerten Unterschiede zwischen den Vitalitätsstufen aufwiesen. Dies ist aufgrund der starken Flächenunterschiede wenig überraschend, obwohl die verschiedenen Cluster auf unterschiedliche physiologische Zustände hindeuteten.

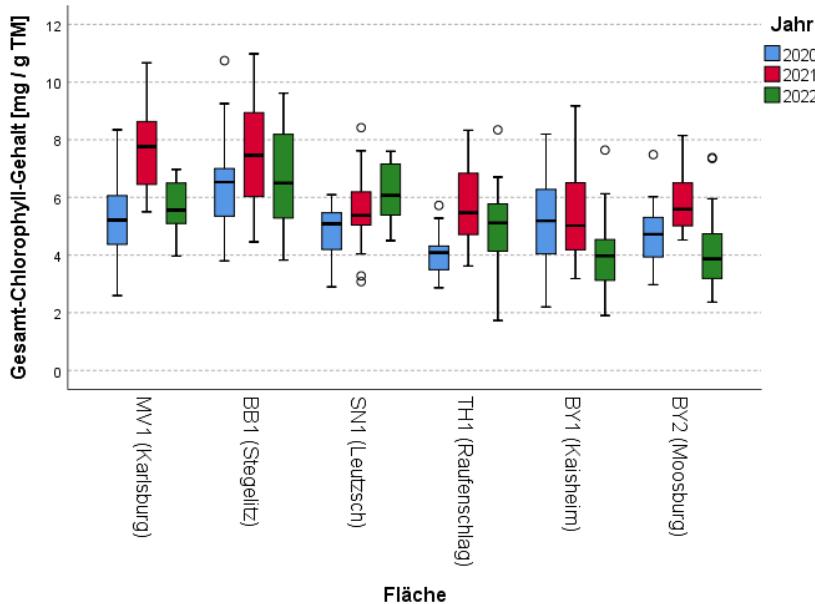


Abbildung 33: Vergleich der Flächen und des zeitlichen Verlaufes am Beispiel des Gesamt-Chlorophyll-Gehaltes. Es gibt starke Schwankungen zwischen den Jahren (2020 blau, 2021 rot, 2022 grün). Im Beispiel sind die Werte 2020 tendenziell am niedrigsten. Dieses einheitliche Bild ist jedoch nicht überall zu beobachten. Die Abbildung zeigt auch exemplarisch die Unterschiede zwischen den Flächen, welche in einer ähnlichen Größenordnung liegen wie die Schwankungen zwischen den Vegetationsperioden. (2020: N=15; 2021: N=30, außer N_{BY2}=13; 2022: N=30, außer N_{MV1}=26, N_{BB1}=29, N_{SN1} & TH1=27)

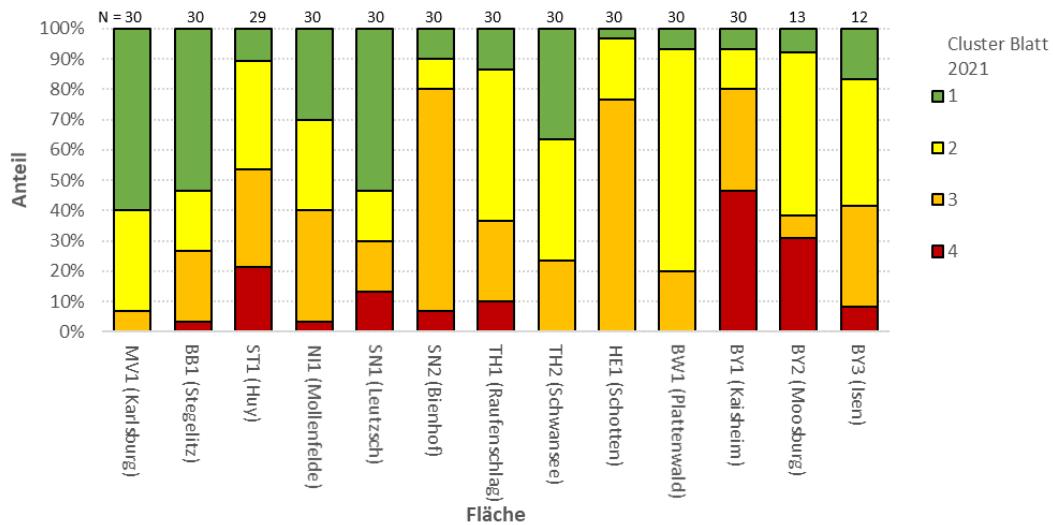


Abbildung 34: Zuordnung der einzelnen Eschen 2021 in die vier Cluster (1 grün, 2 gelb, 3 orange, 4 rot). Die Cluster definieren sich über unterschiedliche Faktorenwerte. Die Faktoren wiederum ergeben sich aus ausgewählten Biomarkern. Die Cluster entsprechen grob einer Zuordnung der physiologischen Konstellationen (1 günstig bis 4 ungünstig). Die Verteilung der Cluster auf den Flächen zeigt eine inhomogene Verteilung. Cluster 4 tritt auf vier Flächen nicht auf, macht aber auf BY1 beispielsweise mehr als 40 % aus.

2022 wurde eine Auswertung über alle Flächen und Jahre durchgeführt. Hierbei sollten Biomarker identifiziert werden, die unabhängig von Genetik und Umweltbedingungen Indikatoren für die Entwicklung der Vitalität sein können. Abbildung 35 zeigt am Beispiel des prozentualen Alanin-Anteils bezogen auf den Aminosäuregehalt, dass es solche Indikatoren gibt. Bei vielen dieser Biomarker ist die physiologische Rolle bei der Abwehrreaktion unklar, womit es sich teils auch um zufällig signifikante Zusammenhänge handeln kann. Außerdem dürfen hierbei nicht die zuvor genannten Ergebnisse außer Acht gelassen werden. Die Unterschiede zwischen den einzelnen IBF (Nährstoffverfügbarkeit, Wasserverfügbarkeit, Meteorologie etc.) sowie den Vegetationsperioden sind so erheblich, dass sie Zusammenhänge zwischen den Boniturparametern und den Blattinhaltstoffen maskieren. Die sehr geringe Anzahl vollständig vitaler Eschen (Stufe 0) über alle Flächen und Jahre hinweg, erschwert die Interpretation erheblich, da es dadurch für keinen Biomarker eine Referenz gab. Umgekehrt konnten aufgrund der großen Unterschiede und fehlenden einheitlichen Indikatoren keine Referenzwerte abgeleitet werden. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass auf biochemischer Ebene in den Blättern keine Abwehrreaktionen und keine spezifischen ETS-Stressreaktionen beobachtet werden konnten.

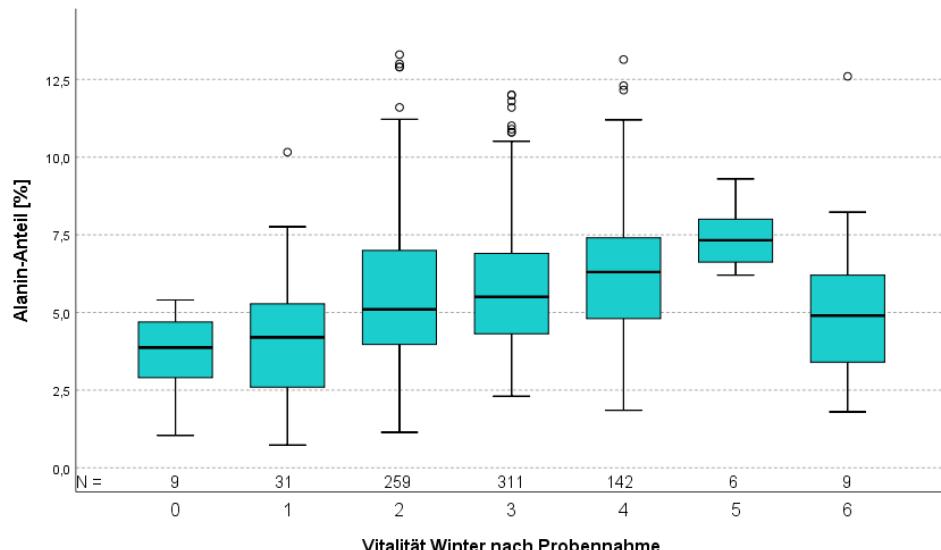


Abbildung 35: Verteilung der Alanin-Anteile bezogen auf den Gesamtgehalt der freien Aminosäuren in Bezug zur Vitalitätsstufe im Winter nach der Probennahme. Eschen der Stufe 0 und 1 wiesen signifikant geringere Alanin-Anteile auf als Bäume der Stufe 2 bis 4. Eschen, die im folgenden Winter bereits tot waren, hatten die höchsten Werte, während der Alaninanteil der Blätter keine Aussagekraft darüber hat, ob eine Esche in Kürze fällt (Stufe 6).

Bei den Analysen des Holzes aus dem Stammfuß wurde ein Fokus auf die Stammfußnekrosen gelegt. Mit den Daten der 13 IBF aus 2021 (keine Probennahme auf BW2 wegen Hochwasser) wurde ebenfalls eine Clusteranalyse durchgeführt. Die extrem hohen Phenolwerte auf zwei IBF prägten hierbei das Bild. Auch hier konnte kein Zusammenhang zum Schweregrad der Stammfußnekrosen hergestellt werden. Aus diesem Grund wurde ein methodischer Vergleich durchgeführt. Da Stammfußnekrosen der Hauptmortalitätsfaktor beim ETS sind, ist die Einschätzung der Standsicherheit der Individuen von Bedeutung, insbesondere in Hinblick auf die Verkehrssicherungspflicht. In Ergänzung zur Winterbonitur wurden an 29 ausgewählten Eschen Untersuchungen mit dem Resistografen durchgeführt. Es wurde deutlich, dass mehr als die Hälfte der Bäume – insbesondere mit stark geschädigter Krone – ohne ersichtliche Stammfußnekrose mindestens eine Schwächung, ein Drittel sogar bereits eine Fäule oder Höhlung aufweisen. Aufgrund des rasanten Absterbens der Eschen könnten solche Schäden auf eine mangelnde Standsicherheit in naher Zukunft hinweisen. Zusätzlich wurden von diesen Eschen 19 Individuen in acht Himmelsrichtungen im Stammfußbereich für biochemische Analysen beprobt. Es wurde mit diesen Daten ebenfalls eine Clusteranalyse durchgeführt und mit der Nekrosestufe (zusammengefasst aus Bonitur und Resistografie) des Baumes verglichen. Es zeigte sich eine deutliche Verschiebung der Cluster von Stufe 0 zu Stufe 2. Ein unmittelbarer Zusammenhang zwischen den Clustern und den Positionen im Stammfuß konnte nicht nachgewiesen werden. Innerhalb eines Stammes können also unterschiedliche Cluster auftreten, unabhängig von der Position oder dem Vorhandensein einer Nekrose. Diese Überprüfung war insbesondere wichtig, um auszuschließen, dass bestimmte Cluster beispielsweise ausschließlich innerhalb der Nekrose auftreten und damit nicht detektiert werden könnten, wenn die Probe neben der Nekrose entnommen wird. Es sei angemerkt, dass sich die biochemischen Analysen auf eine einzelne Fläche zu einem einzigen Zeitpunkt beziehen. Wie bei den Blattanalysen dargestellt, kann es große Unterschiede zwischen den Standorten und Jahren geben, auch bei den Biomarkern im Holz. Diese Parameter konnten im Rahmen des Projektes jedoch nicht ausreichend berücksichtigt werden. Auf biochemischer Ebene können die Ergebnisse deshalb bislang nur als Anhaltspunkte dienen. Die Resistografie hingegen bietet eine gute Ergänzung zur optischen Bonitur, vor allem bei Eschen mit stark geschädigter Krone und keinen erkennbaren Nekrosen. Dies ist besonders bei Straßen- oder Parkbäumen sinnvoll. Viele schwere Nekrosen lassen sich aber bereits durch eine sehr gründliche visuelle Prüfung der Stammfüße aufdecken. Eine Publikation zum Methodenvergleich ist in Vorbereitung.

Neben diesen beiden Schwerpunkten wurden weitere biochemische Analysen durchgeführt, um die Qualität der Ergebnisse sicherzustellen bzw. um neue Schnittpunkte mit anderen Partnern in FraxForFuture zu testen.

Um festzustellen, ob die aus der Lichtkrone entnommenen Blattproben uneingeschränkt miteinander verglichen werden können, wurden zehn Eschen in drei Höhen und vier Himmelsrichtungen in der Krone beprobt. Die Höhe erwies sich für fast alle Biomarker als bedeutend, ausgenommen die freien Aminosäuren, wo es nur vereinzelt Unterschiede gab. Die Himmelsrichtung hingegen hatte keinen signifikanten Einfluss auf die Biomarker (mit wenigen Ausnahmen). Die Proben aus der Lichtkrone wurden deshalb ohne Einschränkungen miteinander verglichen.

In Kooperation mit FraxPath wurden Aminosäurespektren von Hyphen von *H. fraxineus* angefertigt. Die Aufbereitung war an dieser Stelle zwar nicht optimiert, jedoch waren die Ergebnisse sehr eindeutig. Das Aminosäurespektrum des Pilzes ähnelte nicht nur dem des Nährmediums, sondern auch dem des Holzes von

F. excelsior. Das Spektrum der Blätter war hingegen ein völlig anderes. Auch *Diplodia spp.* wurde hierbei untersucht und zeigte ein ähnliches Spektrum wie *H. fraxineus*. Die Spektren von *Hymenoscyphus fraxineus* zeigten keine größeren Mengen einer Aminosäure, die in Eschen kaum oder gar nicht vorkommt, sodass infiziertes Material hierüber nicht ausfindig gemacht werden könnte. Die große Ähnlichkeit zwischen Holz- und Hyphenspektrum legt nahe, dass das eigentliche Ziel des Pilzes nicht die Blätter, sondern das Holz sind.

Mit dem Unterverbund FraxGen konnten Biomarker im Rahmen eines Infektionsversuches untersucht werden. Es wurde hier zwischen infiziertem Blatt (lokal), infizierter Pflanze (systemisch) und nicht infiziertem, aber verletztem Klon (Kontrolle) unterschieden. Außerdem gab es verschiedene Phänotypen („anfällig“ und „tolerant“) sowie verschiedene Herkünfte (Bayern und Mecklenburg-Vorpommern) mit insgesamt 10 Genotypen. Es wurden jeweils drei Replikate analysiert. Bei diesem Versuch konnten keine Biomarker identifiziert werden, die eine pilzspezifische Reaktion vermuten lassen. Einige Biomarker wie z. B. Kohlenhydrate, Stärke oder Gamma-Aminobuttersäure zeigten jedoch einen signifikanten Unterschied zwischen dem infizierten Blatt und der infizierten Pflanze an anderer Stelle. Dies legt nahe, dass viele biochemische Reaktionen bei Verletzungen lokal erfolgen und deshalb schwieriger zu erfassen sind. Es wurde auch deutlich, dass die Herkunft einen signifikanten Einfluss auf die Gehalte diverser Pigmente, einige freie Aminosäuren und Phenole hat, wo hingegen die Einschätzung der Anfälligkeit nur vereinzelt eine Rolle spielt. Der Genotyp scheint einen Einfluss auf die spezifische Antwort der Pflanze auf *H. fraxineus* zu haben. So zeigten drei Genotypen beispielsweise einen hochsignifikanten Anstieg der Chlorophyll a-Gehalte (Abbildung 36). Diese Ergebnisse verdeutlichen noch einmal die Komplexität der biochemischen Reaktionen der Eschen auf die Pilzinfektion.

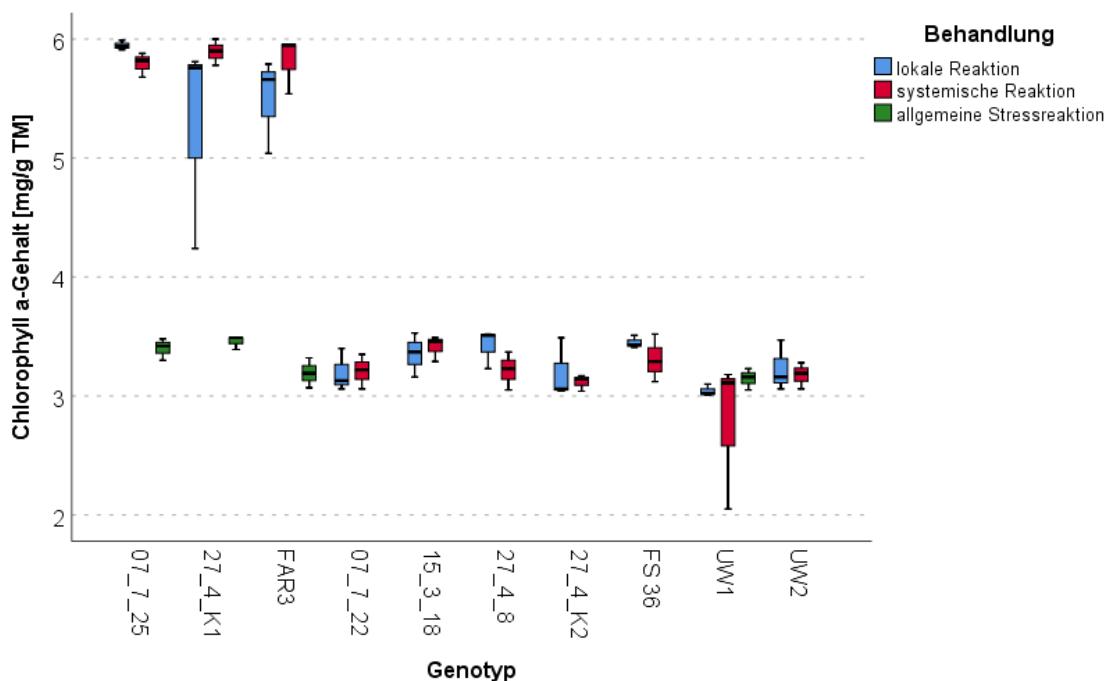


Abbildung 36: Chlorophyll a-Gehalte verschiedener Genotypen bei unterschiedlichen Behandlungen bzw. Messungen. Die lokale Reaktion zeigt die Gehalte der Blätter in unmittelbarer Nähe der künstlichen Infektion mit *H. fraxineus*, während die systemische Reaktion an derselben Pflanze an anderer Stelle gemessen wurde. Die allgemeine Stressreaktion zeigt die lokale Reaktion auf eine Verletzung ohne *H. fraxineus*. Der Genotyp 07_7_25 wurde phänotypisch als tolerant eingestuft, Herkunft Mecklenburg-Vorpommern; 27_4_K1 gilt als anfällig und stammt ebenfalls aus Mecklenburg-Vorpommern; FAR3 ist ein phänotypisch toleranter Stamm aus Bayern.

Mit FraxGen (HU Berlin) erfolgte ebenfalls eine enge Zusammenarbeit, indem Proben gemeinsam genutzt und ausgewertet wurden. Hierbei konnte die Zusammensetzung der in FraxMon untersuchten Phenolgruppen durch die Analysen der Einzelphenole der HU Berlin spezifiziert werden. Eine gemeinsame Publikation hierzu ist in Arbeit.

Innerhalb des Unterverbunds FraxMon wurde nach Korrelationen zwischen den am LFE ermittelten Chlorophyll-Gehalten und den an der KU Eichstätt-Ingolstadt gemessenen SPAD-Werten gesucht. Aufgrund der verschiedenen Messsysteme konnten diese jedoch nicht gefunden werden. Außerdem wurden mit dem IFF die Daten getauscht und nach Überschneidungen und Zusammenhängen zwischen den Daten gesucht. Die an der HNEE identifizierten Eschen mit möglichen Phenoleinlagerungen waren biochemisch unauffällig. Eine Erklärung dazu wurde bereits unter 6. gegeben. Da das Probenmaterial nicht identisch war und damit die von LFE untersuchten Triebe wahrscheinlich keine Abwehr- oder Schutzmechanismen gezeigt haben, überraschte dieses Ergebnis nicht.

8. Synthese

Das Monitoring der Esche im Rahmen von FraxForFuture ermöglichte ein vielschichtiges Verständnis zur Entwicklung des ETS in Deutschland und leistete wichtige Beiträge für künftige Handlungsempfehlungen. Auch wenn einige der Forschungsarbeiten (noch) nicht die gewünschten Ergebnisse erbracht haben, so konnten verschiedene Methoden für neue Einsatzgebiete erprobt werden und andere Erkenntnisse auch für ähnliche Arbeiten mit anderen Baumarten in der Zukunft genutzt werden.

Bei der Auswertung der bereits vor Projektbeginn vorliegenden WZE-Daten bestätigte sich, dass die Esche als Nebenbaumart nicht repräsentativ erfasst wird und diese Erfassung sehr ungleichmäßig erfolgt. Die Kronenverlichtung wurde als Parameter sowohl bei den Bonituren vom Boden aus als auch aus der Luft erfasst. Die terrestrischen Bonituren orientieren sich dabei an der Einstufung der WZE, was eine gute Vergleichbarkeit erlaubt und sich als ausgesprochen sinnvoll erwies, da die Kronenverlichtung eine gute erste Einschätzung des Zustandes der einzelnen Eschenkronen erlaubt.

Die Auswertung der WZE-Daten deckte einige Parameter auf, die die Ausbreitung des ETS oder die Schädigung durch *H. fraxineus* beeinflussen und künftig waldbaulich Berücksichtigung finden sollten. So spielt die Feuchtigkeit eine größere Rolle (Sporulationserfolg abhängig von Feuchtigkeit in Laubstreu im Hochsommer, feuchtere Standorte und feuchtere Witterungsbedingungen). Gleichermaßen konnte auch bei der Messung des Sporendrucks mittels Sporenfallen beobachtet werden. Die Kronenverlichtung innerhalb eines Bestandes hängt außerdem von der Eschendichte und dem Bestandesalter ab. Um den Fortschritt des ETS besser zu erfassen, wären neben der Kronenverlichtung auch die Absterbe- oder Ausfallrate interessant.

Um die Lücken in der Erfassung der Eschen künftig zu schließen und ein besseres Verständnis für das ETS zu entwickeln, wurden als Basis 14 Intensivbeobachtungsflächen eingerichtet, welche der Ausgangspunkt für die Arbeiten des Monitorings waren und darüber hinaus auch anderen Projektpartnern in FraxForFuture Freilanduntersuchungen und Beprobungen ermöglichte. Auf diesen 14 Flächen wurde auch der Boniturschlüssel erstmals angewendet und erprobt. Der Schlüssel umfasst eine Sommer- sowie eine Winteransprache, die differenziert verschiedene Aussagen über das ETS erlauben. Darüber hinaus wurde ein Schlüssel für die Verjüngung entwickelt. Eine wichtige Erkenntnis aus der Anwendung des Boniturschlüssels ist, dass der Winterzustand besser geeignet ist, schadensbedingte Veränderungen in der Kronenstruktur von Eschenbeständen zu erkennen, im Vergleich zu früheren Empfehlungen, die die Sommeransprache favorisierten. Merkmale wie Unregelmäßigkeiten in der Kronenperipherie, verstärkte Totäste, Aststümpfe und Wasserreiser sollten bei der Klassifizierung berücksichtigt werden. Die Ansprache von Kronenschäden durch das ETS ist zwar grundsätzlich auch im Sommer möglich, jedoch mit geringerer Sicherheit. Im Winterzustand sind Wasserreiser besonders deutlich zu erkennen, während sie im Sommerzustand eine dicht belaubte Krone vortäuschen können, was zu einer möglichen Überschätzung der Vitalität führen könnte. Bei den Bonituren der Alteschen erwies sich neben der bereits genannten Kronenverlichtung (als Vergleichsgröße zur WZE) auch die Stammfußnekrose als wichtiger Indikator, da das ETS oft Einfluss auf die Standsicherheit hat. Im fortgeschrittenen Stadium führen Stammfußnekrosen zu einer deutlichen und schnellen Beeinträchtigung der Stand- und Bruchsicherheit sowie zu einer Entwertung des Holzes im unteren Stammbereich. Betroffene Bäume stellen keine verkehrssichere Umgebung mehr dar. Untersuchungen zur Stand- und Bruchsicherheit durch Zugversuche haben gezeigt, dass bei einer starken Nekrose mit Hallimasch-Beteiligung, die ≥ 20 % des Stammumfangs umfasst, die Stand- und Bruchfestigkeit so stark reduziert ist, dass solche Eschen in der Nähe bestehender Infrastruktur entfernt werden sollten⁴⁸.

Im Projektzeitraum zeigte sich auf 6 von 11 Flächen eine Verbesserung des Vitalitätszustands der überlebenden Eschen. Wenn Absterbeereignisse mit einbezogen wurden, verschlechterte sich dennoch in fast allen Beständen der Zustand der Eschenpopulation. Es wurde hierbei deutlich, dass Standorteigenschaften eher eine untergeordnete Rolle spielten, während individuelle, genetische und phänotypische Eigenschaften den Schädigungsgrad beeinflussen (z. B. Genetik oder phänotypische Plastizität). Auch bei der Auswertung der historischen Luftbilder der IBF ergab sich über einen längeren Zeitraum eine zunehmende Verschlechterung des Eschenzustandes. Diese verlief allerdings regional unterschiedlich. Um diese Varianzen besser zu erklären, konnten weitere Faktoren wie Standorteffekte, Klima, Altersstruktur des Bestandes oder Genotypen flächenweise analysiert werden. Die Luftbildinterpretation würde eine systematische Erfassung der Baumvitalität ganz verschiedener Standorte in kürzerer Zeit ermöglichen. Zeitreihen könnten dann den Ausgangspunkt für eine solide Einschätzung der Entwicklung der Oberkronen geben. Allerdings würden Standortnekrosen damit nicht erfasst. So zeigte sich, dass die Bonituren von Luft und Boden aus nur bedingt ähnliche Ergebnisse liefern, wobei die Luftbilder ein tendenziell schlechteres Bild der Esche zeichnen. Außerdem ist es bislang schwer, Eschenkronen in stark durchmischteten, dichten Laubwäldern von den übrigen Kronen abzugrenzen und zu identifizieren. Dieses Problem ließ sich aber bereits im Projekt durch eine höhere Auflösung der Bilder reduzieren. Um überhaupt eine Einschätzung der Eschenvitalität anhand von Luftbildern vornehmen zu können, brauchte es auch hier zunächst einen Interpretationsschlüssel. Wie auch beim terrestrischen Boniturschlüssel gab es bereits einige Grundlagen, der Schlüssel selbst musste aber ebenfalls angepasst und auf Flächen in ganz Deutschland erprobt werden. Hierbei wurde auch ein Baumartenkatalog

⁴⁸ Heinzelmann R, Spiegel P, Prospero S, Queloz V, Hintze T (2023): Hallimaschpilz setzt den Eschen ebenfalls stark zu. Wald 1349 und Holz 104: 22-25

zur Identifizierung der Eschen entwickelt. Dieser enthält einen Bestimmungspfad mit einer Übersicht der Mischungshäufigkeiten der Esche und typischer mit ihr auftretender Baumarten sowie eine tabellarische Einschätzung der Anwendbarkeit in Abhängigkeit der Kronenverlichtung.

Als schwieriger erwies sich die Methodenentwicklung für eine bundesweite Modellierung von Eschenpotentialflächen und die Modellierung der potentiellen Eschenflächen. Es konnten die Anforderungen an die Referenzdaten definiert und ein Verfahren zum Aufbereiten dieser entwickelt werden. Darauf aufbauend wurde ein Workflow zur Identifizierung von Eschenpotentialflächen und zur Modellierung tatsächlicher Eschenvorkommen erarbeitet. Das entstandene Modell wies allerdings eine geringe Genauigkeit auf und tendierte dazu, das Vorhandensein von Eschen eher zu unterschätzen. Es war deshalb im Rahmen des Projektes noch nicht möglich, genaue Aussagen über das Vorhanden- oder Nichtvorhandensein einer bestimmten Baumart auf einer Fläche zu treffen. Hinzu kam, dass die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Eschen mit einer unbekannten Unsicherheit behaftet ist. Deshalb sind hier weitere Verbesserungen erforderlich. Da im Rahmen des Projektes keine automatisierte, großflächige Erfassung von tatsächlichen Eschenvorkommen basierend auf Sentinel-2-Satellitendaten mit ausreichender Verlässlichkeit sinnvoll war, wurde auch kein Inventurdesign entwickelt, um Eschenvorkommen an definierten Stichprobenspunkten zu erfassen. Aus diesem Grund muss das BWI-Stichprobensystem weiterhin genutzt werden, bis das Modell vollständig entwickelt wurde.

Für ein detaillierteres Bild des Schadgeschehens und um die Prozesse des ETS besser zu verstehen, wurde neben den angeführten Bonituren eine Vielzahl weiterer terrestrischer Untersuchungen durchgeführt. Dazu gehörten die Erfassung der Phänologie (u. a. Blattaustrieb und -seneszenz), mikroskopische Analysen befallenen Gewebes sowie biochemische Analysen zur Vitalitätsdiagnostik. Hierbei zeigte sich, dass die mit dem SPAD ermittelten Chlorophyllgehalte der Blätter sowie die Pollenviabilität und -keimung nicht als Resistenzindikator herangezogen werden können. Um weniger anfällige Eschen zu identifizieren, könnte der Zeitpunkt des vollständigen Blattverlustes als Indikator dienen, da stärker geschädigte Bäume in der Regel eine verkürzte Vegetationsperiode aufweisen. Diese Beobachtung konnte aber nur auf wenigen Flächen und in wenigen Jahren durchgeführt werden und sollte durch weitere Beobachtungen überprüft werden. Gleichermaßen gilt auch für die im Zusammenhang mit den Bonituren erfassten Sporenmessungen. Auch hier könnte eine künftige Erfassung und Regionalisierung der Sporenkonzentration zu einem besseren Verständnis für das saisonale Ausbreitungsmuster der Sporen in Deutschland beitragen. Dadurch können auch wesentliche Treiber für diese Muster erkannt werden, was konkrete Prognosen ermöglicht.

Bei den mikroskopischen Analysen zeigte sich, dass angewendeten labordiagnostischen Verfahren sich zur Differenzierung von Besiedlungs- und Abwehrstrategien der Pathogenese des ETS eigneten. Allerdings konnten im Rahmen des Monitorings der IBF keine Korrelation zwischen der terrestrischen Bonitur und mikroskopisch sichtbaren Symptomen festgestellt werden. Wo nekrotisiertes Gewebe innerhalb der Rinde mikroskopisch sichtbar war, wurde es durch ein neu gebildetes Gewebe dem sogenannten Wundperiderm begrenzt. Allerdings beschränkten sich sichtbare Abwehrmechanismen auch ausschließlich auf das Rindengewebe. Auch trotz offensichtlicher Befallssymptome war das Vorkommen von Pilzhypfen im Probenmaterial sehr gering und beschränkte sich auf das verholzte Gewebe. Hierbei kam es zur systemischen Hyphenausbreitung im verholzten Trieb mit sehr kleinen, schwer zu detektierenden Hyphen.

Bei befallen Trieben mit mikroskopisch sichtbaren Abwehrmechanismen wurden phenolische Einlagerungen vermutet. Eine Überprüfung konnte dies jedoch nicht bestätigen. Insgesamt erwiesen sich auch die Biomarker als ungeeignet für die Einschätzung des Eschentreibsterbens und bislang auch für die Identifizierung potenziell resistenter Eschen. Die Analysen der Triebe wurden kurzfristig eingestellt, da hier keine Biomarker für eine mögliche Aussage über den Vitalitätszustand gefunden wurden. Bei den Analysen der Blätter zeigten sich starke Varianzen zwischen den Vegetationsperioden und Flächen, aber verhältnismäßig geringe Unterschiede zwischen den Vitalitätsstufen. Hier konnten einige potenzielle Indikationen identifiziert werden, allerdings haben diese eine eher geringe Aussagekraft aufgrund der Überlagerung durch meteorologische Effekte, Standortsbedingungen oder Genetik. Wie auch im Zusammenhang mit den Auswertungen der WZE-Daten und der Luftbilderfassung wäre hier eine Analyse der verschiedenen Faktoren im Zusammenhang sinnvoll, um die Reaktionen der Esche zu verstehen und Biomarker für die Vitalitätsdiagnostik nutzen zu können. Auch hier waren sowohl durch die Überlagerungen als auch aus denselben Gründen, warum mikroskopisch kaum Infektionen und Abwehrreaktionen gesehen wurden, so gut wie keine Schutzmechanismen ausfindig zu machen. Möglicherweise ist bei biotischem Stress eine biochemische Abwehrreaktion des Baumes eher lokal als systemisch. Dass keine Gegenreaktionen gefunden wurden, stützt aber auch die These nach einem ressourcenabhängigen Überlebens- bzw. Absterbeprozess, ggf. unter Beteiligung von phytotoxischen Verbindungen. Hierfür gibt es bereits ältere Befunde von Anderson et al. (2010)⁴⁹ und Cleary et al. (2014)⁵⁰, die zeigen konnten, dass in infiziertem Blattmaterial die Toxinbiosynthese insbesondere für Viridiol aktiviert

⁴⁹ Andersson PF, Johansson SBK, Stenlid J, Broberg A. Isolation, identification and necrotic activity of viridiol from *Chalara fraxinea*, the fungus responsible for dieback of ash. *Forest Pathology* 2010; 40:43–46.

⁵⁰ Cleary MR, Andersson PF, Broberg A, Elfstrand M, Daniel G, Stenlid J. Genotypes of *Fraxinus excelsior* with different susceptibility to the ash dieback pathogen *Hymenoscyphus pseudoalbidus* and their response to the phytotoxin viridiol - A metabolomic and microscopic study. *Phytochemistry* 102:115–125.

war, was Nekrosen im Eschengewebe auslösen kann. Dabei ist nicht auszuschließen, dass Mykotoxine auch andere Pflanzengewebetypen resp. Stoffwechselprozesse schädigen.

9. Ausblick

Das Monitoring von Nebenbaumarten wird durch das klassische forstliche Umweltmonitoring nicht ausreichend abgedeckt. Dies kann zu Verzögerungen bei der Erkennung, der Ausbreitung und der Schwere neuer Krankheiten führen. Eine großflächigere, deutschlandweit standardisierte und zumindest in Teilen automatisierte Erfassung und Identifizierung von Beständen könnte dieses Problem lösen. FraxMon hat hierzu einen Beitrag geleistet und für die Esche sowohl einen terrestrischen als auch luftbildbasierten Interpretationsschlüssel entwickelt. Da in Luftbildern relevante Informationen verborgen bleiben, kann auch der terrestrische Boniturschlüssel künftig einen wichtigen Beitrag leisten, um den Zustand der noch bestehenden Eschenbestände besser einschätzen zu können. Erfahrungen aus der Entwicklung des Schlüssels können ebenfalls in künftige Untersuchungen mit anderen Baumarten übertragen werden. Hier war beispielsweise die interdisziplinäre und deutschlandweite Zusammenarbeit ein wichtiges Erfolgsmodell.

Einige der angewendeten Methoden erwiesen sich für das Monitoring der Esche als ungeeignet. Daraus lässt sich keinesfalls eine allgemeine Ungeeignetheit ableiten. Vielmehr zeigt es, dass bei komplexen, unbekannten und wenig erforschten Schadbildern zunächst eine breitere Palette potenzieller Monitoringmethoden eingesetzt werden sollte, um den Schadensverlauf dennoch schnell präzise einschätzen und geeignete Gegenmaßnahmen entwickeln zu können. Ein vertieftes Monitoring des ETS ist auch künftig wichtig, wobei einige Verfahren hierbei nicht mehr priorisiert verfolgt werden müssen (Mikroskopie eher zum Verständnis des Schadverlaufes, Biomarker zum Beispiel begleitend bei Samenplantagen oder Klonarchiven), andere weiter adaptiert bzw. optimiert werden sollten (Identifizierung von Eschenpotenzialflächen) oder ausgedehnt und die Ergebnisse überprüft werden sollten (z. B. Ansprache mit Luftbild-Interpretationsschlüssel, Blattverlust als Indikator).

Auch wenn die angewendeten Methoden das Monitoring verbessern sollten, wurden teilweise gleichzeitig relevante Erkenntnisse gewonnen. Mikroskopie und Biomarker setzten beispielsweise voraus, dass es Abwehrmechanismen gibt oder zumindest starke Reaktionen auf eine Krankheit. Die Ergebnisse zeigten aber, dass die Esche auf den invasiven Pilz nicht so reagiert wie es bei Stress von anderen Baumarten bekannt ist. Die Mechanismen, die tatsächlich zum Absterben der Eschen führen, sind weiterhin unklar, waren aber auch nicht Fokus dieses Projektvorhabens. Ein besseres Verständnis darüber würde jedoch auch dazu beitragen, effektiv gegen Schädigungen vorzugehen oder tolerante Individuen zu identifizieren.

Es hat sich gezeigt, dass große Verbundprojekte wie FraxForFuture zwar einen hohen organisatorischen und koordinativen Aufwand mit sich bringen, jedoch eine enge interdisziplinäre Zusammenarbeit ermöglicht wird, die es im Laufe eines Projektes erlaubt, die neuesten Erkenntnisse oder Hypothesen kostengünstig und unkompliziert zu überprüfen oder Probleme durch Erfahrung und Unterstützung anderer Partner schneller zu lösen. Dadurch konnten innerhalb kürzester Zeit eine Vielzahl von Erkenntnissen generiert werden und das Potenzial der einzelnen Partner optimal ausgeschöpft werden.

In Zukunft sollte das Monitoring der Esche sich darauf konzentrieren, die Krankheitsentwicklung weiter zu verfolgen, aber auch die Abwehrmechanismen zu untersuchen und Maßnahmen zur Prävention zu entwickeln. Hierbei können sowohl die Optimierung bzw. weitere Entwicklung der in FraxMon eingesetzten Methoden helfen, aber auch neue Methoden aufbauend auf den aktuellen Erkenntnisstand hilfreich sein. Die weitere enge Zusammenarbeit mit anderen Disziplinen ist insbesondere für Handlungsempfehlungen unerlässlich. Eine Zusammenfassung der praxisrelevanten Erkenntnisse und möglicher künftiger Arbeiten ist im Kapitel 2 „Verwertung“ zu finden.

2. Verwertung

Praxistransfer

Der entwickelte und erprobte terrestrische Boniturschlüssel eignet sich zur Einschätzung des Schadfortschritts an Eschen im Winter und im Sommer sowie an Jungeschen. Die in Begutachtung befindliche Publikation „Ash dieback assessments on intensive monitoring plots in Germany“ (Fuchs et al, in prep.) evaluier u. a. den Boniturschlüssel in Hinblick auf die Vergleichbarkeit der Kronenschadstufen mit dem Parameter „Kronenverlichtung“ der WZE, um die Nutzung beider Instrumente zum Eschenmonitoring in Zukunft zu gewährleisten. Die Erkenntnisse aus den Auswertungen der WZE- und BZE-Daten finden unter anderem Eingang im projektweiten Leitfaden zum Umgang mit dem ETS (zurzeit im Druck durch die FNR) und wurden in den Waldzustandsberichten der nordwestdeutschen Bundesländer für das Jahr 2023 in einem eigenen Artikel zum Projekt FraxForFuture veröffentlicht. Die Arbeit auf den Flächen der WZE und den IBF hat die Anwendung des Boniturschlüssels für die forstliche Praxis erprobt und optimiert und mündet in einer zweiten Auflage desselben.

Zur Resistenzbeurteilung der Einzelbäume kann eine zusätzliche, regelmäßige Beobachtung der Phänologie, vor allem der Herbstphänologie hilfreich sein, um anfällige und weniger anfällige Eschen zu diskriminieren. Ferner zeigte sich, dass stärker geschädigten Bäumen eine kürzere Assimilationsperiode zur Verfügung steht. Zur Beurteilung des Infektionsdrucks eignet sich ein erweitertes Sporenmonitoring. Dies erlaubt eine Aussage auf regionaler Ebene und kann zur Einschätzung der Entwicklung der Eschen in einem Bestand genutzt werden. Weniger geeignet für das Monitoring des ETS ist die Zählung der Fruchtkörper, da sich gezeigt hat, dass die Anzahl der Pilze nicht ausschlaggebend für den Sporendruck ist und meteorologische Parameter einen wesentlichen Einfluss auf die Sporenenfreisetzung und -dispersion ausüben können. Die mikroskopische Analytik eignet sich ebenfalls als Werkzeug der Schadstufenerhebung des Baumkronenzustandes der Eschen nur bedingt, denn im abgeschlossenen FraxMon-Projekt konnten keine Korrelationen zwischen Vitalitätsstufen bzw. Baumkronenzustand und mikroskopischen Analysen festgestellt werden. In diesem Zuge ließen sich auch keine Standortunterschiede bzgl. der beobachteten Symptomatik erheben. Hier macht die mikroskopische Analytik nur Sinn, wenn gezielt auch makroskopisch symptomatisches Probenmaterial untersucht wird, da vitale Triebe lichtmikroskopisch keine holzanatomischen Auffälligkeiten zeigten. Die mikroskopischen Untersuchungen konnten allerdings die Morphologie des Erregers des ETS im Wirt visualisieren. Dies ermöglicht die Gewinnung von Erkenntnissen für die Lehre in zwei Bereichen: Erstens, wie sich der Pilz differenziert innerhalb des Wirtes ausbreitet und zweitens, welche morphologischen Merkmale für die visuelle Detektion des Pilzes geeignet sein könnten.

Die Mechanismen des Eschentreibsterbens bleiben trotz erheblich verbessertem physiologischem Wissen unklar. Bisherige Methoden konnten weder nennenswerte pilzinduzierte Abwehrmechanismen noch unspezifische Stressreaktionen nachweisen. Dies erschwert die Identifizierung resisterter Eschen und bestätigt die rasante Mortalitätsentwicklung. Überlebensstrategien der Esche konzentrieren sich auf die Bildung neuer, noch nicht infizierter Triebe wie Wasserreiser und Sekundärkronen.

Der im Rahmen dieses Projektes entwickelte fernerkundungsbasierte Ansatz erlaubt die Generierung von hoch standardisierten Informationen zur flächigen Überwachung der Entwicklung des ETS. Diese standardisierte Quantifizierung der Beobachtungen ermöglicht den Vergleich des ETS-Verlaufs unter unterschiedlichen Wachstumsbedingungen auf unterschiedlichen Standorten, wie Temperatur, Geologie, Bodenart und -bewirtschaftung, Wasserverfügbarkeit, Vorhandensein von Übertragungsvektoren und botanischer Zusammensetzung. Der Vergleich der Performance von genotypisch unterschiedlichen Individuen und die Identifizierung von toleranten oder resistenten Bäumen profitiert ebenfalls von dieser Art Information. Dasselbe gilt für die Analyse der Reaktionsmuster von Individuen unterschiedlicher Größe oder unterschiedlichen Alters. Die angewandten fernerkundungsbasierten Ansätze erlauben somit eine präzisere Charakterisierung des ETS und seines Verlaufs. Die Interpretationsschlüssel für Stereo-Luftbilder zur Identifizierung von Eschen und zur Vitalitätsansprache von Eschen wurden in die neue Auflage der FNR Veröffentlichung „ESCHENTREIBSTERBEN Kriterien zur Schadensbonitur an Eschen“ integriert und stehen zur Veröffentlichung an. Somit wurde hier die Lücke geschlossen. Erstmals liegt ein Luftbildschlüssel für die Esche für den praktischen Einsatz vor. Weitere erfolgte und geplante Publikationen sind im Kapitel 4. „Veröffentlichungen“ zu finden.

Wirtschaftliche Erfolgsaussichten

Die Frage der Standortsabhängigkeit stellt sich heute schon bei der Jungbestandspflege und in Zukunft bei der Wiederaufnahme der Pflanzung von potentiell toleranteren Eschen. Hierbei sollten stark vernässte Bereiche genauso vermieden werden, wie die Schaffung von lokal hohen Eschendichten (Reinbestände, Eschenhorste oder -reihen).

Die Risikobewertung für das ETS wurde durch die Entwicklung des Boniturschlüssels verbessert. Die Relevanz von Stammfußnekrosen der Stufe 2 für die Standsicherheit von Eschen konnte bei der Auswertung der IBF-Bonituren direkt quantifiziert werden. Die Detektion und Bewertung von Stammfußnekrosen gestalten sich anspruchsvoller als beim Kronensterben, konnten aber durch intensive zusätzliche Forschung ebenfalls verfeinert werden. Diese Erkenntnis erhöht den Wert des Boniturschlüssels für die forstliche Praxis – insbesondere bei der Beurteilung der Wege- und Arbeitssicherheit sowie für Baumkontrollen und risikoarme Waldarbeit. Das terrestrische Monitoring des Infektionszustandes von Alteschen ermöglicht insgesamt eine rechtzeitige Holzernte zur Werterhaltung.

Es konnten durch mikroskopische Analysen die Besiedlungsstrategien des Pathogens und Abwehrmechanismen aufgezeigt werden. Der Pilz breitet sich systemisch im verholzten Gewebe aus. Ein holzabbauendes Potential des Pilzes wurde dabei bisher nicht sichtbar. Auffallende Verfärbungen im verholzten Spross gehen aber mit der Nekrotisierung von Rindengewebe einher und übertreffen diese in ihrer axialen Ausdehnung sogar. Diese Verfärbungen könnten eine optische Wertminderung für die holzverarbeitende Industrie nach sich ziehen. Die sich potenziell ändernden physikalisch-technologischen Eigenschaften von Eschenholz aus ETS-Beständen müssten dahingehend noch untersucht werden (siehe Anschlussfähigkeit Holzqualität).

Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten

Im Rahmen des Projekts wurden für die biochemischen Analysen bedeutende Fortschritte in der Methodenentwicklung erzielt. Die aufwendige Probennahme für präzisere physiologische Untersuchungen wurde optimiert und die Sinnhaftigkeit des hohen Aufwands überprüft. Die Himmelsrichtung der Zweigposition hat nur vereinzelt Auswirkungen auf die Varianz der Blattinhaltsstoffe. Die Erweiterung des Monitorings durch biochemische Analysen auf Eschenholz eröffnet neue Einblicke in die biochemischen Prozesse bei Eschen. Allerdings erwiesen sich die untersuchten Bioindikatoren zur Beschreibung der Baumvitalität als ungeeignet und es wäre eine erheblich intensivere Forschung nötig, um präzisere Indikatoren zu identifizieren. Biochemische Analysen aus genetischen Versuchen bestätigen den Einfluss des Genotyps auf physiologische Experimente. Insgesamt verdeutlichen diese Ergebnisse die Komplexität der biochemischen Reaktionen der Eschen auf das ETS und die Schwierigkeit, einheitliche Biomarker zu finden.

Bei den mikroskopischen Analysen konnten ebenfalls Methoden gefunden werden, mit deren Hilfe sich Pilzhyphen in verschiedenen Strukturen im Xylem detektieren ließen. Im Zuge dessen konnten morphologische Erkenntnisse zum Erreger des ETS gewonnen werden, wie beispielsweise über Hyphendurchmesser und Expansion des Pilzes im Wirt.

Abwehrmechanismen des Wirtes gegen den Pilz konnten nur im Rindengewebe festgestellt werden. Das zeigte sich durch Nekrosen sog. hypersensitive Reaktionen, die sich lokal über ganze Rindenbereiche inklusive des Cambiums ausdehnen. Das nekrotisierte Gewebe innerhalb der Rinde wird durch ein neu gebildetes Wundperiderm begrenzt.

Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Die entstandenen Wissenschaftskooperationen eröffnen Möglichkeiten für weitere interdisziplinäre Projekte. Diese Zusammenarbeit könnte dazu beitragen, Schutz- und Abwehrmechanismen besser zu verstehen, widerstandsfähige Individuen zu identifizieren und effizientere Untersuchungsstrategien zu entwickeln.

Die eingerichteten IBF bieten nicht nur eine Grundlage für aktuelle Forschung, sondern auch für zukünftige Studien. Bei den Arbeiten auf den IBF wurden umfangreiche Standortskartierungen und Bodenprobenahmen durchgeführt. Die dabei gewonnenen Daten stehen allen anderen Projektpartnern, die ebenfalls auf diesen Flächen gearbeitet haben, für Auswertung und Interpretation ihrer Ergebnisse zur Verfügung. Außerdem bieten die IBF auch eine Plattform für Folgeuntersuchungen und -experimente. So ist die fortlaufende Überwachung des Eschenzustands durch Fortsetzen der Zeitreihenstudie zum Vitalitätszustand beziehungsweise im Rahmen der Waldzustandserhebung auf vielen IBF gewährleistet. Dies ermöglicht eine umfassende Dokumentation der Dynamik des ETS über Raum und Zeit. Darüber hinaus nutzen die Projekte „FraxVir“ und „FraxHeal“ voraussichtlich ausgewählte IBF weiter. Zusätzlich sollen alle IBF, die zu Projektende noch Bestand haben, für das Folgeprojekt „FraxRecovery“ (bei positiver Bewilligung oder den sich daraus ergebenden kleineren Projekten) weitergenutzt werden.

Zudem wurden im Rahmen unseres bundesweiten Monitorings neue Erkenntnisse gesammelt, die sich in Folgeanträgen gewinnbringend vertiefen lassen.

Die entwickelten Luftbild-Interpretationsschlüssel für die Identifikation und Bonitierung von Eschenkronen bieten eine Basis für die fernerkundungsgestützte Überwachung weiterer Schaderreger bzw. Stressfaktoren. Bei der Erzeugung und Anwendung des Ansatzes wurden wertvolle Erfahrungen gesammelt, wissenschaftliche und technische Lücken und Gelegenheiten erkannt und Ideen für mögliche zukünftige Ansätze generiert. Eine davon ist die Integration der Fernerkundungstechnik in weiteren Monitoringnetzen, wie WZE, BWI und Level-II, die dadurch räumlich, zeitlich und inhaltlich erweitert werden können.

Im Bereich des Sporendruckes und des Pilzwachstums sind viele Fragen offen, die für die Praxis eine besondere Bedeutung haben könnten. Es sollte der Hypothese, dass sich in stark geschädigten Beständen der Infektionsdruck aufgrund der geringeren Blattbiomasse verringert, nachgegangen werden. Um eine mögliche allophatische Wirkung anderer Pflanzen auf den Pilz und den Einfluss unterschiedlicher Bodenbeschaffenheiten abzuschätzen, sollte das Intensivmonitoring, welches 2022 auf der Fläche BY1 durchgeführt wurde, fortgeführt und auf andere Flächen übertragen werden. Um mehr Wissen zum Fruchtkörperwachstum und dem Zeitpunkt der Sporenlösung zu generieren, wäre ein experimenteller Ansatz geeignet. Dafür könnten im Wachstumsschrank Fruchtkörper gezüchtet, die Entwicklung dokumentiert und die Sporenbelaufung gemessen werden. Zudem wäre es wichtig, das gewonnene Wissen in einem weiteren Schritt zu regionalisieren, wodurch sich Erkenntnisse auf Landschaftsebene ergeben. Die Detektion von Ascosporen ist von großer Bedeutung für das Management des ETS, wobei durch ein umfassendes Monitoring der Infektionsdruck unabhängig von Einzelbaumanalysen ermittelt werden kann. Da der Klimawandel sowohl Wirt als auch Pathogen beeinflussen wird, sind Modellierungen zur künftigen Verbreitung und Bestimmung günstiger Eschenstandorte essenziell.

Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Krankheit mit einer erheblichen physiologischen Relevanz für die Esche einhergeht und künftige physiologische Forschung intensiviert werden sollte. Insbesondere, dass stärker geschädigte Eschen eine kürzere Assimulationsperiode haben und dadurch z. B. den Wasser- und Kohlenstoffhaushalt beeinflusst wird, untermauert diese Bedeutung. Es wären spezielle Untersuchungen zu

den Wasserreisern stark geschädigter Bäume anzudenken, da so deren Einfluss auf die Chlorophyllwerte besser abgeschätzt werden kann. Im Rahmen des Projektes wurde bei den physiologischen Untersuchungen besonders darauf geachtet, keine Wasserreiser in die Messungen einzubeziehen, aber ein zusätzlicher expliziter Vergleich zwischen Wasserreisern und anderen Trieben würde neue Erkenntnisse bringen.

Der Einfluss des Genotyps auf die Biomarker und welche Rolle diese bei den Reaktionen auf das ETS spielen, sollte ebenfalls genauer untersucht werden; insbesondere da bei biotischen Schaderregern zwischen lokalen und systemischen Reaktionen unterschieden werden muss. Außerdem sollte besonders der Toxin-Hypothese weiter nachgegangen werden. Die Synthese zwischen biochemischen Analysen und Hyperspektralbefliegung könnte darüber hinaus vorangetrieben werden, um kausale Zusammenhänge zwischen physiologischen Vitalitätsindikatoren und Fernerkundungsdaten zu identifizieren. Hierzu sind aber zuvor vertiefende Untersuchungen und Verbesserungen auf beiden Seiten erforderlich.

Die systemische Besiedlungsstrategie des Erregers könnte mittels Tomographie (SR μ CT) räumlich analysiert werden. Mikroskopische Untersuchungen inkulierter Eschen unter definierten Bedingungen könnten weitere Erkenntnisse zum Hyphenwachstum, deren Ausbreitung über definierte Zeiträume, initiale Befallswege (Stomata/Lentizellen), Zuwachsanalysen und Resistenzmechanismen verschiedener Genotypen oder Eschenarten wie *Fraxinus mandschurica* liefern. In diesem Zuge könnte die Ausbreitungsrichtung der Infektionswege, welche bisher eher punktuell betrachtet wurde, mehr in den Fokus rücken. Hier wäre auch eine räumlich/zeitliche Kopplung mit biochemischen Analysen an selbigen Pflanzen vor dem Hintergrund morphologisch struktureller Veränderungen von besonderem Interesse. Untersuchungen zu Inkulationen via Lentizellen an verschiedenen Genotypen unter Einbeziehung der Lentizellendichte könnten Aufschluss darüber geben, welche Genotypen besonders resistent gegenüber Infektionen am Stammfuß sind. Die Lentizellendichte verschiedener Genotypen könnte somit als weiteres Selektionsmerkmal für die Resistenzforschung dienen.

Beobachtungen juveniler Eschen mit ETS-Symptomen zeigten häufig einen Holzzuwachseinbruch. Eine statistische Erhebung zu dieser Beobachtung konnte im Projekt nicht durchgeführt werden. Folglich könnte eine Korrelationsanalyse zwischen Zuwachseinbruch und Pathogenbefall aufschlussreiche Ergebnisse liefern. Neben der gezielten Betrachtung des Holzzuwachses, könnten an Eschen der Einfluss des ETS und/oder Stammfußnekrosen bezüglich der holztechnologischen Eigenschaften überprüft werden. Dies ist nicht nur relevant für Stand- und Verkehrssicherheit befallener Eschen, sondern auch für die holzverarbeitende Industrie von Bedeutung. Hierzu müssten bspw. Dichtemessungen, Druck- und Biegefestigkeiten an klein dimensionierten Prüfkörpern ermittelt werden und mit bekannten holztechnologischen Kennwerten hinsichtlich der Festigkeitseigenschaften verglichen werden.

Ein besonderer Fokus des interdisziplinären Monitorings sollte auf die Detektion der SFN liegen, da diese häufig und bei unzureichender Überwachung unerwartet zum Ausfall der Eschen führen. Zudem lassen sich die gewonnenen Erkenntnisse und erlernten Abläufe dieses Demonstrationsvorhabens gut für Folgeprojekte zur Bekämpfung anderer Baumpathogene nutzen.

Durch die Einbindung in der Lehre (u. a. im Mastermodul Landschaftsanalyse und Naturschutz an der KU Eichstätt-Ingolstadt) und die Vergabe von Qualifizierungsarbeiten wie Promotionen, konnte das Wissen von Studierenden um das Thema Eschentreibsterben/Pflanzenphysiologie/Aerobiologie erweitert werden. Zweifelsfrei wurde durch das Verbundvorhaben auch die Kooperation zwischen Ressortforschungseinrichtungen, Universitäten und Praxispartnern für alle Beteiligten gewinnbringend gefördert.

3. Erkenntnisse von Dritten

Es sind keine relevanten, dieses Forschungsvorhaben beeinflussenden Ergebnisse durch die fortlaufenden Recherchen bekannt geworden.

4. Veröffentlichungen

- <https://mediathek.fnr.de/eschentreibsterben-kriterien-zur-schadensbonitur-an-eschen.html>
- Adler, P., Beckschäfer, P., Gacitua, V., Herzog, A., Jütte, K., Kirchhöfer, M., Moritz, J., Ponce de Leon, F. (geplant für 2024): A Remote Sensing Based Monitoring System for Ash Dieback. JPDP
- Fuchs S. (geplant für 2024): Ash dieback disease progression in dependence of time, space, site, stand and weather based on defoliation data from the German level I forest monitoring.
- Fuchs S., Häuser H., Peters S., Knauf L., Rentschler F., Kahlenberg G., Paar U., Evers J., Kätzel R., Langer G.J. (in review): Ash dieback assessments on intensive monitoring plots in Germany. JPDP
- Fuchs S., Peters S., Beckschäfer P., Osebold J., Fey C., Langer G.J., Nagel R.V., Höltken A.M. (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.

<https://doi.org/10.5281/zenodo.8431068>,
<https://doi.org/10.5281/zenodo.8412978>,
<https://doi.org/10.5281/zenodo.10027000>,
<https://doi.org/10.5281/zenodo.10082927>

(Dieser Artikel ist in nahezu gleicher Form in den Waldzustandsberichten von vier Bundesländern erschienen)

- Häuser, H.; Kätzel, R. (*in prep.*): Comparative studies on the identification and assessment of basal stem necroses in ash trees (*Fraxinus excelsior*) against the backdrop of the European ash dieback
- Häuser H. (*in prep.*): Biomarker analyses in the context of ash dieback: Insights into the complexity of metabolites with a focus on site dynamics and yearly variations.
- Kahlenberg, G. et al. (*in prep.*): Can phenology and chlorophyll be used for indicating the susceptibility of common ash to ash dieback?
- Kahlenberg, G. et al. (*in prep.*): The effects of meteorology on airborne *Hymenoscyphus fraxineus* spore concentrations.
- Kahlenberg, G. et al. (*in prep.*): Assessment of the infection pressure on ash (*Fraxinus excelsior L.*) based on investigations of *Hymenoscyphus fraxineus* and its spore concentrations across Germany.
- Kahlenberg, G. et al. (*in prep.*): Does the health condition of the common ash tree affect its pollen viability?
- Köhler, A.; Häuser H. (*in prep.*): Analysis of phenols in leaves of ash trees (*Fraxinus excelsior L.*) from different monitoring sites in Germany using photometric and HPLC-determination: Variability by location, year, and crown vitality.
- 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>
- Lehrbaß, L. (2022): Morphologie Eschentriebsterben: Anwendung der 3D-Bildanalyse zur Detektion und Interpretation des Befallsbildes von *Hymenoscyphus fraxineus* / *Chalara fraxinea* an *Fraxinus excelsior L.* Masterarbeit, Hochschule für nachhaltige Entwicklung Eberswalde
- Möhring, M.; Stehlgens, K.; Lautner, S.: 156 - Mikroskopische Untersuchungen zum Erreger (*Hymenoscyphus fraxineus*) des Eschentriebsterbens im Holzgewebe. In: Julius Kühn-Institut (JKI) – Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen (Hg.): 63. Deutsche Pflanzenschutztagung. Pflanzenschutz morgen - Transformation durch Wissenschaft. 26. bis 29. September 2023, - Kurzfassungen der Vorträge und Poster -. Unter Mitarbeit von Bundesbehörden und Einrichtungen im Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL). Göttingen. Quedlinburg: Julius-Kühn-Institut, Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen (475), S. 641–642.
- Möhring, M.; Stehlgens, K.; Lautner, S. (2023): Mikroskopische Untersuchungen zum Erreger des Eschentriebsterbens im Holzgewebe. Schwerpunkt Ökologie. In: Fakultät für Umwelt und Natürliche Ressourcen der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg und Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg (Hg.): FraxForFuture— Erhalt der Gemeinen Esche (*Fraxinus excelsior*) als Wirtschaftsbaumart. Tagungsband im Rahmen der 63. Deutschen Pflanzenschutztagung am 27.09.2023 in Göttingen, Bd. 106. Unter Mitarbeit von Feray Steinhart und Tim Burzlaff, S. 22–24.
- Peters, S.; Langer, G.; Kätzel, R. (2021a): Eschentriebsterben – Kriterien zur Schadensbonitur an Eschen. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR), Gülzow-Prüzen, 60 Seiten, ISBN-Nr.: 978-3-942147-44-6; 56 S.
- Peters, S; Langer, G.; Kätzel, R. (2021b): Bonitur geschädigter Eschen im Kontext des Eschentriebsterbens. AFZ-Der Wald 12/2021: 28-29.
- Schmelze, S., Bruns, S., Beckmann, F., Moosmann, J., Lautner, S. (2021), Using *in situ* synchrotron-radiation-based microtomography to investigate 3D structure-dependent material properties of tension wood. *Advanced Engineering Materials*, first published online June 2021: <https://doi.org/10.1002/adem.202100235>

ANHANG**Teilvorhaben 2219WK20A4****1. Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens**

Die Koordination des FraxMon-Verbundes spielte eine zentrale Rolle bei der Zusammenführung verschiedener Methoden auf unterschiedlichen Skalenebenen des Eschen-Monitorings und trug die Verantwortung dafür, dass diese Methoden auf möglichst identischen Versuchsflächen angewendet werden. Darüber hinaus lag die Kommunikation mit der Gesamtkoordination (FraxConnect) und den Unterverbünden 2 bis 4 in der Zuständigkeit der Koordination. Ein regelmäßiger Informationsaustausch gewährleistete die reibungslose Durchführung der Forschungsarbeiten, förderte Synergien und nutzte neue Potenziale. Damit wurde sichergestellt, dass die unterschiedlichen Arbeitsbereiche effektiv zusammenarbeiten, Daten zuverlässig übermittelt und die wissenschaftlichen Methoden im Einklang mit den Forschungszielen weiterentwickelt werden.

Die Einrichtung von 14 repräsentativen IBF in Deutschland stellte eine weitere entscheidende Arbeit der Koordination dar. Dabei wurden die Bestände während der Projektlaufzeit aus der Bewirtschaftung genommen, um den Absterbeprozess untersuchen zu können. Die 14 IBF sollten die Grundlage für alle einzelbaumbasierten Untersuchungen des Gesamtverbundes bilden und soweit wie möglich auch für Untersuchungen ganzer Bestände genutzt werden. Es wurde zu Projektbeginn außerdem eine Handlungsempfehlung erstellt, die als Grundlage für die Durchführung aller Bonituren dient.

Der zweite Schwerpunkt des LFE bestand in biochemischen Analysen der Esche, mit dem Ziel, ein baumphysiologisches Biomarkerset für die Vitalitätsdiagnostik der Esche zu entwickeln und zu etablieren. Dieses System sollte nicht nur dazu dienen, die physiologische Gesundheit und Anfälligkeit auf den IBF zu bewerten, sondern auch zur Risikobewertung der gesamten Eschenpopulation beitragen.

In der Fortführung vorangegangener Arbeiten wurden zwei bedeutende Erweiterungen durchgeführt. Zum einen wurden Analysen mit Holz und Trieben unterschiedlicher Befallsstadien durchgeführt, welche zuvor nur für Blätter und Nadeln genutzt wurden. Zum anderen wurde der Fokus auf den Phenolstoffwechsel gelegt, um das Abwehrpotenzial zu bewerten. Dazu wurde über einen Zeitraum von drei aufeinanderfolgenden Vegetationsperioden (2020, 2021, 2022) das baumphysiologische Biomarkerset angepasst. Dieses Set, das bereits erfolgreich für die Beurteilung der Gesundheit verschiedener Baumarten auf Basis von Blattanalysen genutzt wurde, wurde nun spezifisch auf die Esche ausgerichtet. Die Parameter des Sets umfassten eine Vielzahl von Biomarker wie z. B. Chlorophylle, Carotinoide, Kohlenhydrate, Proteine, Aminosäurespektren, Ascorbat und verschiedene phenolische Inhaltsstoffe.

Die jährliche Untersuchung von je 30 Eschen auf 14 IBF zwischen 2020 und 2022, unter Berücksichtigung variierender Befallsgrade und Standorte, war angesichts des hohen Infektionsdrucks eine anspruchsvolle Aufgabe. Die Ableitung von Referenzwerten für gesunde Eschen sowie die Identifikation von Risikobereichen als Frühindikatoren stellte ebenfalls eine besondere Herausforderung dar.

In Kooperation mit dem AP 4.2 (TV9) erfolgte die Bewertung der durch Befall veränderten Holzeigenschaften, einschließlich der Holzstruktur und Holzinhaltsstoffe (Kohlenhydrate, Phenole). Außerdem wurden Kooperationen mit weiteren Partnern aus dem Gesamtverbund angestrebt (FraxGen und FraxPath), um aus den Ergebnissen Zusammenhänge zwischen dem physiologischen Zustand der Eschen, den Standortbedingungen der einzelnen Bäume und dem jeweiligen Genotyp ableiten zu können und somit einen besseren Beitrag zur Bewertung des ETS und der Entwicklung leisten zu können.

2. Bearbeitete Arbeitspakete**TP 1.1 Koordination**

Arbeitspaket	Thema
1.1	Koordination des Unterverbundes FraxMon bzgl. der vier Monitoringebenen
1.2*	Koordination der bundesweiten Auswahl und Einrichtung von 14 (ursprünglich ca. 20) Monitoringflächen, Monitoringleitfaden erstellen
1.3*	Auswahl von 14 (ursprünglich 10) IBF und Abstimmung aller Aktivitäten des Gesamtverbundes
1.4**	Entwicklung und Bereitstellung der zentralen Datenbank FraxMon

*Im Laufe der Flächenauswahl und Abstimmung mit den Projektpartnern zeigte sich, dass es zielführender ist, weniger Flächen einzurichten, diese aber alle intensiv zu monitoren. Dadurch entfällt eine Unterscheidung zwischen Monitoringflächen und Intensivbeobachtungsflächen (Zusammenführung 1.2 und 1.3 zu 1.2)

** im Rahmen einer zentralen Datenbank für FraxForFuture an FraxConnect übergeben

TP 1.4 Vitalitätsdiagnostik auf IBF (Monitoringebene 3 und 4)

Arbeitspaket	Thema
4.1	Stressphysiologische Diagnostik der Esche zur Bewertung der Vitalität und Prädisposition gegenüber <i>Hymenoscyphus fraxineus</i> in 14 (ursprünglich 10) Monitoringbeständen

Teilprojekt 1.1

AP	Meilenstein	Erreichtes Teilziel	Quartal abgeschlossen
1.1	1	Kickoff-Meeting	4/20
1.2	2	Auswahl, Bereisung und Bewertung aller Monitoringflächen abgeschlossen; Überprüfung der Auswahlkriterien	2/21
	3	Handlungsempfehlung für die Flächeneinrichtung und Aufnahmemethoden sind abgeschlossen	1/21
	4	Zäunung und Baumnummeration aller IBF sind abgeschlossen	1/21
1.1	7	Zwischenbericht und Informationsaustausch mit den anderen Verbünden	2/22
1.1	9	Zwischenbericht und Informationsaustausch mit den anderen Verbünden	1/23
1.4	10	Vorgaben zum Abschlussbericht	2/23
1.1	11	Abschlussmeeting	3/23
1.1	12	Erstellung und Abgabe Abschlussbericht	1/24

Teilprojekt 1.4 (AP 4.1)

Meilenstein	Erreichtes Teilziel	Quartal abgeschlossen
1	Probennahme (2021) Blatt-, Zweig- und Holzproben abgeschlossen	4/21
4	Zwischenbericht	1/22
5	Analyse Biomarker aus Probennahme 2021 abgeschlossen	2/22
7	Probennahme (2022) Blatt- und Holzproben abgeschlossen	3/22
11	Auswertung Biomarker aus Probennahme 2021 abgeschlossen Zwischenbericht	1/23
14	Analyse Biomarker aus Probennahme 2022 abgeschlossen	2/23
18	Auswertung Biomarker aus Probennahme 2022 abgeschlossen	3/23
22	Abschlussbericht	1/24
	Publikationstätigkeit	laufend

3. Wesentliche Ergebnisse des TeilvorhabensTeilprojekt 1.1

Im Rahmen der Koordination wurden erfolgreich 14 IBF ausgewählt und eingerichtet, welche soweit wie möglich auch über den Projektzeitraum hinaus für künftige Arbeiten als Forschungsplattformen dienen sollen. Es wurde ein Boniturschlüssel speziell zum Einschätzen des ETS in Kooperation entwickelt und überarbeitet. Außerdem wurden alle Bonituren auf der IBF BB1 und vertretend einige auf MV1 durchgeführt.

Es wurde ein intensiver Austausch innerhalb des Unterverbundes ermöglicht durch eine Vielzahl von Meetings. Dabei konnten Arbeitsgruppen mit Themenschwerpunkten gebildet werden, welche sich besonders intensiv austauschten. Die Koordination kümmerte sich um die Organisation und Zusammenstellung der gemeinsamen

Zwischenberichte, des vorliegenden Abschlussberichtes und anderer gemeinsamer Auftritte (z. B. Poster auf dem WKF-Kongress 2022).

Einige koordinierenden Arbeiten des LFE spiegeln sich in den Punkten 2. Einrichtung der IBF und 3. Bonituren des Hauptteils wider.

Teilprojekt 1.4

Es wurden mit Hilfe der Biomarker unterschiedliche Fragestellungen bearbeitet. Die zentralen Fragen waren dabei:

1. Wie hoch ist die phänotypische Plastizität der physiologischen Parameter innerhalb der Eschenpopulationn und zwischen den 14 Populationen (Phänotyp-Genotyp)?
2. Lassen sich unterschiedlich befallene/vitale Eschen anhand ihrer Biomarkermuster unterscheiden?
3. Bilden unterschiedlichen Eschen-Genotypen auch unterschiedliche (physiologisch messbare) Phänotypen aus?
4. Welche Zusammenhänge bestehen zwischen den biochemischen Inhaltsstoffen der Blätter und des Holzes im Stamm und der Triebe?

Im Rahmen des Projektes wurden umfangreiche biochemische Analysen des Holzes und der Blätter an rund 400 Eschen in 2-3 Jahren auf 14 IBF durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass die Triebe als Kompartiment biochemisch eher eine geringe Aussagekraft bzgl. ETS besitzen. Das Holz aus dem Stammfußbereich bietet in Hinblick auf Stammfußnekrosen Indikatoren (Kohlenhydrate, Phenole, Asparaginsäure, Glutaminsäure, GABA). Hierzu wurden auch vertiefende Untersuchungen durchgeführt. In den Blättern erwiesen sich diverse Biomarker als potentielle Indikatoren (z. B. Verhältnis Blattlänge zu Blattbreite, Kohlenhydrate, Procyanidine, Summe der freien Aminosäuren, Asparaginsäure, Threonin, Alanin, GABA), um den Vitalitätszustand der Eschen anzuzeigen. Allerdings zeigte sich eine hohe Abhängigkeit der Biomarker von weiteren Faktoren (Standortbedingungen, Genetik), sodass gesagt werden muss, dass lokale Standorteinflüsse und meteorologische Faktoren und genetische Anpassungen den Zusammenhang zwischen den Boniturparametern (bspw. Kronenzustand oder Stammfußnekrosen) und den Inhaltsstoffen überlagern. Es konnten auch zwischen den Boniturstufen 0 und 5 bzw. 6 bei einigen Biomarkern hochsignifikante Unterschiede nachgewiesen werden, aber auch hier gibt es die Einschränkung, dass es kaum vitale Eschen auf den Untersuchungsflächen gab und damit zu wenige Referenzen bei den Analysen.

Die Mechanismen, die zum Absterben der Bäume führen, sind nach wie vor unklar. Mit den untersuchten Parametern konnten weder pilzinduzierte Abwehrmechanismen noch unspezifische Stressreaktionen nachgewiesen werden. Die Identifizierung tatsächlich resisterter Eschen wird dadurch erschwert. Im Falle des ETS muss auf Grundlage der vorliegenden Daten geschlussfolgert werden, dass die Untersuchung der physiologischen und biochemischen Reaktionen als potenzielle Resistenzmarker nicht geeignet war. Die festgestellten Unterschiede bei Eschen scheinen vor allem von den verfügbaren Ressourcen abhängig zu sein und das Überleben wird nicht durch Abwehrmechanismen gesichert, sondern durch das Aufrechterhalten wesentlicher Stoffwechselprozesse in nicht infizierten Baumkompartimenten. Der Absterbeprozess wird vor allem von der Ausbreitungsgeschwindigkeit des Pilzes innerhalb des Baumes bestimmt. Dem wirkt die Esche anscheinend am ehesten durch die Bildung neuer Triebe und nur eingeschränkt durch Abschottungen entgegen.

Für eine präzise Vitalitätsdiagnose sind sorgfältige visuelle Untersuchungen der Stammfußnekrosen entscheidend. Insbesondere im Kontext der Verkehrssicherung empfiehlt sich ergänzend die Untersuchung mit dem Resistografen.

Varianzuntersuchungen zeigten, dass einige wenige Biomarker in der Krone lichtabhängig sind und deshalb die Entnahme von Blattmaterial aus der Lichtkrone wichtig ist.

Das Aminosäurespektrum von *H. fraxineus* ähnelt stark dem des Eschenstamms, jedoch nicht dem der Blätter. Dies legt nahe, dass das Holz das eigentliche Ziel des Pilzes ist und nicht Blätter oder Triebe.

Ausführlicher sind die Ergebnisse der biochemischen Analysen unter 7. Biomarker im Hauptteil abgebildet.

Teilvorhaben 2219WK20B4

1. Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens

Das Teilvorhaben 2 verfolgt das Ziel der Erstellung eines Inventurdesigns für das großflächige Monitoring der Ausbreitung des Eschentriebsterbens. Dabei baut es stark auf die Ergebnisse aus den Teilvorhaben 3 (Fernerkundungsbasiertes Monitoringsystem zur Erfassung des Eschentriebsterbens – Schwerpunkt Modellierung) und 6 (Fernerkundungsbasiertes Monitoringsystem zur Erfassung des Eschentriebsterbens – Schwerpunkt Interpretationsschlüssel).

Für das Erreichen des übergeordneten Ziels eines Fernerkundungsbasierten Monitoringsystems zur Erfassung des Eschentriebsterbens wurde sehr eng mit den Teilvorhaben 3 und 6 zusammengearbeitet. Ein Kernstück dieses Monitoringsystems war die Entwicklung eines Inventurverfahrens mittels Luftbildauswertungen. Der für die Luftbildauswertung benötigte Interpretationsschlüssel zur Ansprache der Kronenverlichtung und zur Identifikation von Eschen wurde in Teilvorhaben 6 unter Führung der LFOA MV in Kooperation mit FVA-BW und NW-FVA entwickelt. Ein weiteres Kernstück war die Methodenentwicklung für die großräumige Erfassung von Eschenvorkommen. Hierbei wurde das Teilvorhaben 2 von Teilvorhaben 3 unterstützt. Für die Umsetzung dieser Methoden in Wuchsgebieten in Baden-Württemberg, Mecklenburg-Vorpommern und Niedersachsen wurden aus den Teilvorhaben 3 und 6 entsprechende Daten geliefert.

2. Bearbeitete Arbeitspakete

AP 1.2 Koordination der bundesweiten Auswahl und Einrichtung von ca. 20 Monitoringflächen (IBF), Monitoringleitfaden erstellen	Einmessen und Nummerieren der Bäume auf den Flächen in Baden-Württemberg Überführung Baumkoordinaten von lokalem in globales Koordinatensystem für Flächen in Sachsen
AP 1.4 Entwicklung und Bereitstellung der zentralen Datenbank FraxMon	Konzeption der Datenbanktabellen mit Bezug zu Teilprojekt 1.2 „Fernerkundungsbasiertes Monitoringsystem zur Erfassung des Eschentriebsterbens (FeMos-ETS)“
AP 2.1 Anpassung des Interpretationsschlüssels zur Identifizierung von Eschenbeständen und deren Vitalität	Anpassung des Interpretationsschlüssels zur Vitalitätsansprache von Eschen in Stereo-Luftbilder basierend auf Erfahrungen in der Anwendung
AP 2.2 Methodenentwicklung für eine bundesweite Modellierung von Eschenpotentialflächen	Definition Anforderungen an Referenzdaten und Verfahren zur Referenzdatenaufbereitung Festlegung von Anforderungen an Sentinel-2-Satellitendaten (Aufnahmejahr und -zeitpunkte, max. Bewölkungsgrad) Festlegung Verfahren zu Vorprozessierung von Sentinel-2-Satellitendaten Entwicklung Modellierungsprozess
AP 2.3 Modellierung der potentiellen Eschenflächen am Beispiel von 3 Bundesländern	Auswahl der Sentinel-2-Szenen für BW und MV Download und Vorprozessierung der Sentinel-2-Szenen für BW und MV Aufbereitung der Referenzdaten für BW
AP 2.4 Inventurdesign und Luftbildinterpretation	Luftbildinterpretation auf IBF BB1, BW1, BW2, BY1, SN1 für den Bildjahrgang 2021

Zusätzlich zu den bearbeiteten Arbeitspaketen fielen über die Projektlaufzeit allgemein koordinierende Arbeiten im Fernerkundungsbereich an.

3. Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens

Ein Inventurverfahren zur Erfassung des Eschentreibsterbens mittels Stereo-Luftbildauswertungen wurde in enger Zusammenarbeit mit den Projektpartnern NW-FVA und LFoA MV entwickelt. Zudem wurden unterstützenden Arbeiten in den AP 1.2 (v.a. Einrichten der IBF in Baden-Württemberg) und AP 1.4 (Konzeption der die Fernerkundungsdaten betreffenden Datenbanktabellen) geleistet.

AP 2.1: Anpassung des Interpretationsschlüssels zur Identifizierung von Eschenbeständen und deren Vitalität

Der Luftbildinterpretationsschlüssel wurde an der FVA-BW bei der Interpretation der Befliegungen 2021 auf den IBF BB1, BW1, BW2, BY1 und SN1 verwendet, um die Abgrenzung von Eschenkronen durchzuführen und deren Kronenverlichtung einzustufen. Dabei zeigte sich, dass die Beschreibungen der Kronenverlichtungsmerkmale der Stufen 2 und 3 nicht ausreichend präzise für den praktischen Einsatz sind. Deshalb wurden die Beschreibungen zu diesen Stufen in der tabellarischen Übersicht sowie im Textteil in enger Abstimmung mit der NW-FVA präzisiert.

AP 2.2: Methodenentwicklung für eine bundesweite Modellierung von Eschenpotentialflächen

Um deutschlandweit potentielles Eschenvorkommen automatisiert zu erfassen wurde an der FVA-BW, mit Unterstützung der NW-FVA, ein Verfahren entwickelt, das zunächst mit Hilfe der Kartierung der potentiellen natürlichen Vegetation (pnV), Wald- und Nadelwaldmasken Ausschlussflächen definiert. Auf den Restflächen (Eschenpotentialflächen) sollten Eschen dann mit Hilfe von Sentinel-2-Satellitendaten tatsächliches Eschenvorkommen gefunden werden. Anhand der Daten aus Baden-Württemberg wurden verschiedene Modellierungsansätze mit Maximum Entropy intensiv getestet. Dabei wurde die Zusammensetzung der Prädiktoren, der Referenzdaten sowie die Aufteilung in Trainings und Testdaten variiert. Kein erzeugtes Modell konnte Eschenvorkommen mit für praktische Anwendungen ausreichender Zuverlässigkeit vorhersagen. Dies zeigte, dass selbst mit einem Algorithmus (Maximum Entropy), der besonders geeignet scheint einige der Schwierigkeiten bei der Erfassung von Eschenvorkommen abzuschwächen (unausgeglichene Referenzdaten und Unterrepräsentanz des Vorkommens), kein zufriedenstellendes Ergebnis basierend auf Sentinel-2-Satellitendaten erzielt werden kann.

Eine detaillierte Beschreibung des Ablaufs der Datenaufbereitung und der Modellierung sowie Ergebnisse findet sich im Hauptteil im Abschnitt 4.2 Methodenentwicklung für eine bundesweite Modellierung von Eschenpotentialflächen.

AP 2.3: Modellierung der potentiellen Eschenflächen am Beispiel von 3 Bundesländern

Aufgrund der oben erwähnten Hindernisse bei der Durchführung des AP 2.2, konnten die für dieses AP vorgesehenen Modellierungen nicht durchgeführt werden. Es wurden allerdings vorbereitende Schritte (Auswahl und Vorprozessierung der Sentinel-2-Satellitendaten, Identifikation der Ausschlussflächen nach pnV, Beschaffung von Wald- und Nadelwaldmasken, Aufbereitung der Referenzdaten) durchgeführt.

AP 2.4: Inventurdesign und Luftbildinterpretation

Da die Erstellung des Inventurdesigns auf die Ergebnisse der Modellierung des Eschenvorkommens in AP 2.3 aufbaut, konnte dies nicht im ursprünglich geplanten Umfang durchgeführt werden. Stattdessen wird auf die Integration der BWI-Stichprobepunkte verwiesen (siehe Hauptteil Abschnitt **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**).

AP 2.4.4 Interpretation der aktuellen Luftbilddaten der IBF:

Im Teilvorhaben 2 wurden die 2021 aufgenommenen Luftbildern auf 5 IBF mit Hilfe des in AP 2.1 entwickelten Luftbildinterpretationsschlüssels zur Ansprache des Kronenzustands der Esche interpretiert und ausgewertet. Aufgrund von Personalwechsel während der Projektlaufzeit wurde die Interpretation für die Befliegungsdaten 2022 komplett an das Teilvorhaben 3 abgegeben und im Gegenzug mehr Aufgaben in AP 2.2 und 2.3 übernommen. Dadurch konnten die Arbeiten effizienter gestaltet und Einarbeitungszeiten minimiert werden.

Teilvorhaben 2219WK20C4

1. Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens

TP 1.2

Das Teilvorhaben 3 trug zur Entwicklung eines Monitoringsystems bei, das auf der Basis aktueller und historischer Luftbilder die Änderungen des Kronenzustands im Laufe der Zeit erfassen soll. Zu diesem Zweck wurden: a) Luftbildbefliegungen über alle IBF für die Jahre 2021 und 2022 geplant und abgewickelt. b) historische Luftbilddaten beschafft und ausgewählt. c) Luftbilddaten interpretiert und Kronenvitalitätszustände bonitiert sowie d) Status und Dynamik der Kronenvitalität auf den IBF erfasst.

Die benötigten Interpretationsschlüssel zur Ansprache der Kronenverlichtung und zur Identifikation von Eschen wurden mitentwickelt.

Weitere Ziele die durch Teilvorhaben 3 unterstützt wurden, waren a) die Umsetzung des Eschenkronenzustandsmonitorings in Wuchsgebieten in Baden-Württemberg, Mecklenburg-Vorpommern und Niedersachsen und b) das Mitwirken bei der von der FVA geführten Entwicklung einer Methode zum großräumigen Auffinden von Eschenvorkommen.

TP 1.3

Das Teilprojekt 1.3 wurde personell betreut vom wissenschaftlichen Mitarbeiter Sebastian Fuchs, der über FraxPath TV4.1 angestellt war und als Schnittstelle zwischen FraxPath und FraxMon arbeitete. Die hier aufgeführten Arbeiten sind bzgl. der Sachmittel und Laborpersonalmittel (E9/E10) über FKZ 2219WK20C4 und bzgl. der E13-Personalmittel über FKZ 2219WK22A4 (FraxPath, TV 4.1) finanziert worden. Diese Sachlage hat sich im Laufe der komplexen Beantragung des gesamten Verbundprojektes leider so ergeben.

Ein Ziel des TP 1.3 war die Akquise, Zusammenführung und Auswertung der Waldzustandserhebungsdaten aller Bundesländer zur Esche in Hinblick auf die Schadverläufe. In einem zweiten Schritt wurde mit Hilfe der auf dem gleichen Raster erhobenen Bodenzustandserhebungsdaten nach Zusammenhängen zwischen Standort und Eschenzustand/Schadverlauf gesucht.

Das zweite Ziel war die einheitliche standörtliche Feinkartierung und die Erhebung von bodenchemischen und -physikalischen Daten aller verbundweit eingerichteten IBF nach dem Muster der Bodenzustandserhebung.

Neu hinzugekommen war die Verarbeitung und Integration dieser Daten in die FraxForFuture-Datenbank, um sie allen Projektpartnern zur Verfügung zu stellen und die Verschneidung dieser Daten mit den halbjährlichen Eschenbonituren in der verbundweiten Arbeitsgruppe „Bonitaurauswertung“. Im Rahmen dieser Arbeiten wurden auch die Zusammenführung, Prüfung und Auswertung der Eschenbonituren auf den IBF übernommen und die Erstellung einer Publikation zur Auswertung der Eschenbonituren in Bezug zur Feinkartierung der IBF.

2. Bearbeitete Arbeitspakete

AP 2.1 Anpassung des Interpretationsschlüssels zur Identifizierung von Eschenbeständen und deren Vitalität	Anpassung des Interpretationsschlüssels zur Vitalitätsansprache von Eschen in Stereo-Luftbilder basierend auf Erfahrungen in der Anwendung
AP 2.2 Methodenentwicklung für eine bundesweite Modellierung von Eschenpotentialflächen	Mitarbeit bei der Methodenentwicklung
AP 2.3 Modellierung der potentiellen Eschenflächen am Beispiel von 3 Bundesländern	Datenbeschaffung
AP 2.4.3 Jährliche Befliegung der IBF in den Jahren 2021 und 2022	Abwicklung der Befliegung 2021 und 2022
AP 2.4.4 Interpretation der aktuellen Luftbilddaten der IBF	Aufbereitung und Interpretation der Luftbilddaten
AP 2.4.5 Auswertung der Luftbildinterpretation	Auswertung der Ergebnisse der Interpretation der Luftbilddaten aus den Jahren 2021 und 2022
AP 2.6.1 Datenbeschaffung historischer Luftbilder	Beschaffung, Auswahl und Aufbereitung geeigneter historischer Luftbilder
AP 2.6.2 Auswertung der historischen Luftbilder	Visuelle Interpretation der historischen Luftbilder mittels 3D-Auswertungstechnik

AP 3.1 Akquise und Auswertung von WZE/ BZE-Daten; Feinkartierung der IBF; Auswertung der IBF-Bonituren	Abgeschlossen mit Ausnahme der abschließenden englischsprachigen Publikationen, die sich in Review / in Arbeit befinden
---	---

3. Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens

TP 1.2

Ein Inventurverfahren zur Erfassung des ETS mittels 3D-Luftbildauswertungen wurde entwickelt. 2021 und 2022 wurden Luftbildbefliegungen aller IBF durchgeführt. Historische Luftbilddaten wurde ausgewählt. Insgesamt 38 Luftbildsätze standen für die Auswertung zur Verfügung. Der zeitliche Verlauf der Kronenverlichtung innerhalb jeder IBF wurde analysiert und die Erfassungsmethode mit terrestrischen Aufnahmen abgeglichen.

Mit Ausnahme der IBF NI1 und ST1 wurde flächenübergreifend eine Zunahme der Kronenverlichtung im Laufe der Zeit beobachtet. Diese Ergebnisse wurden mit denen der terrestrischen Bonitierung verglichen, wobei es beobachtet wurde, dass die luftbildbasierten Bonitierungen die Situation in der Regel als schlechter einstufen. Eine ausführliche Beschreibung der Ergebnisse ist im Kap. 4.4 des Schlussberichtes zu finden.

AP 2.1: Anpassung des Interpretationsschlüssels zur Identifizierung von Eschenbeständen und deren Vitalität

Auf der Basis der Befliegungen 2021 über fünf IBF wurden, in Abstimmung mit der FVA, die Luftbildinterpretationsschlüssel zur Abgrenzung und Zustandsbonitur der Kronen überprüft und für den praktischen Einsatz angepasst. Sie wurden in der tabellarischen Übersicht sowie im Textteil präzisiert.

AP 2.2: Methodenentwicklung für eine bundesweite Modellierung von Eschenpotentialflächen

Im Rahmen mehrerer Diskussionsrunden an der Methodenentwicklung mit der FVA kam man zu dem Schluss, dass die Sentinel-2-Satellitenbilddaten ungeeignet für den vorgenommenen Zweck sind. Eine Beschreibung des Ablaufs der Datenaufbereitung und der Modellierung findet sich im Hauptteil unter 4. Fernerkundung AP 2.2.

AP 2.3: Modellierung der potentiellen Eschenflächen am Beispiel von 3 Bundesländern

Eine Reorganisation der Aufgabenverteilung fand statt, wonach dieser Teil von der FVA bearbeitet wurde, wohingegen die Auswertung der Luftbilddatensätze 2022 der IBF komplett von der NW-FVA übernommen wurde.

AP 2.4: Inventurdesign und Luftbildinterpretation

AP 2.4.3 Jährliche Befliegung der IBF in den Jahren 2021 und 2022:

2021 und 2022 erfolgten Luftbildbefliegungen der 10 IBF. Mit der Ausnahme von drei IBF in 2021, die Anfang September stattfanden, wurden alle Befliegungen im Monat Juli durchgeführt. 2022 wurden bei vier IBF ergänzende Luftbildaufnahmen mit einer Auflösung von 4 cm angefertigt. Die Luftbilddaten wurden auf Qualität geprüft, archiviert und allen Projektpartnern zur Verfügung gestellt.

AP 2.4.4 Interpretation der aktuellen Luftbilddaten der IBF:

Die 2021 und 2022 durchgeführten Befliegungen wurden zur Ansprache des Kronenzustands der Esche interpretiert und ausgewertet. Im Falle der IBF TH1 ist die Zuverlässigkeit bei der Zuordnung der Individuen relativ niedrig, was bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden muss.

AP 2.4.5 Auswertung der Luftbildinterpretation:

Die Ergebnisse der Luftbildinterpretationen aus den Jahren 2021 und 2022 wurden zusammen mit denen der historischen Luftbilder ausgewertet (siehe 2.6.2).

AP 2.6 Auswertung von historischen Luftbildern

AP 2.6.1 Datenbeschaffung historischer Luftbilder:

Aufgrund der Zeitpunkte und/oder Bedingungen bei der Aufnahme, waren nicht alle Luftbilddatensätze für die Kronenzustandsansprache geeignet. Die Anzahl an auswertbaren historischen Befliegungen pro IBF schwankte daher zwischen null und vier (siehe Kap. 4.6.1 im Schlussbericht). Sie befindet sich in der Zeitspanne 2006 bis 2020.

AP 2.6.2 Auswertung der Interpretation der historischen Luftbilder:

Der Median, der Mittelwert und die Streuung der Kronenverlichtung für jede IBF in jedem Jahr wurde berechnet. Durch geeignete Diagramme wurden Vergleiche der Kronenvitalität zwischen IBF innerhalb eines Jahres und zwischen Jahren innerhalb der IBF ermöglicht. Der Verlauf der Kronenverlichtung jeder IBF konnte durch eine graphische Darstellung mit kodierter Färbung der Kronenpolygone direkt visualisiert werden.

Die Analysen deuten auf eine generalisierte Zunahme der Kronenverlichtung im Laufe der Zeit hin. Eine Ausnahme bilden die Fälle zweier IBF, wobei keine eindeutige Verschlechterung der Situation zu erkennen ist.

Die Ergebnisse der luftbildbasierten und der terrestrischen Bonitierung wurden verglichen. Mit der Ausnahmen zweier IBF, zeigte sich eine allgemeine Tendenz bei den luftbildbasierten Bonitierungen, die Situationen als schlechter einzustufen als die terrestrischen Bonitierungen es tun.

TP 1.3

WZE/BZE-Daten

Die wichtigsten Ergebnisse sind im Hauptteil des Berichtes unter II.1.1 und II.2 zusammengefasst.

Am aussagekräftigsten haben sich die Raum-Zeit Modelle mit selektierten erklärenden Variablen (siehe Kapitel II.1.1, Abbildung 1 und Abbildung 2) erwiesen. Die Ergebnisse sind durchweg ökologisch plausibel.

Für die Untersuchung des Zusammenhangs zwischen der Eschenschadentwicklung und Parametern aus der BZE ist die Stichprobengröße von ca. 200 Eschenplots verhältnismäßig klein, da die Anzahl der gemessenen Parameter in der BZE unabhängig voneinander variieren. Einzelne chemische, physikalische, hydrologische, klimatische oder geologische Parameter erwiesen sich durchweg als wenig erklärend für den Eschenzustand. Dies wurde zunächst anhand von Korrelationsmatrizen überprüft. Daraufhin wurden von einem Standortsexperten aggregierte Parameter (Wasserhaushaltklassen und Trophieklassen) aus den in der BZE verfügbaren Daten abgeleitet. Dabei wurden Ausgangssubstrate, Horizontverzeichnisse der bodenmorphologischen Beschreibungen, nutzbare Feldkapazität, Lagerungsdichten, Elementvorräte, Basensättigung, Austauschkapazität, Hangneigung und -richtung, Lage im Relief und Höhe ü. NN berücksichtigt.

Unter den bodenkundlichen Parametern zeigten sich nur im Zusammenhang mit Wasserhaushaltklassen Unterschiede in der Kronenverlichtung von Eschen: Stau- oder grundnasse Standorte, sowie stau- und grundfeuchte Standorte waren assoziiert mit einer höheren durchschnittlichen Kronenverlichtung der Eschen (Abbildung 37). Die Nährstoffausstattung (Trophie) der Standorte hatte in keiner Hinsicht einen Einfluss. Dies hängt auch damit zusammen, dass das Trophiespektrum von Eschenbeständen natürlicherweise sehr schmal ist, weil die Esche nur bei guter bis sehr guter Nährstoffausstattung vorkommt. Ebenso zeigte die nutzbare Feldkapazität keinen Zusammenhang mit der Kronenverlichtung, wenn Stau- und Grundwasserböden nicht berücksichtigt wurden.

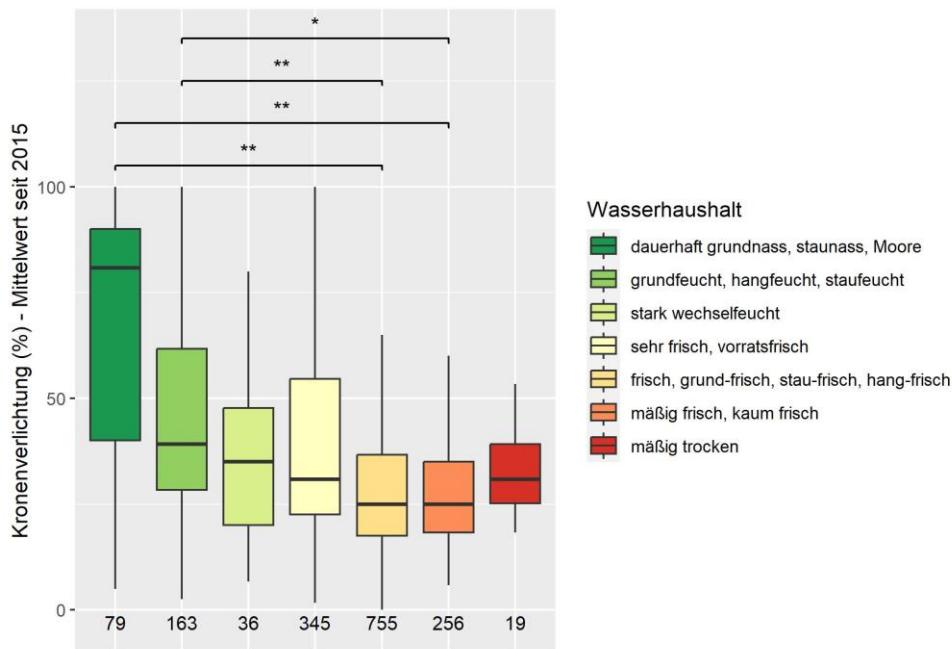


Abbildung 37: Mittlere Kronenverlichtung von Eschen (seit 2015) in Abhängigkeit von aggregierten Wasserhaushaltssklassen (abgeleitet nach dem Niedersächsischen Rahmenschema zur forstlichen Standortsbewertung). Die Klammerpfeile stellen signifikante Unterschiede (*: $p<0.05$, **: $p<0.01$) zwischen zwei Klassen dar; getestet wurde mit einem gemischten linearen Modell, das der hierarchischen Varianzstruktur der WZE-Daten Rechnung trägt und post-hoc Tukey-Paarvergleichen.

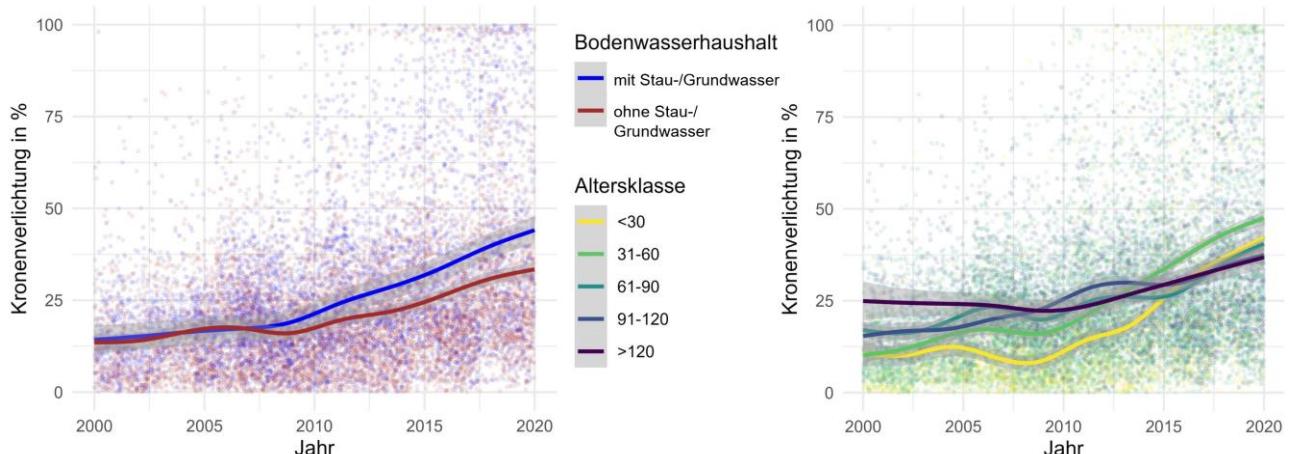


Abbildung 38: Zeitlicher Verlauf der bundesweiten Eschen-Kronenverlichtung in der WZE seit dem Jahr 2000 (Erstnachweis ETS in Deutschland: 2002). Links sind Trendlinien für Kollektive unterschiedlichen Bodenwasserhaushalts, rechts unterschiedlichen Bestandesalters dargestellt (Hinweis: Datenpunkte in leicht gejitterter Darstellung, die Trendlinien mit 95%-Konfidenzintervallen sind generalisierte additive gemischte Modelle mit Zufallseffekten für Einzelbäume und Plots).

Feinkartierung der IBF, FraxForFuture-Basispublikation und IBF-Bonituren

Die wichtigsten Ergebnisse sind im Hauptteil des Berichtes unter II.1.2 „Erzielte Ergebnisse“ und II.2 „Verwertung“ zusammengefasst und in der in Review befindlichen Publikation „Ash dieback assessments on intensive monitoring plots in Germany“ (Fuchs et al., in prep.) ausführlich dargelegt.

Die praktischen Arbeiten der Feinkartierung, Bodenprobennahme und -analytik auf den IBF wurden 2022 abgeschlossen. Kurzbeschreibungen und Bilder der Bodenprofile jeder IBF sind auf der Projekthomepage (<https://fraxforfuture.de/flaechenbeschreibungen>) hinterlegt. Bei der Feinkartierung wurden Teilflächen mit ähnlichen standörtlichen Eigenschaften innerhalb der IBF abgegrenzt und standörtlich beschrieben.

Alle Bodenproben sind anschließend analysiert worden, die entsprechenden chemischen und physikalischen Kenngrößen wurden berechnet. Diese Daten beinhalten umfassende Analyseergebnisse und bodenmorphologische Beschreibungen auf Horizont und Tiefenstufenlevel und sind in einem Datenkatalog für

die FraxForFuture-Datenbank von FraxConnect zusammengefasst. Für die Datenbank wurden außerdem aggregierte Parameter auf IBF- und Teilflächenlevel mit einem dazugehörigen GIS-Layer erstellt und an FraxConnect geliefert, welche für alle Projektpartner abrufbar sind (die Entwicklung dieser Datenbank läuft über den Verbund FraxConnect). Aus diesen Daten ist ein Kapitel der im September 2022 erschienenen Basispublikation (Langer et al. 2022: FraxForFuture - research on European ash dieback in Germany) zum Gesamtverbund FraxForFuture und den gemeinsamen IBF entstanden.

Die Datenzusammenführung, -haltung und -auswertung der Eschenbonituren auf den IBF münden in einer verbundübergreifenden Publikation (Fuchs S, Häuser H, Peters S, Knauf L, Rentschler F, Kahlenberg G, Kätzel R, Langer GJ (in review): Ash dieback assessments on intensive monitoring plots in Germany. JPDPP). Bei dieser Auswertung konnten Zusammenhänge zwischen lokalen Bestandes- und Standortseigenschaften und dem ETS innerhalb von Beständen aufgezeigt werden. Hier zeigte sich, dass Eschen innerhalb von Beständen in Bereichen mit lokal höherer Eschendichte und in feuchteren Bereichen schwerer geschädigt waren. Zudem wurde ein Schätzmodell parametrisiert, um die Umsturzwahrscheinlichkeit von Eschen in Abhängigkeit ihres BHDs und vorher diagnostizierten Stammfußnekrosen zu schätzen (Abb. 3). Insbesondere Stammfußnekrosen der Stufe 2 reduzieren die Standsicherheit von Eschen enorm.

Teilvorhaben 2219WK20D4

1. Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens

In Rahmen des Forschungsverbundes FraxMon bearbeitet das Fraunhofer IFF in enger Zusammenarbeit mit dem FFK Gotha (ThüringenForst) das Arbeitspaket 2.5 „Weiterentwicklung der Erfassung der Eschenvitalität“.

Die räumlich und spektral hochauflöste Aufnahme der Waldbestände mit Hyperspektralkamerasystemen bietet in der Fernerkundung mit optischen Sensoren das größte Potenzial zur Unterscheidung verschiedener Baumarten einerseits und verschiedener Vitalitätszustände innerhalb einer Baumart andererseits.

Zielstellungen innerhalb des Arbeitspaketes sind

- die Vorbereitung und Durchführung von Befliegungen ausgewählter IBF,
- die geometrische und radiometrische Korrektur der Hyperspektralaufnahmen,
- die Ableitung von Indizes zur Erfassung der Esche und deren Vitalität mit Methoden des maschinellen Lernens und statistischer Datenanalyse,
- die Kalibrierung und Test der Indizes anhand der auf den IBF terrestrisch erfassten Parameter,
- die Ableitung von Empfehlungen zur Optimierung der Vitalitätserfassung der Esche auf Basis einer Relevanzbewertung der verschiedenen Wellenlängenbereiche.

2. Bearbeitete Arbeitspakete

AP 2.5: Weiterentwicklung der Erfassung der Eschenvitalität	Untersuchung der Nutzung von Hyperspektralkamera-systemen
---	---

3. Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens

Vorbereitung und Durchführung der hyperspektralen Befliegungen 2021 und 2022

Das Fraunhofer IFF verfügt in ihrem Spektrallabor über diverse Hyperspektral-Kamerasysteme, die für unterschiedliche Anwendungsfälle und -szenarien geeignet sind. Für den Einsatz im Projekt FraxMon wurden zwei HySpex-Kameras der Firma NEO ausgewählt. Zum einen die **HySpex VNIR 1800**, welche 186 Bänder im Wellenlängenbereich von 400-1000 nm mit einer räumlichen Auflösung von 1800 Pixeln aufnimmt. Zum anderen die **HySpex SWIR 384**, welche 288 Bänder im Wellenlängenbereich von 930-2500 nm mit einer räumlichen Auflösung von 384 Pixeln aufnimmt. Da pro Messung (ca. 100 pro Sekunde bei beiden Kameras) jeweils eine einzelne Bildzeile aufgenommen wird, spricht man von Zeilenscannern.

Um im späteren Verlauf den Bilddaten die passende geographische Lage zuordnen zu können, ist der Einsatz eines **Inertialmesssystems**, sowie einer **GNSS-Antenne** erforderlich, mit der hochgenau die Lage der Kameras (Orientierung, geografische Koordinaten, Höhe) aufgezeichnet werden. Die Bildstabilisierung und die Genauigkeit der Lagebestimmung haben wesentlichen Einfluss auf die Qualität der Orthorektifizierung und der Georeferenzierung der hyperspektralen Bilder.

Als Inertialmesssystem verfügt das Fraunhofer IFF über ein Applanix POS AV 610. Zur Erreichung der erforderlichen Genauigkeit für die Positionsbestimmung wird das Abonnement eines Referenzsignals (Omnistar Airstar) oder eine Postprocessing Software für die Rohdaten des Inertialmesssystems (POSPac Mobile Mapping Suite) benötigt. Die Stromversorgung der Kameratechnik erfolgt in der Regel über das Bordnetz des Flugzeugs (Spannung 24V) mit den dafür ausgelegten Netzteilen. Aus Gründen der Flugsicherheit sind die Geräte fest zu montieren, was in der Regel mechanische Anpassungen an das konkret eingesetzte Flugzeug zur Folge hat. Hierfür wurden Adapterplatten angefertigt, auf denen die Technik montiert wird und die die mechanische Schnittstelle zum Flugzeug bilden.

Zusätzlich wurde bei den Befliegungen im Projekt eine **Sony Alpha 7** (ILCE-4M2) Digitalkamera eingesetzt. Diese dient der späteren zusätzlichen räumlichen Höhenauflösung der beflogenen Gebiete. Über die Verwendung von hochgenauen Passpunkten, zum Beispiel der Landesvermessungsämter, können auf Basis der RGB-Bilder der Digitalkamera sehr hochauflöste Oberflächenmodelle berechnet werden, welche die Qualität der Orthorektifizierung und Georeferenzierung der hyperspektralen Luftbilder nochmals erhöht und somit auch eine größere Genauigkeit in der Erkennung der Bäume in den Flächen und deren Charakterisierung ermöglicht. Abbildung 39 zeigt den Aufbau des Kamerasystems.

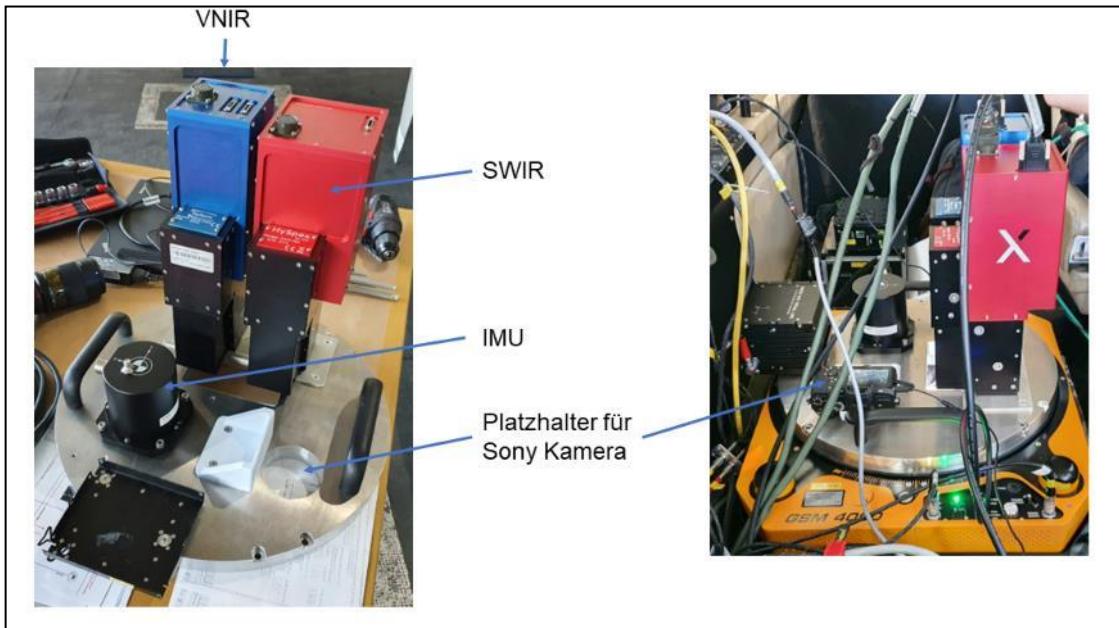


Abbildung 39: Aufbau der Kameras auf die Trägerplatte (links) bzw. im Flugzeug (rechts).

Die Befliegungsplanung und -vorbereitung ist in zwei Phasen aufgeteilt. Sie umfasst einerseits Voruntersuchungen, technische Anpassungen und einen Testflug, der im Jahr 2020 durchgeführt wurde. Die Ergebnisse dieser Arbeiten flossen in die Planungen für die Befliegungen im Jahr 2021 und 2022 ein.

Anschließend an die vorbereitenden Arbeiten zur Einrichtung des Sensorsystems für die Hyperspektralbefliegungen im Teilprojekt wurden in Zusammenarbeit mit den Verbundpartnern die Waldflächen für die hyperspektren Datenerhebungen und -auswertungen im Verbundprojekt FraxMon ausgewählt, abgestimmt und festgelegt. In Abbildung 40 sind die gewählten Flugstreifen exemplarisch für eine Befliegung dargestellt.



Abbildung 40: Flugstreifen für die Versuchsfläche in Schwansee für die Sommerbefliegung 2022 (Visualisierung: Google Earth).

Die Flächenvorbereitung und die geplanten Befliegungen wurden zwischen den Partnern IFF (TV 4) und ThüringenForst abgestimmt. Um in den dichtbewachsenen Wäldern der Flächen Passpunkte zur Georeferenzierung zu finden, wurden vor der Frühjahrsbefliegung von ThüringenForst Messmarken ausgelegt und deren genaue geographische Lage vermessen. Es wurden vier Befliegungen (jeweils Frühjahr und Sommer, 2021 und 2022) mit den Hyperspektralkameras und der RGB Kamera durchgeführt.

Datenvorverarbeitung für die hyperspektralen Befliegungen

Nach der hyperspektralen Befliegung ist eine aufwändige Datenvorverarbeitung notwendig, um eine vergleichbare und mit maschinellem Lernen auswertbare Datengrundlage zu schaffen. Dabei werden aus den Zeileninformationen der Hyperspektralkameras orthorektifizierte Bilder generiert und dabei Aufnahmebedingungen und Flugbewegungen berücksichtigt. Es wurde eine Vorverarbeitungspipeline etabliert, welche die Verarbeitungsschritte:

1. Orthorektifizierung auf RGB-Bildern
2. Datenvorverarbeitung der Hyperspektralaufnahmen:
 - o Radianzkorrektur,
 - o Postprocessing der Navigationsdaten für Hyperspektralaufnahmen,
 - o Orthorektifizierung,
 - o Georeferenzierung,
 - o Atmosphärenkorrektur,

umfasst. Die dazu notwendigen Programm Pakete wurden beschafft und auf dem aktuellen Stand gehalten. Im Projektverlauf wurde die Vorverarbeitung mehrmals angepasst und verbessert.

Datenauswertungsverfahren für das maschinelle Lernen

Die Voraussetzung für den Einsatz von Methoden des Maschinellen Lernens ist die Erstellung einer repräsentativen Stichprobe, welche die Variabilität der Daten innerhalb einer Klasse ausreichend abbildet und die sich ohne Überscheidungen sicher in Trainings-, Test- und Validierungsgröße teilen lässt.

Um zu vermeiden, dass während des maschinellen Lernens Pixel derselben Baumkrone für Training und Validierung genutzt werden würden, wurden Verfahren entwickelt, die auf Grundlage des VNIR Hyperspektralbildes die Bildpunkte den einzelnen Baumkronen zuordnen (Abbildung 41). Dazu kam eine Kombination verschiedener Algorithmen der Bildverarbeitung zum Einsatz, es wurden aber auch Methoden des Clustering auf Basis neuronaler Netzwerke untersucht. Die Parametrisierung der Algorithmen erfolgte auf der Basis interaktiv eingezeichneten Baumkronen an Beispielbilder.

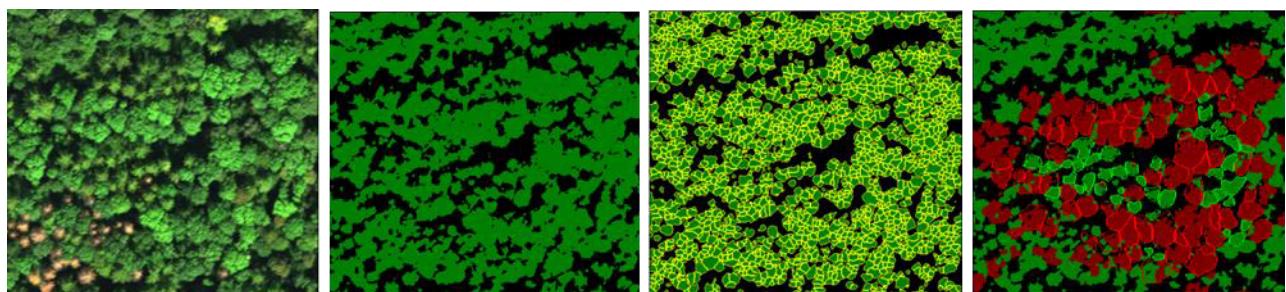


Abbildung 41: Schritte der Eschenklassifikation mit dem ML-Modell von links nach rechts am Beispiel der IBF NI1: VNIR-Orthofoto, Vorder-/Hintergrundsegmentation, Baumkronensegmentierung, Segmentklassifizierung. In der Abbildung rechts ist die Klassifizierung als Esche rot und Nicht-Esche grün dargestellt und in hellerer Farbe als Umrandung sind die Kronenumrisse der Lernstichprobe dargestellt.

Die Kronenzuordnung der Reflektanzspektren einzelner Bildpunkte erlaubt eine Validierung (Leave-One-Out-Kreuzvalidierung) der ermittelten ML-Modelle sowohl über Baumkronen als auch über die einzelnen Flächen.

Zur Vorverarbeitung der Spektren wurden verschiedene Normierungs- und Auswahlverfahren untersucht. Diese dienen vor allem dazu unterschiedliche Beleuchtungsverhältnisse durch Schattenwurf innerhalb der Baumkronen auszugleichen. Sehr dunkle, im Schatten liegende Bildpunkte werden im Allgemeinen nicht direkt (Sonne, Himmel) sondern indirekt durch umliegende helle Blätter beleuchtet, was das Reflektanzspektrum verfälscht. Es hat sich als sinnvoll erwiesen, diese Bildpunkte auszusortieren und dazu eine Schwelle der minimalen mittleren Helligkeit über das Spektrum einzuführen. Kleine Helligkeitsschwankungen werden über das sog. „Z-Score“ normiert, das in den Verarbeitungsprozess integriert wurde. Mit diesem Verfahren wird die Reflektanz jeder Wellenlänge auf den Mittelwert und die Standardabweichung der gesamten Lernstichprobe normiert.

Um das Ergebnis der Klassifikation Esche vs. Nicht-Esche zu beurteilen wurde eine Leave-One-Out-Kreuzvalidierung über Flächen durchgeführt. Dabei wurde eine Klassifikationsgenauigkeit von größer 78% erreicht (siehe Abbildung 42).

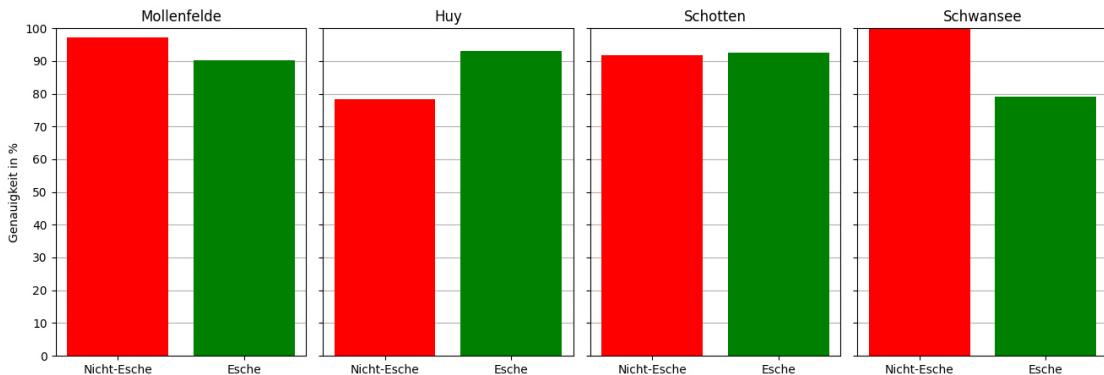


Abbildung 42: Ergebnis der Leave-One-Out-Kreuzvalidierung. Die Genauigkeit ist für die beiden Klassen - Eschen und Nicht-Eschen - separat angegeben.

Da die Schadstufen sich sehr inhomogen über die drei Flächen verteilen wurden die Flächen zusammengeführt und die Schadstufen in zwei Klassen (0-2 und 3-5) zusammengefasst. Mit den vorgenommenen Anpassungen und Verbesserungen war es möglich, die Korrektklassifikationsrate des Zwei-Klassenproblems der Kreuzvalidierung zunächst für VNIR von 77,7 % ($\pm 2,9 \%$) auf 97,8 % ($\pm 0,3 \%$) zu verbessern.

Für den späteren Einsatz auf größeren Flächen wurden Indizes aus wenigen Wellenlängen untersucht. Indizes lassen sich wesentlich einfacher und kostengünstiger einsetzen als Vollspektrum – Hyperspektralkameras.

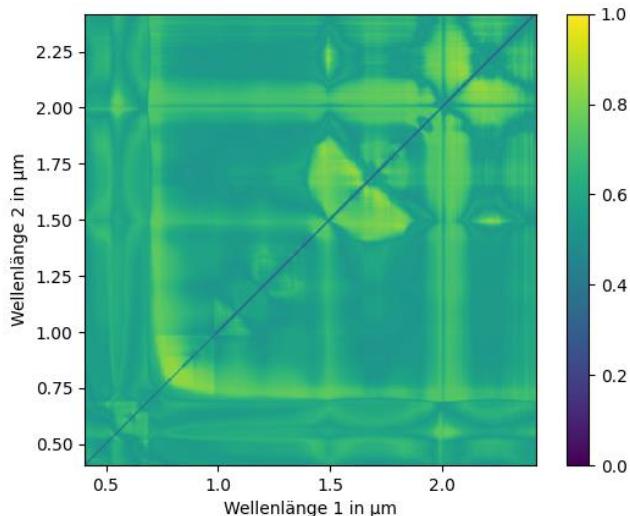


Abbildung 43: Relevanzanalyse der normalisierten Differenzen für die Eschenerkennung. Gezeigt ist das jeweilige Minimum über die Flächen HE1, NI1, ST1.

Sowohl für die Eschenerkennung als auch für die Schadstufenbestimmung wurden intensive Relevanzanalyse möglicher Indizes durchgeführt. Dazu wurde die Kombination von jeweils 2 Wellenlängen systematisch getestet. Beispielhaft ist in Abbildung 43 die Relevanzanalyse der normalisierten Differenz als Minimum über die einzelnen IB-Flächen dargestellt. Daraus abgeleitet wurde zunächst der Index IFFN800830 = $\frac{R_{800nm} - R_{830nm}}{R_{800nm} + R_{830nm}}$ als möglicher Kandidat für Eschenerkennung aufgestellt. Als Eingangsgröße für eine logistische Regression erlangt dieser Index bei einer Leave-One-Out-Kreuzvalidierung über die drei Flächen eine gemittelte (klassen- und baumkronenbalancierte) Erkennungsrate von 81%, wobei die flächenspezifische Erkennungsrate von 69% in Schotten über 85% in Huy bis zu 90% in Mollenfelde schwankt.

Veröffentlicht wurde der zur Dreiländertagung der DGFP eingereichte wissenschaftliche Beitrag „Eschentriebsterben – Erkennung der Eschenvitalität mit hyperspektralen Fernerkundungsdaten“ ([Knauer 2022] Knauer, U., Holstein, K., Thielert, B., Schmelz, D., Ehrhardt, I.: DGFP, der OVG und der SGPF, Band 30, 2022). Der Vortrag wurde im Rahmen der DGFP-Jahrestagung 2022 gehalten. Das Fraunhofer IFF präsentierte das Projekt Fraxmon ebenfalls im Rahmen der 6. KWF-Thementage vom 31.3. bis 2.4.2022 in Jessen / Sachsen-Anhalt an einem gemeinsamen Ausstellungsstand mit dem Landesforstbetrieb Sachsen-Anhalt. Ein eigens für die Präsentation auf Messen gestalteter Projektflyer FraxMon diente hierbei zur Ansprache und Information der Teilnehmenden an den Thementagen.

Teilvorhaben 2219WK20E4

1. Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens

Das Teilvorhaben wurde personell betreut vom Sachbearbeiter Christopher Lux und im Anschluss von Christian Hommeyer. Die Hauptaufgabe des Teilvorhabens“ war im Wesentlichen die zwei Untersuchungsflächen in Thüringen zu betreuen und diese nach den Anforderungen der einzelnen Teilprojekte zu bearbeiten und Daten zu erheben. Dabei handelt es sich um die Intensivbeobachtungsfläche (TH1 Ettersberg) bei Weimar und die Dauerbeobachtungsfläche nordöstlich von Erfurt (TH2 Schwansee).

Außerdem hat das FFK Gotha die Erfassung terrestrischer Parameter für die Kalibrierung der Fernerkundungsindices als Grundlage für die Bewertung der Vitalität der Eschen mit Methoden des maschinellen Lernens und statistischer Datenanalyse übernommen. Dies erfolgt in enger Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer IFF. An folgenden Arbeitspaketen hat das FFK Gotha mitgewirkt:

TP	AP	Thema
TP 1.1 Koordination	1.1 1.2	Koordination des Unterverbundes FraxMon bzgl. der vier Monitoringebenen Koordination der bundesweiten Auswahl und Einrichtung von ca. 20 Monitoringflächen (IMF), Monitoringleitfaden erstellen
TP 1.2 Fernerkundungsbasis. Monitoringsystem zur Erfassung des Eschentreibsterbens	2.1 2.4 2.5	Anpassung des Interpretationsschlüssels zur Identifizierung von Eschenbeständen und deren Vitalität Inventurdesign und Luftbildinterpretation Weiterentwicklung der Erfassung der Eschenvitalität
TP 1.3 Auswertung Rasternetze, Feinkartierung	3.1	Akquise und Auswertung von WZE-/ BZE-Daten; Feinkartierung der IBF
TP 1.4 Vitalitätsdiagnostik, Früherkennung (IBF)	4.1 4.4	Stressphysiologische Diagnostik der Esche zur Bewertung der Vitalität und Prädisposition gegenüber <i>Hymenoscyphus fraxineus</i> in 14 Monitoring- beständen Messung der Sporenbelastung

2. Bearbeitete Arbeitspakte

AP 1.1 Koordination des Unterverbundes FRAXMON bzgl. der vier Monitoringebenen

enge und gute Zusammenarbeit mit der Koordination, Teilnahme an FraxforFuture-Tagungen in Kassel und Göttingen, Mitarbeit an Posterpräsentationen, Handlungsempfehlung, Erstellung Zwischen- und Abschlussbericht

AP 1.2 Koordination der bundesweiten Auswahl und Einrichtung von ca. 20 Monitoringflächen

Auswahl von 2 Beobachtungsflächen und Zäunung

AP 2.1 Anpassung des Interpretationsschlüssels zur Identifizierung von Eschenbeständen

intensive Mitarbeit am Interpretationsschlüssel sowie Teilnahme an Schulungen an der FVA und NWV

AP 2.4 Inventurdesign und Luftbildinterpretation

Mitarbeit bei der Luftbildinterpretation

AP 2.5 Weiterentwicklung der Erfassung der Eschenvitalität

Vorbereitung und Organisation der Befliegungen gemeinsam mit dem Fraunhofer IFF-Institut und terrestrische Begutachtung, Erkenntnissen Grundlage für Lernstichprobe

AP 3.1 Akquise und Auswertung von WZE-/ BZE-Daten; Feinkartierung der IBF

alle benötigten Zuarbeiten und Unterstützung

AP 4.1 Stressphysiologische Diagnostik der Esche zur Bewertung der Vitalität

Bonitierung ausgewählten Probäume (Eschen mit verschiedenen Vitalitätsstufen)

AP 4.4 Messung der Sporenbelastung.

Betreuung von 2 Sporenfallen

3. Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens

Thüringen kann auf keine eigenständigen Ergebnisse verweisen, da in verschiedenen Teilvorhaben eine intensive Mitarbeit erfolgte. Zu den erbrachten Leistungen gehörten:

- IBF TH1 Ettersberg vollständig inventarisiert (BHD, Höhen, Schäden, Koordinaten usw.)
- Bonituren im Winter und Sommer
- 4 Verjüngungsplots auf der IBF TH1 Ettersberg eingerichtet (Verjüngungsansprache)
- Probennahmen (Blatt / - und Holzproben) begleitet
- Anlage eines Bodenprofils auf der IBF TH1 Ettersberg, bleibt erhalten (für Exkursionen usw.)
- Terrestrische Einmessung von Plusbäumen für die Blattbeobachtung
- Erhebung von Lerndaten (Lerndaten Eschen vs. Nicht-Eschen bzw. Lerndaten Eschen versch. Schadstufen) im Rahmen der Auswertung der Hyperspektral-Befliegungen
- Gemeinsame Cloud mit Informationsmaterial versorgt
- Bereisung einiger anderer IBF in Deutschland, um genaue Absprachen bei den Aufnahmeparametern zu treffen
- Öffentlichkeitsarbeit: Infotafeln an beiden Untersuchungsflächen aufgestellt, Führung gemeinsam mit dem zuständigen Forstamt, Pressearbeit zu den Untersuchungen
- Gemeinsame Cloud mit Informationsmaterial befüllt
- Mitarbeit und Unterstützung bei FraxSilva, FraxGen und FraxPath
- Untersuchungsflächen können für weiterführende Untersuchungen genutzt werden



Abbildung 44: Oben links: Infotafel an der IBF TH1 Ettersberg. Oben rechts: Markierte Untersuchungsflächen (grün gezäunt) auf dem Luftbild. Unten links: Blick in die Untersuchungsfläche TH2 Schwansee zum Zeitpunkt der Sommerbonitur.

Teilvorhaben 2219WK20F4

1. Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens

Aufbauend auf den für Mecklenburg-Vorpommern entwickelten Interpretationsschlüssel soll ein bundesweit abgestimmter Schlüssel entwickelt werden. Hierzu werden vorhandene Referenzdaten, sofern zeitgleich aufgenommene Luftbilddaten existieren, verwendet. Dazu gehören beispielsweise die von der FVA 2015 durchgeführte Escheninventur an ausgewählten BWI-Tracktecken und vorhandene Luftbildbefliegungen aus demselben Jahr. Für die Weiterentwicklung werden zusätzliche Referenzbefliegungen von geschädigten Eschen mit unterschiedlichen Befliegungsparametern (Auflösung, Überlappung und Kamera), Bestandessituationen (Stangenholz, Baumholz, Mischungsformen, Expositionen) und in verschiedenen Jahreszeiten eingesetzt. Als Referenz- und Validierungs-Daten werden die Aufnahmen aus andern Teilprojekten des Verbundvorhabens, welche an den IBF und den WZE-Punkten erhoben werden sowie eigene Zusatzaufnahmen verwendet.

2. Bearbeitete Arbeitspakete

AP 2.1 Anpassung des Interpretationsschlüssels zur Identifizierung von Eschenbeständen und deren Vitalität	Anpassung des Interpretationsschlüssels zur Vitalitätsansprache von Eschen in Stereo-Luftbildern basierend auf Erfahrungen in der Anwendung
---	---

Auswahl, Einrichtung und Betreuung der IBF MV1 Karlsburg. Dazu gehörten u. a. die jährlichen Vitalitätsanprachen (Sommer und Winter), die Phänologischen Ansprachen und die Betreuung des Sporensammlers für den Projektpartner Katholische Universität Eichstätt-Ingolstadt, die Durchführung der Verjüngungsbonitur für die Projektpartner im FraxSilva, die Unterstützung bei der Einmessung der IBF Schwanensee.

3. Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens

Erstellung und Vorbereitung zur Veröffentlichung der Interpretationsschlüssel für Stereo-Luftbilder zur Identifizierung von Eschen und zur Vitalitätsansprache von Eschen.

Teilvorhaben 2219WK20G4

1. Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens

Das Ziel des Teilvorhabens 7 (TP 1.4; AP 4.2) war es, die Ausbreitung des Erregers des Eschentriebsterbens in verschiedenen Geweben mittels mikroskopischer Methoden zu detektieren. Die Untersuchungen wurden an Blättern und Sprossgewebe durchgeführt. Im Rahmen des Teilvorhabens standen die folgenden Ziele im Fokus:

- Entwicklung geeigneter labordiagnostischer Verfahren zur Differenzierung des Befalls
- Visualisierung von baumphysiologischen Abwehrstrategien

2. Bearbeitete Arbeitspakete

Arbeitspaket	Thema
4.2	<p>Probennahmen (2020-2022) von Blatt- und Holzproben konnte auf zwölf Flächen erfolgreich durchgeführt werden</p> <p>Lichtmikroskopische Analyse der Gewebeproben aus Probenahme 2020-2022 abgeschlossen</p> <p>REM-Analysen an ausgewähltem Probenmaterial wurde abgeschlossen</p> <p>Zusätzlich bearbeitet: Lichtmikroskopische Analyse von Gewebeproben aus verschiedenen Inokulationsversuchen von 2022/23 anderer Teilprojekte abgeschlossen</p>

Meilensteine Teilprojekt 1.4 im Berichtszeitraum

AP	Meilenstein	Teilziel	Geplantes Quartal	Status
4.1 4.2	1 6	Probennahme (2021) Blatt-, Zweig- und Holzproben für die AP 4.1 und 4.2 abgeschlossen	2/21	abgeschlossen
Alle	3	Zwischenbericht	1/21	abgeschlossen
4.2	5	Lichtmikroskopische Analyse der Gewebeproben aus Probenahme 2020 abgeschlossen	4/21	abgeschlossen
4.2.		Publikationstätigkeit	laufend	veröffentlicht
Alle	3	Zwischenbericht	2/22	abgeschlossen
4.2	11	REM-Analysen exemplarischer Gewebeproben aus Probennahmen 2020/2021	3/22	abgeschlossen
4.2	12	Lichtmikroskopische Analyse der Gewebeproben aus Probenahme 2021	4/22	abgeschlossen
4.1 4.2	17	Probennahme (2022) Blatt-, Zweig- und Holzproben für die AP 4.1 und 4.2	3/22	abgeschlossen
4.2.		Lichtmikroskopische Analyse der Gewebeproben aus Probenahme 2022	4/23	abgeschlossen
Alle	3	Abschlussbericht	1/24	vorliegend

3. Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens

Es konnte eine passende Methodik etabliert werden, um die hyalinen Hyphenstrukturen des Pilzes zu differenzieren. Die mikroskopische Analyse von Probenmaterial aus den Baumkronen adulter Eschen der IBF ließ keine Korrelation zwischen den Bonituren und den sichtbaren mikroskopischen Symptomen erkennen. An symptomatischen Probenmaterial ließen sich pathogeninduzierte Befallsbilder bzw. Pathogen-Wirt-Interaktionen anhand von bereits äußerlich erkennbaren lokalen nekrotischen Bereichen im Rindenparenchym beobachten. Die nekrotisierten Zonen wurden innerhalb des Rindengewebes oftmals durch neu gebildetes Wundperiderm radial abgeschottet. Weitere wirksame induzierte als auch konstitutive Abwehrmechanismen konnten nicht sicher bestimmt werden. Verthyllungsreaktionen stellten eher die Ausnahme dar und scheinen

nicht als induzierte Abwehrreaktion auf das Eschentriebsterben zu korrespondieren. Mutmaßlich wurden jedoch in den parenchymatischen Zellen phenolische Substanzen eingelagert.

Zur eindeutigeren Beschreibung der Morphologie des Pilzes im Wirt wurden zusätzlich Sprossachsen von Jungpflanzen mit Symptomen aus natürlicher Infektion und Sprossachsen aus Inokulationsversuchen mit *H. fraxineus* in Reinkultur untersucht. Am gesamten Probenmaterial wurden nur in offensichtlich befallenen Bereichen und im Xylem Hyphenstrukturen detektiert. Dabei war das Hyphenvorkommen nur sehr spärlich und in den Lumina aller Zelltypen zu finden. Am häufigsten konnten die Hyphenstrukturen im Lumina von Gefäßen und Markparenchym beobachtet werden. Die Besiedlung scheint systemisch: die Hyphen breiten sich mehr oder weniger unspezifisch über das gesamte Gewebe hinweg aus, sie nutzen dafür die Wegbarkeiten des Strahlenparenchyms, von Tüpfelöffnungen und Gefäßdurchbrechungen. Degradationserscheinungen von Zellwänden wurden nicht sichtbar. Die Hyphendurchmesser variierten stark und lagen im Xylem zwischen 0,4 und 4 µm.

Teilvorhaben 2219WK20H4

1. Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens

Ziel des Teilprojektes war es, zu klären, welche Pflanzeneigenschaften (u. a. phänologische Traits, Chlorophyll, Pollenviabilität) der Esche sich als Frühindikatoren zur physiologischen Bewertung der Vitalität und Befallsdisposition im Rahmen eines bundesweiten Monitorings eignen. Gleichzeitig wurde das Vorhandensein des Pilzes untersucht und die Sporenkonzentration abgeschätzt, um den Infektionsdruck zu überwachen sowie die zeitliche Kopplung zwischen dem Auftreten der Sporen und der phänologischen Phase des Wirtes zu untersuchen.

2. Bearbeitete Arbeitspakete

Arbeitspaket	Thema
4.1	Stressphysiologische Diagnostik der Esche zur Bewertung der Vitalität und Prädisposition gegenüber <i>Hymenoscyphus fraxineus</i> in 10 Monitoringbeständen IBF und 3 bay. IBF
4.3	Phänologische Beobachtungen
4.4	Messung der Sporenbelastung
4.5	Untersuchung der Pollenviabilität und -keimung

3. Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens

3.1 Zusammenfassung

Die wesentlichen Ergebnisse des Projektes sind bereits im Hauptteil (Kapitel 5) genannt. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass sowohl der Chlorophyllgehalt der Blätter als auch die Pollenviabilität und Pollenkeimung nicht als Resistenzindikator herangezogen werden können. Der vollständige Blattverlust repräsentiert den besten Anzeiger für eine geringere Anfälligkeit der Eschen gegenüber dem Eschentreibsterben. Ein Fortführen des Monitorings der Schadentwicklung und der Phänologie kann Aufschlüsse darüber geben, ob diese Tendenz in weiteren Beobachtungsjahren Bestand hat. Der Sporendruck und die Pilzabundanz variieren stark innerhalb Deutschlands und hängen u. a. von meteorologischen Bedingungen, vor allem vom Niederschlag, ab. Durch eine künftige Erfassung und Regionalisierung der Sporenkonzentration kann ein besseres Verständnis für das saisonale Ausbreitungsmuster der Sporen in Deutschland entwickelt werden. Dadurch können auch wesentliche Treiber für diese Muster erkannt werden, was konkrete Prognosen ermöglicht.

3.2 Ergänzende Ergebnisse

Zu Komplettierung der Ergebnisdarstellung werden im Folgenden die Ergebnisse zur Länge der Vegetationsperiode auf den bayerischen Flächen und die Auswertungen zu den phänologischen Beobachtungen auf den gesamtdeutschen IBF aufgeführt.

3.2.1 Länge der Vegetationsperiode

Wie in Kapitel 5.1.1 bereits erwähnt, ergab die Auswertung der Länge der Vegetationsperiode einen Unterschied für Bäume mit unterschiedlichem Schädigungsgrad. In drei von sechs Fällen (2021: BY1, BY2; 2022: BY3) war dieser signifikant ($p < 0,050$; Abbildung 45). Es zeigte sich, dass stärker geschädigte Eschen im Mittel im Jahr 2021 eine um 8 Tage und im Jahr 2022 eine um 6 Tage kürzere Assimulationsperiode aufweisen.

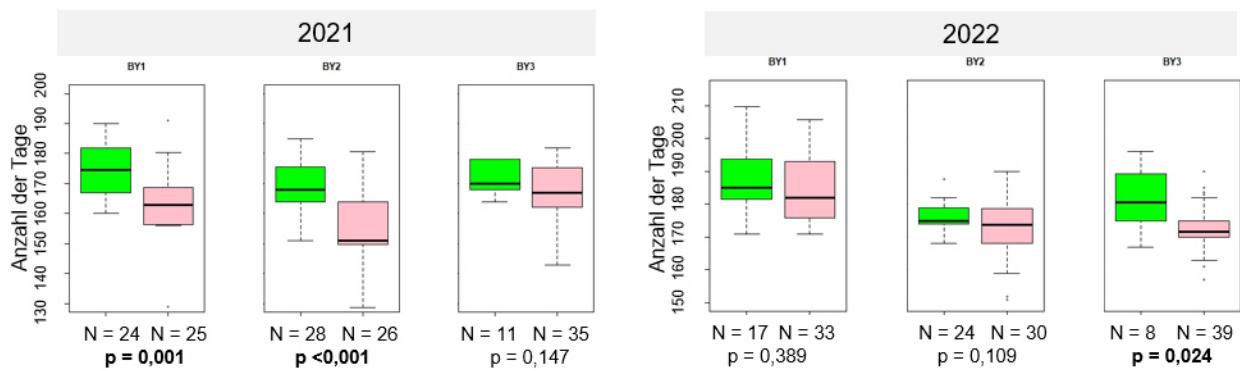


Abbildung 45: Vergleich der Vegetationsperiode zwischen Bäumen mit der Bonitur 1/2 (grün) und 3/4 (rot), dargestellt mittels Boxplots für die Jahre 2021 und 2022; fett gedruckte p-Werte repräsentieren signifikante Unterschiede.

3.2.2 Gesamtdeutscher Überblick

Die Phänologie auf den Flächen außerhalb Bayerns wurde jeweils zu einem Zeitpunkt im Frühjahr sowie im Herbst aufgenommen. In Abbildung 46 sind die unterschiedlichen phänologischen Entwicklungsstufen dieser Flächen (inkl. der bayerischen IBF) farblich dargestellt. Auch hier zeigt sich bei Betrachtung der weitesten Entwicklung, dass sich die Herbstphänologie zur Diskriminierung der Schadstufen (Bonitur 1/2 – weniger stark geschädigt vs. Bonitur 3/4 – stark geschädigt) besser eignet (siehe dazu auch Ausführungen im Hauptteil unter Kapitel 5.1.3).

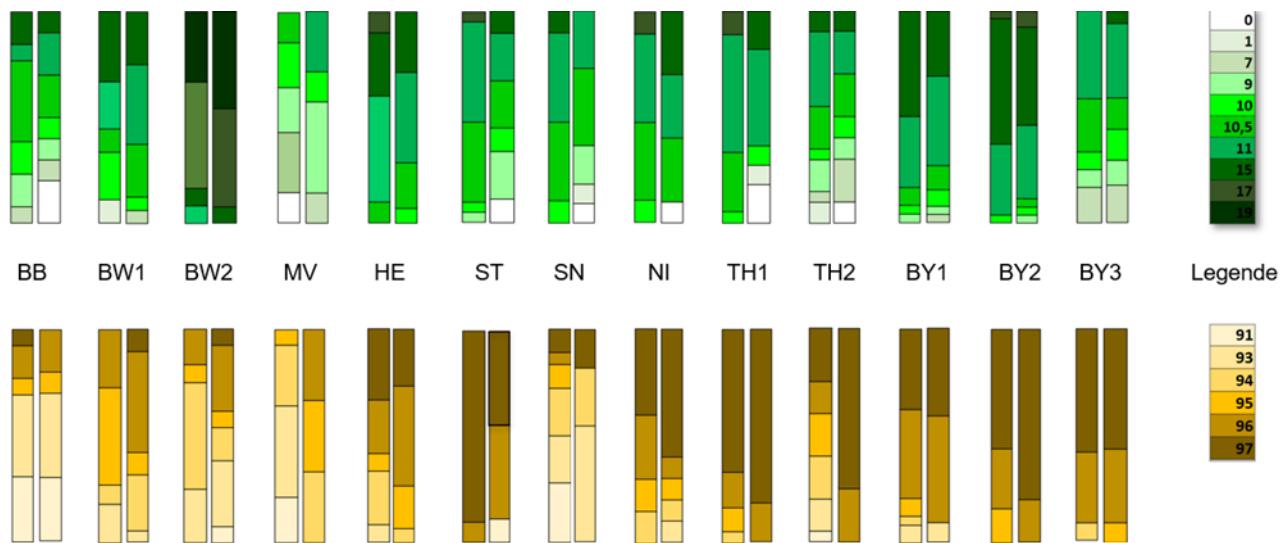


Abbildung 46: Grafische Darstellung der unterschiedlichen phänologischen Entwicklung der Eschen im Frühjahr (grün) und Herbst (braun) auf den IBF nach BBCH Codes. Die linke Spalte stellt die Phänologie der Eschen mit Bonitur 1/2 dar, die rechte Spalte die der Eschen mit Bonitur 3/4.