



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Bundesamt für Umwelt BAFU
Wald- und Holzforschungsförderung Schweiz WHFF-CH

Office fédéral de l'environnement OFEV
Soutien à la Recherche Forêt et Bois en Suisse FOBO-CH

Ufficio federale dell'ambiente UFAM
Sostegno alla ricerca sulle foreste e il legno FOLE-CH



Birmensdorf, 30.04.2026

Fachlicher Schlussbericht

PROJEKT SURVIVASH 2.0

Projekt no. 2022.09 GESUNDE ESCHEN

Suche toleranter Eschen gegenüber Eschentriebsterben und Eschenprachtkäfer und
Erarbeitung von Massnahmen zur Förderung einer gesunden Eschenverjüngung in der
Schweiz



INHALTSVERZEICHNIS

1 ABSTRACT	4
1.1 Deutsch:	4
1.2 Français :	4
1.3 English:	4
2 ZUSAMMENFASSUNG	5
2.1 Deutsch:	5
2.2 Français :	6
3 AUSGANGSLAGE.....	7
3.1 Einleitung	7
3.2 Stand der Forschung.....	8
3.2.1 Resistenzsuche gegen Eschentriebsterben	8
3.1.2 Resistenzsuche gegen Eschenprachtkäfer	8
4 PROJEKTZIELE UND FORSCHUNGSFRAGEN	8
5 METHODEN	9
5.1 Auswahl der Genotypen und Pflöpfen.....	9
5.2 Resistenztests	9
5.2.1 Resistenztest gegen den Eschentriebsterben	9
5.2.2 Resistenztest gegen den Eschenprachtkäfer	10
6 ERGEBNISSE.....	11
6.1 Erfolgreiche Pflöpfung 2023 und Wachstum der Pflöpflinge	11
6.2 Resistenztests	12
6.2.1 Eschentriebsterben-Resistenz	12
6.2.2 Resistenz gegen EPK-Larven	13
6.2.3 Kreuzresistenz:.....	15
7 NUTZEN FÜR DIE PRAXIS.....	16
8 SCHLUSSFOLGERUNGEN.....	16
9 DANKSAGUNG	16
10 LITERATUR	17
11 ANHANG	19

VERWENDETE ABKÜRZUNGEN

AG	Aargau
BE	Bern
BS	Basel-Stadt
EPK	Eschenprachtkäfer, <i>Agrilus planipennis</i>
ETS	Eschentriebsterben, <i>Hymenoscyphus fraxineus</i>
FR	Fribourg
GR	Graubünden
JU	Jura
SG	St. Gallen
SZ	Schwyz
TG	Thurgau
WSS	Waldschutz Schweiz
ZH	Zürich

Abréviations utilisées

ADF	Agrile du frêne, <i>Agrilus planipennis</i>
AG	Argovie
BE	Berne
BS	Basel-Stadt
DPF	Dépérissement des pousses du frêne, <i>Hymenoscyphus fraxineus</i>
FR	Fribourg
GR	Grisons
JU	Jura
SG	St. Gall
SZ	Schwyz
TG	Thurgovie
WSS	Protection de la forêt suisse (Waldschutz Schweiz)
ZH	Zürich

1 ABSTRACT

1.1 Deutsch:

Das Überleben der europäischen Esche (*Fraxinus excelsior*) ist durch das Eschentriebsterben (ETS, *Hymenoscyphus fraxineus*) bedroht, das in der Schweiz bereits erhebliche Schäden verursacht hat. Darüber hinaus stellt das Auftreten des Eschenprachtkäfers (*Agrilus planipennis*, EPK) in Osteuropa eine neue Gefahr für das Überleben der Esche dar. Survivash2.0 zielt darauf ab vermutlich gegen ETS und EPK resistente Eschen zu testen und ihre Resistenz empirisch bestätigen

1.2 Français :

La survie du frêne européen (*Fraxinus excelsior*) est menacée par la maladie du dépérissement des pousses du frêne, ou chalarose (DPF, *Hymenoscyphus fraxineus*), qui a déjà causé des dégâts considérables en Suisse. De plus, la présence de l'agrile du frêne (*Agrilus planipennis*, ADF) en Europe de l'Est représente un nouveau péril pour la survie du frêne. Survivash2.0 vise à tester des frênes supposés résistants face au DPF et l'ADF et confirmer empiriquement leur résistance.

1.3 English:

European ash (*Fraxinus excelsior*) long term survival is compromised by the Ash dieback disease (ADB, *Hymenoscyphus fraxineus*), whose damages on Swiss ash tree populations have already been considerable. Moreover, the presence of the emerald ash borer (*Agrilus planipennis*, EAB) in Eastern Europe represents a new threat to European ash survival. Survivash2.0 aims at testing supposedly resistant ash trees against ADB and EAB and empirically confirming their resistance.

2 ZUSAMMENFASSUNG

2.1 Deutsch:

Durch das Eschentriebsterben (ETS, *Hymenoscyphus fraxineus*) und den sich vom Einschleppungsort Moskau weiter Richtung Westen ausbreitenden Eschenprachtkäfer (EPK, *Agrilus planipennis*) ist die Esche (*Fraxinus excelsior*) als Baumart in Europa stark gefährdet. In der Schweiz war die Esche (bis Landesforstinventur 3) nach der Buche auf die Stammzahl bezogen die zweitwichtigste Laubbaumart. Durch das ETS ist sie in nur wenigen Jahren auf den dritten Rang hinter den Bergahorn gerutscht.

Ein Verlust der Esche in den Schweizer Wäldern würde nicht nur die Baumvielfalt schmälern, sondern auch die allgemeine Biodiversität gefährden. Viele Insekten-, Tier- und Pilzarten sind auf die Esche oder auf die von ihr dominierten Waldgesellschaften spezialisiert. Erste Symptome des ETS wurden 2008 in der Nordwestschweiz entdeckt. Danach breitete sich der Pilz rasant aus und erreichte bereits 2015 die Südschweiz. Das ETS wird durch den aus Asien stammenden pathogenen Pilz *H. fraxineus* (Synonym: *H. pseudoalbidus*, Deutsch: Falsches Weisses Stengelbecherchen) verursacht. Diese nun in Europa grossflächig verbreitete invasive Pilzart befällt die Esche vor allem im Sommer, allerdings sind nicht nur die Blätter vom Pilz befallen. Der Pilz kann Ende Sommer in die Triebe wachsen und diese anschliessend so abtöten. Zudem erhöht sich das Risiko von Sekundärinfektionen durch andere Pathogene (wie zum Beispiel den Hallimasch). Es wird angenommen, dass ca. 1 bis 5% der Eschen in Europa diese Pilzkrankheit überleben können. In vielen EU-Staaten werden deshalb gegenüber dem ETS tolerante Eschen gesucht. Zum Beispiel suchen Forscher in Österreich im Projekt «Esche in Not» geeignete Eschengenotypen, welche sie später in Baumschulen züchten können (<http://www.esche-in-not.at>). Deutschland lancierte das Projekt FraxForFuture, welches das Problem von allen möglichen Richtungen angeht (<https://www.fraxforfuture.de>). In Frankreich wurden im Projekt ChalFrax die Diagnose, Konsequenzen und Management des ETS angegangen (<https://chalfrax.cnpf.fr>).

Leider ist das ETS nicht die einzige Gefahr für die Esche in Europa. Es zeichnet sich eine weitere Bedrohung im Osten Europas ab. Der aus Ostasien im Raum Moskau 2003 eingeschleppte *A. planipennis* breitet sich immer weiter nach Westen aus. Er hat bereits die Grenzen der Ukraine und Weissrussland überschritten. Spezialisten schätzen, dass der EPK bereits in 10 bis 20 Jahren Mitteleuropa erreichen könnte. Wenn er mit Hilfe von Waren entlang der Transportwege verschleppt wird, könnte es auch deutlich schneller gehen. Der Larvenfrass des EPK unter der Rinde von grossen Ästen und am Stamm durchtrennt die Wasserversorgung der Esche, was zu ihrem raschen Absterben führt. In Nordamerika, wo der EPK 2002 ebenfalls eingeschleppt wurde, sind mittlerweile weit über 50 Millionen Eschen (v.a. die Rot-Esche, *Fraxinus pennsylvanica*) dem Käfer zum Opfer gefallen. Bisherige Labortests und erste Beobachtungen aus Russland haben gezeigt, dass auch die Europäische Gemeine Esche (*F. excelsior*) grundsätzlich sehr anfällig gegenüber dem EPK ist.

Die Teams Waldschutz Schweiz und Waldentomologie der WSL haben bereits Tests zur Resistenz von Eschen gegenüber dem Eschentriebsterben und dem Eschenprachtkäfer durchgeführt (SURVIVASH 1, DEFENDASH, RESISTASH). Im Jahr 2023 hat das Team Waldentomologie beispielsweise entdeckt, dass es einen Kreuzresistenz-Effekt zwischen der Resistenz gegen das ETS und der Resistenz gegen die Larven des EPK gibt. Das Projekt SURVIVASH 2.0 soll sicherstellen, dass eine Gruppe von Eschen, die als resistent gelten und in einem oder mehreren der oben genannten Projekte verwendet werden, unter Laborbedingungen tatsächlich sowohl gegen ETS als auch gegen EPK resistent sind. Es wurden Triebe von 15 als resistent geltenden Mutterbäumen und 2 als anfällig geltenden Mutterbäumen im Wald gesammelt. Pro Genotyp wurden 50 Pfröplinge produziert, wobei jeder Mutterbaum einen Genotyp repräsentierte. Der Test auf Resistenz gegen den Eschentriebsterben bestand aus einer Inokulation des Stammes mit einem mit *H. fraxineus* infizierten Holzstück, das unter einen dünnen Rindenriss gelegt wurde, und der anschliessenden Messung der Länge der Nekrosen nach einer Inkubationszeit. Der EPK-Resistenztest wurde durchgeführt, indem die Pfröplinge mit Larven des EPKs aus einer kanadischen Zucht beimpft wurden und die Fitness der Larven nach einem Monat Entwicklung gemessen wurde. Aufgrund des schwachen Wachstums der Pfröplinge im Frühjahr 2024 musste der Test zur Resistenz gegen EPK auf den Sommer 2025 verschoben werden.

Die Resistenztests haben gezeigt, dass sich die Genotypen auf einem Resistenzgradienten verteilen und dass selbst als resistent geltende Genotypen Schäden durch ETS, EPK oder beide aufweisen können. Glücklicherweise haben jedoch fünf als resistent geltende Genotypen tatsächlich gute Resultate gegenüber beiden Schädlingen gezeigt.

2.2 Français :

En raison du dépérissement des pousses du frêne (DPF, *Hymenoscyphus fraxineus*) et de l'agrile du frêne (ADF, *Agrilus planipennis*), qui s'est propagé depuis Moscou vers l'ouest, le frêne (*Fraxinus excelsior*) est une espèce d'arbre fortement menacée en Europe. En Suisse, le frêne était (jusqu'à l'Inventaire forestier national 3) la deuxième essence feuillue la plus importante en termes de nombre de tiges, après le hêtre. En quelques années seulement, le DPF l'a relégué à la troisième place, derrière l'érable sycomore.

Une perte du frêne dans les forêts suisses ne réduirait pas uniquement la diversité des arbres, mais elle menacerait aussi la biodiversité de manière générale. En effet, de nombreuses espèces d'insectes, d'animaux et de champignons sont spécialisées sur le frêne ou les associations végétales dans lesquelles il est dominant. Les premiers symptômes du dépérissement des pousses du frêne ont été observés dans le nord-ouest de la Suisse en 2008. Le champignon s'est ensuite propagé rapidement et a atteint le sud de la Suisse dès 2015. Le DPF est causé par le champignon pathogène *H. fraxineus* (synonyme : *H. pseudoalbidus*). Cette espèce fongique envahissante originaire d'Asie, désormais largement répandue en Europe, attaque principalement le frêne en été et les feuilles ne sont pas les seules à être touchées par le champignon. A la fin de l'été, celui-ci peut se développer dans les pousses et les tuer. De plus, le risque d'infections secondaires par d'autres agents pathogènes (tels que l'armillaire) augmente. On estime qu'environ 1 à 5 % des frênes en Europe peuvent survivre à cette maladie fongique. C'est pourquoi de nombreux États membres de l'UE recherchent des frênes tolérants face au DPF. En Autriche, par exemple, des chercheurs travaillent dans le cadre du projet « Esche in Not » (Frêne en détresse) à la recherche de génotypes de frênes adaptés, qu'ils pourront ensuite cultiver dans des pépinières (<http://www.esche-in-not.at>). L'Allemagne a lancé le projet FraxForFuture, qui aborde le problème sous tous les angles possibles (<https://www.fraxforfuture.de>). En France, le projet ChalFrax s'est penché sur le diagnostic, les conséquences et la gestion du DPF (<https://chalfrax.cnpf.fr>).

Malheureusement, le DPF n'est pas la seule menace qui pèse sur le frêne en Europe. Une autre menace se profile à l'est de l'Europe. Introduit en 2003 dans la région de Moscou en provenance d'Asie orientale, l'agrile du frêne, ADF continue de se propager vers l'ouest. Il a déjà franchi les frontières de l'Ukraine et de la Biélorussie. Les spécialistes estiment que l'ADF pourrait atteindre l'Europe centrale d'ici 10 à 20 ans. S'il est transporté à l'aide de marchandises le long des voies de transport, cela pourrait même aller beaucoup plus vite. Les larves de l'ADF se nourrissent sous l'écorce des grosses branches et sur le tronc, coupant ainsi l'approvisionnement en eau du frêne, ce qui entraîne sa mort rapide. En Amérique du Nord, où l'ADF a également été introduit en 2002, plus de 50 millions de frênes (principalement le frêne rouge, *Fraxinus pennsylvanica*) ont été victimes du coléoptère. Les tests en laboratoire et les premières observations en Russie ont montré que le frêne commun (*F. excelsior*) est également très sensible à l'agrile du frêne.

Les équipes Protection de la forêt suisse et Entomologie forestière du WSL ont déjà mené des tests de résistance des frênes face au DPF et à l'ADF (SURVIVASH 1, DEFENDASH, RESISTASH). En 2023, l'équipe entomologie de forêt a par exemple découvert qu'il existe un effet de résistance croisée entre la résistance contre le DPF et celle contre les larves d'ADF. Le projet SURVIVASH 2.0 vise à s'assurer qu'un ensemble de frênes considérés comme résistants et utilisés dans l'un ou plusieurs des projets susmentionnés le soit effectivement tant face au DPF qu'à l'ADF dans des conditions de laboratoire. Des pousses ont été récoltées sur 15 frênes-mère considérés comme résistants et 2 frênes susceptibles sélectionnés en forêt. 50 greffons ont été produits par génotype, chaque frêne-mère représentant un génotype. Le test de résistance face au DPF consistait à inoculer dans la tige une piécette de bois infectée par *H. fraxineus* et placée sous une fine coupure de l'écorce, puis à mesurer la longueur des nécroses après une période d'incubation. Le test de résistance à l'ADF a été mené en infestant les greffons de larves d'agrile provenant d'un élevage au Canada et en mesurant le taux de survie et la croissance des larves après un mois de développement. À cause d'une faible pousse des greffons au cours du printemps 2024, seul le test de résistance face au DPF a pu être mené cette année-là et celui face à l'ADF fut repoussé à l'été 2025.

Les tests de résistance ont révélé que les génotypes se répartissent sur un gradient de résistance et que même des génotypes considérés comme résistants peuvent présenter des dégâts importants provoqués par le DPF, l'ADF ou les deux. Heureusement toutefois, 5 génotypes considérés comme résistants ont effectivement montré de bons résultats face aux deux organismes pathogènes.

3 AUSGANGSLAGE

3.1 Einleitung

Im Anthropozän werden zahlreiche Lebewesen durch den Menschen und seine Aktivitäten – bewusst oder unbewusst – rasch aus ihren natürlichen Lebensräumen in neue Ökosysteme verlagert, in denen diese Arten als gebietsfremd gelten. Wenn sie dort günstige Umweltbedingungen vorfinden, können einige dieser gebietsfremden Arten in Ökosystemen, die sich über Jahrtausende ohne sie entwickelt und ein Gleichgewicht gefunden haben, zu invasiven oder pathogenen Arten werden. Dies führt zu einer Destabilisierung der betroffenen Ökosysteme, was einen erheblichen und irreparablen Verlust der lokalen Biodiversität sowie bestimmter Ökosystemfunktionen zur Folge haben kann (Mack et al., 2000; Richardson et al., 2000).

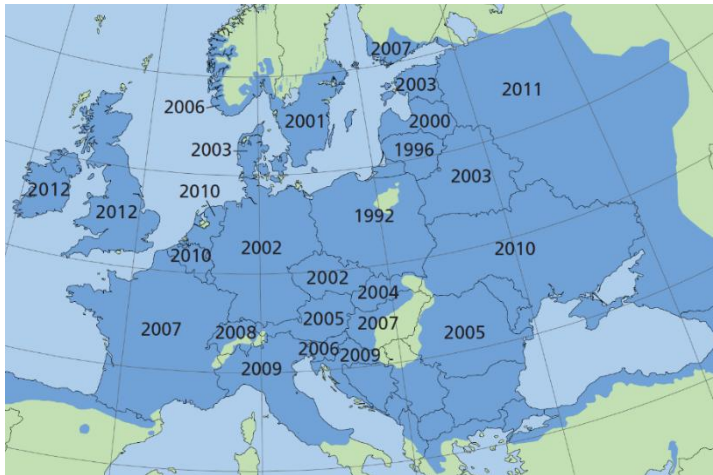


Abbildung 1: Karte, die das Ausmaß der ETS-Ausbreitung zeigt und angibt, in welchem Jahr die Krankheit in den einzelnen Ländern festgestellt wurde. Quelle: WSS

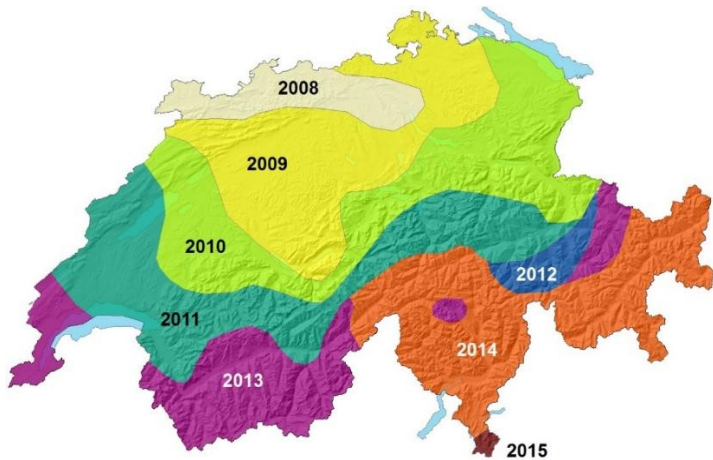


Abbildung 2 : Karte, die die Ausbreitung des ETS in der Schweiz zwischen 2008 (erstmalige Feststellung) und 2015 zeigt, dem Jahr, in dem die Krankheit das gesamte Landesgebiet erfasst hatte. Quelle: WSS

Eschen, mit denen er sich nicht gemeinsam entwickelt hat. *H. fraxineus* verhält sich in gesunden Eschenblättern nicht harmlos, sondern erweist sich als weitaus aggressiver und verursacht nekrotische Läsionen an den befallenen Blättern, bis diese vollständig absterben. Er kann sich dann vom Blatt auf den Zweig ausbreiten und so das Absterben der Triebe verursachen. Es wurde auch beobachtet, dass *H. fraxineus* Nekrosen, die manchmal tödlich verlaufen, verursachen kann, indem er die Eschen direkt am Stammansatz befällt. Selbst wenn die Esche die Infektion überlebt, dienen die durch *H. fraxineus* verursachten Läsionen und nekrotischen Gewebe anschließend als Eintrittsstelle für Sekundärpathogene wie *Armillaria* sp., eine Gattung einheimischer saprotropher Pilze, die sich opportunistisch pathogen verhalten können (Spiegel et al., 2025).

Neben der Bedrohung, die das ETS für das Überleben der Europäischen Esche darstellt, ist der Eschenbohrkäfer (EPK, *Agrilus planipennis*), ein ebenfalls aus Ostasien stammender Käfer, eine weitere Gefahr für *F. excelsior* in Europa (Orlova-Bienkowskaja et al., 2020).

Symptome des Triebsterbens wurden bereits 1992 an der Europäischen Esche (*Fraxinus excelsior*) in polnischen Wäldern beobachtet (Abb. 1). Die Krankheit, die diese Symptome verursacht, hat sich seitdem rasch auf den Rest des europäischen Kontinents ausgebreitet, und zwar über das gesamte Verbreitungsgebiet von *F. excelsior*. In der Schweiz wurde das Eschentriebsterben erstmals 2008 im Nordosten des Landes, in der Region Basel, beobachtet. Es dauerte nur sieben Jahre, bis sich die Krankheit über das gesamte Staatsgebiet ausgebreitet hatte (Abb. 2).

Der Erreger der Eschentriebsterben (ETS) wurde als *Hymenoscyphus fraxineus* (Kowalski, 2006; Queloz et al., 2011; Baral et al., 2014) identifiziert, ein saprotropher Ascomycet aus Ostasien. In seiner natürlichen Umgebung befällt er die Blätter der Mandshurischen Esche (*Fraxinus mandshurica*) zunächst asymptomatisch, bevor er die Blätter besiedelt und sich aktiv von ihnen ernährt, sobald diese altern. In Europa spielt eine Schwesterart dieselbe ökologische Rolle: *Hymenoscyphus albidus* (Kowalski et al., 2015; Gross und Sieber, 2016). Obwohl beide Pilze ähnliche ökologische Funktionen haben, zeigte *H. fraxineus* jedoch ein opportunistisches pathogenes Verhalten gegenüber europäischen

3.2 Stand der Forschung

3.2.1 Resistenzsuche gegen Eschentriebsterben

Anhand diverser Beobachtungen und Studien wird der Anteil der gegenüber dem ETS toleranten Eschen auf 1-5 % in Europäischen Wäldern geschätzt (McKinney et al., 2014). Diese relativ geringe Dichte an toleranten Eschen kann mit der Zeit dazu führen, dass Eschenindividuen zu weit voneinander entfernt sind, um sich gegenseitig zu befruchten. Gleichzeitig sterben anfällige, erwachsene Eschen innerhalb mehrerer Jahre langsam ab, was ihnen noch genug Zeit gibt, um weiterhin Pollen und Samen zu produzieren. Daher ist die natürliche Selektion der Eschenbäume eher langsam.

Da die Umweltbedingungen einen grossen Einfluss bei der Entwicklung dieser Krankheit spielen, sind nicht alle «scheinbar gesunden» Eschen im Wald auch wirklich tolerant gegenüber dem ETS. Manche Eschen entgehen aufgrund ungünstiger Wachstumsbedingungen für das ETS einfach einer Pilzinfektion. Ausserdem ist die Toleranz gegenüber dem ETS abhängig von einer Vielzahl verschiedener Gene und ihres Zusammenspiels, was eine einfache Testung der Eschen auf ihre Toleranz deutlich erschwert (McKinney et al., 2014; Stocks et al., 2019).

3.1.2 Resistenzsuche gegen Eschenprachtkäfer

In Nordamerika wurde der EPK erstmals ab 2002 in Michigan und Ontario beobachtet (Haack et al., 2002; McCullough und Katovich, 2004), wobei es Hinweise darauf gibt, dass sich dieser Käfer bereits seit Mitte der 1990er Jahre dort etabliert hat (Siegert et al., 2007). Seitdem war der EPK für das Absterben von Millionen einheimischer amerikanischer Eschen (*Fraxinus pennsylvanica*) verantwortlich (Poland und McCullough, 2006). In Europa wurde *A. planipennis* bereits 2003 in der Region Moskau beobachtet und hat sich seitdem nach Westen bis in die Region Kiew ausgebreitet (Baranchikov et al. 2008; Haack et al. 2015; Selikhovkin et al., 2017). Es wird vermutet, dass dieser Käfer im Laufe seines Erwachsenenlebens von sich aus nur wenige Kilometer zurücklegt, doch sein Hauptverbreitungsweg – menschliche Aktivitäten – kann dazu führen, dass er innerhalb weniger Jahre erhebliche Entfernungen zurücklegt (Orlova-Bienkowskaja und Bieńkowski, 2018). Es wird erwartet, dass sich der EPK in den nächsten Jahren in Richtung Westeuropa ausbreiten wird (Orlova-Bienkowskaja et al., 2020).

An der WSL laufen seit 2020 erste Versuche mit dem EPK, um auch hier bereits EPK-tolerante Eschen zu finden und diese zu fördern (Projekten DEFENDASH, SURVIVASH 1.0, MoniFrax). Eine dieser Studien, die von der Gruppe Waldentomologie durchgeführt wurde, ergab, dass die Larven des Eschenprachtkäfers in Eschen, die für den ETS anfällig sind, eine höhere Fitness aufweisen als in Eschen, die dagegen resistent sind. Darüber hinaus korrelieren die Leistungsunterschiede der EPK-Larven mit Unterschieden im chemischen Profil des Phloems zwischen resistenten und anfälligen Eschen (Gossner et al., 2023).

4 PROJEKTZIELE UND FORSCHUNGSFRAGEN

Die Erhaltung der Esche in der Schweiz erfordert erstens die Lokalisierung von Eschen, die in der Umwelt als gesund beobachtet wurden, und zweitens die Überprüfung ihrer Resistenz gegenüber ETS und EPK im Labor. Das Projekt SURVIVASH zielt darauf ab, gegen ETS und EPK 15 Genotypen zu testen, die bei Feldbeobachtungen als resistent eingestuft wurden.

5 METHODEN

5.1 Auswahl der Genotypen und Pfropfen

Im Januar 2023 wurden 17 Eschen-Mutterbäume (die fortan als „Genotypen“ bezeichnet werden) ausgewählt und vor Ort markiert. Sie stammen aus der Liste der im Projekt RESISTASH (2020–2021) verwendeten Genotypen (13 Genotypen), aus Beobachtungsfläche des Instituts für Angewandte Pflanzenbiologie (IAP, 3 Genotypen) oder aus persönlichen Beobachtungen von Mitarbeitern des WSS-Teams (1 Genotyp, Tabelle 1). 15 Genotypen, die als resistent (res) gelten, sind die Hauptobjekte der Resistenztests für SURVIVASH 2.0. Die 2 als anfällig (anf) geltenden Genotypen dienen als Vergleich. Die Genotypen stammen hauptsächlich aus dem Mittelland (12) und dem Jura (4). Ein Genotyp stammt aus den Alpentälern (Illanz/Glion, Graubünden). Das Gärtnerenteam der WSL war im Februar vor Ort und entnahm Material für mindestens 50 Pfropfreiser für jeden der ausgewählten Genotypen. Das Pfropfen fand zwischen dem 13. und 17. März 2023 mit Unterstützung des selbstständigen Pfropfexperten Oliver Sheridan statt. Es wurden Wurzelstöcke (Herkunft Tägerwil TG) verwendet, die in ihrer Dicke den Pfröpfungen entsprachen und aus der Baumschule Kressibucher im Thurgau stammten. Die Pfröpfungen wurden anschliessend bis zum Projektende im Dezember 2025 geschützt in Folientunneln gelagert. Ihre Fitness wurde am 23.05.2023, am 02.09.2023 und erneut am 15.10.2024 überprüft.

Organisation	Originalbeobachtung	Kanton	Ort	Gesundheitsstatus	Fläche#	Baum#	X-koordinaten (LV04)	Y-koordinaten (LV04)
WSL	RESISTASH	TG	Aadorf	RES	1060g_2	3	710250	258855
WSL	RESISTASH	ZH	Bäretswil	RES	1086_3	15	710314	243916
WSL	RESISTASH	JU	Bourrignon	RES	1105_5	0	586762	247743
WSL	RESISTASH	FR	Châbles	RES	1049a_5	18	552212	186735
WSL	RESISTASH	BE	Dürrenroth	RES	1104_2	13	626072	212522
WSL	RESISTASH	TG	Eschlikon	ANF	1060c_1	17	715330	257448
WSL	RESISTASH	TG	Eschlikon	RES	1060c_1	0	715323	257426
IAP	Beobachtungsfläche	AG	Gipf-Oberfrick	RES	15 Gipf-Oberfrick	8	643400	260400
WSL	RESISTASH	GR	Illanz/Glion	RES	1029_13	2	736288	179561
IAP	Beobachtungsfläche	AG	Möhlín	RES	16 Möhlín	4	629952	265148
WSL	RESISTASH	SG	Quarten	RES	1055d_1	0	735434	219331
IAP	Beobachtungsfläche	BS	Riehen	RES	5 Riehen	5	618100	271625
WSL	RESISTASH	TG	Steckborn	RES	1060u_2	1	718286	280601
WSL	Personalbeobachtung	BE	Sumiswald	RES	1_Sumiswald	1	627671	211851
WSL	RESISTASH	SZ	Tuggen	ANF	1058_2	13	715610	230380
WSL	RESISTASH	SZ	Tuggen	RES	1058_2	0	715610	230380
WSL	RESISTASH	ZH	Uster	RES	1043_1	0	695117	245233

Tabelle 1 : Liste der Genotypen sowie Angaben zu ihrem Standort und dem Ort ihrer ersten Beobachtung.

5.2 Resistenztests

5.2.1 Resistenztest gegen den Eschentriebsterben

Ein Stamm von *H. fraxineus* wurde im Frühling 2023 in Boncourt im Jura gesammelt und für Inokulationen im Rahmen eines Parallelprojekts verwendet. Er wurde am 07.02.2024 erneut isoliert und bis zu den Vorbereitungen für die Inokulation der SURVIVASH 2.0-Bäume in einem Kühlschrank bei 7 °C aufbewahrt. Ursprünglich war geplant, die Resistenzversuche gegen die ETS und der EPK im selben Jahr durchzuführen. Aufgrund der insgesamt geringen Größe der Pfröpfungen wurde jedoch beschlossen, nur den Resistenzversuch gegen ETS durchzuführen und den Resistenzversuch gegen EPK auf den Sommer 2025 zu verschieben, um den verbleibenden Pfröpfungen mehr Zeit zum Wachsen zu geben. Die 8 am stärksten gewachsene Pfröpfungen jedes Genotyps wurden für den Resistenzversuch gegen ETS ausgewählt (insgesamt 136 Pfröpfungen). Sie wurden im August in ein biologisches Sicherheit Stufe 3 Gewächshaus bei einer Durchschnittstemperatur von 22 °C und einer durchschnittlichen relativen Luftfeuchtigkeit von 64 % gebracht. Im September wurde der Stamm von *H. fraxineus* in Kulturen auf Eschenagar-Agarplatten vermehrt und eine Woche lang bei Raumtemperatur stehen gelassen. In der Zwischenzeit wurden mit einem dendrochronologischen Mikrotom (Herstellung: WSL) Eschenholzstückchen mit einer durchschnittlichen Größe von 4 x 4 x 0,5 mm geschnitten und in einer 1%igen Malzlösung autoklaviert. Die Holzstückchen wurden anschliessend in die *H. fraxineus*-Kulturen sowie in Petrischalen mit sterilem Eschenagar (Negativkontrolle) gegeben und dann für eine Wachstumsperiode von etwa einem Monat bei Raumtemperatur belassen.

Die in die Kultur von *H. fraxineus* eingebrachten Holzstückchen galten als einsatzbereit, sobald der Pilz das Holz besiedelt hatte und eine schwarze Verfärbung hervorrief (Anhang, Abb. 13). Die Inokulation der Versuchspfröpfungen begann Mitte Oktober 2024. Bei Pfröpfungen, die mehr als 5 cm gewachsen waren, wurde 5 cm unterhalb der apikalen Knospe ein Schnitt in die Rinde gemacht, woraufhin ein befallenes

Holzstückchen in Kontakt mit dem Kambium unter der Rindenlasche platziert wurde (Anhang, Abb. 15). Bei den Pfröpflingen mit einem Trieb von weniger als 5 cm wurde der Einschnitt oberhalb der beiden apikalen Knospen, direkt unterhalb der Triebspitze, vorgenommen. Von den 8 Pfröpflingen pro Genotyp wurden 7 beimpft, während der 8. als Negativkontrolle diente. Auch dieser wurde eingeschnitten, und ein sauberes Holzstück aus sterilem Eschenagar-Nährmedium wurde unter den Rindenschnitt gelegt. Sobald das Stückchen an Ort und Stelle war, wurde die Inokulationsstelle mit einem Streifen Parafilm versiegelt. Die 136 Pfröpflinge blieben anschließend im Sicherheitsgewächshaus 3, bis Mitte Februar 2025 die Nekrosen gemessen wurden.

Die Nekrosen wurden an der Rindenoberfläche von der unteren Grenze der Inokulationsstelle bis zur letzten sichtbaren Verfärbung durch das ETS (dunkle, rotbraune Verfärbung, Anhang, Abb. 14) in Richtung der Stammbasis gemessen. Anschließend wurde die Rinde entfernt, um die subkortikale Nekrose (im Kambium und im Holz) zu messen. Diese zusätzliche Messung ist notwendig, da die Nekrosen unter der Rinde manchmal ausgedehnter sind, als an der Oberfläche sichtbar ist.

5.2.2 Resistenztest gegen den Eschenprachtkäfer

Im Jahr 2025 erforderte das schwache Wachstum der Pfröpflinge erneut eine Anpassung des Zeitplans und der Versuchsabläufe. Anstatt Mitte Juli fand der Resistenztest erst Anfang August statt, um den Pfröpflingen mehr Zeit für die Entwicklung zu geben.

Die Eier des EPK wurden vom Team des Great Lakes Forestry Centre in Sault Ste. Marie über das Team für Waldentomologie der WSL auf Kaffeefilterpapier bereitgestellt. Nach Erhalt wurden die Eier im Pflanzenschutzlabor Sicherheitsstufe 3 (an der WSL) bei einer Temperatur von 25 °C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 55 % gelagert. Die Eier wurden 5 Tage lang gelagert, bevor sie für den Resistenztest verwendet wurden. Das Versuchsprotokoll folgte dem von Gossner et al. (2023); die Kaffeefilter, auf denen die Eier angebracht waren, wurden so zugeschnitten, dass kleine Streifen mit jeweils 1 bis 2 Eiern entstanden. Diese Streifen wurden angefeuchtet und am Stamm des Pfröpfinges 2 cm unterhalb des Apex angebracht, so dass insgesamt 3 Eier pro Pfröpfing verwendet wurden. Die Streifen mit den Eiern wurden anschließend mit Parafilm abgedeckt, wobei darauf geachtet wurde, nicht zu fest zu drücken, um ein Zerquetschen der Eier zu vermeiden. 79 Eiern auf Kaffeefilter wurde in einer Petrischale vorbereitet, die sich wiederum in einem mit Steckschaum befeuchteten Plastikbeutel befand. Das Ganze wurde zusammen mit den befallenen Pfröpflingen in ein Sicherheitsgewächshaus Stufe 3 gebracht, und die Eier wurden seitdem täglich beobachtet, um das Datum zu bestimmen, an dem mehr als 50 % der Eier geschlüpft waren, was den Beginn des Resistenztests markierte. Das Datum wurde auf den 11. August 2025 festgelegt. Ein erster Versuch der Entnahme fand am 27. August statt, doch die einzige gefundene Larve war noch zu klein. Der Test wurde daher bis zum 10. September verlängert. Die Extraktion der Larven erfolgt zwischen dem 10. und dem 12. September. Zu Beginn der Extraktion wurde das Parafilm vorsichtig vom Stammumfang des Pfröpfinges entfernt und die Eier sorgfältig untersucht, um festzustellen, ob sie geschlüpft waren. Anschließend wurde der Pfröpfing schrittweise vom Befallsort aus entlang der von den EPK-Larven gegrabenen Gänge abgeschält, bis die Larve gefunden wurde (Anhang, Abb. 16). Nach der Extraktion wurde die Larve einzeln in ein Eppendorf gegeben und in einem Gefrierschrank (-20 °C) gelagert.

Zwei Merkmale der Larven wurden gemessen: die Breite der Kopfkapsel (zur Bestimmung des Entwicklungsstadiums) und das Trockengewicht, beide Indikatoren für die Fitness der Larve. Die Messung der Breite der Kopfkapsel erfolgte mit einem digitalen optischen Mikroskop (LEICA DVM6) und einer Software, die digitale Messungen im mikroskopischen Maßstab ermöglicht (Software LAS X Version: 3.0.14.23224, 2020 Leica Microsystem CMS GmbH). Die Messungen der Kopfkapseln wurden in eine Excel-Tabelle eingetragen und als Screenshots gespeichert (Anhang, Abb. 17).

Zur Vorbereitung der Trockengewichtsmessung wurden dünnwandige Zinntiegel mit einer Mikrowaage gewogen und in Laborgestelle gestellt. Anschließend wurden die Larven einzeln in die Tiegel gegeben und 5 Tage lang bei 70 °C getrocknet. Das Gewicht der Larve zusammen mit dem Tiegel wurde notiert, dann wurde das Gewicht des Tiegels vom Gesamtgewicht abgezogen, um das Gewicht der Larve zu erhalten.

6 ERGEBNISSE

6.1 Erfolgreiche Pfropfung 2023 und Wachstum der Pfröpflinge

Der Erfolg der Pfropfung wurde 2023 und 2024 festgestellt und durch Zählen der nicht ausgetriebenen Pfröpflinge geschätzt. Da der Gesundheitszustand einer Reihe von Pfröpfingen im Jahr 2023 nicht sicher beurteilt werden konnte, wurden sie als lebendig betrachtet. Im Jahr 2024 wurden jedoch alle nicht austreibenden Pfröpflinge endgültig als abgestorben betrachtet. Insgesamt waren von 850 Pfröpfingen 704 im Laufe der Saison 2024 ausgetrieben, was einer Überlebensrate der Pfröpflinge von 83 % entspricht. Der Genotyp mit den meisten Verlusten war Tuggen_res mit 31 überlebenden Pfröpfingen von anfänglich 50, während Châbles_res der Genotyp mit der wenigsten Mortalität war, da nur ein einziger Pfröpfling von 50 verloren ging (Abb. 3). Der mittlere Erfolg lag bei 41 überlebenden Pfröpfingen von 50.

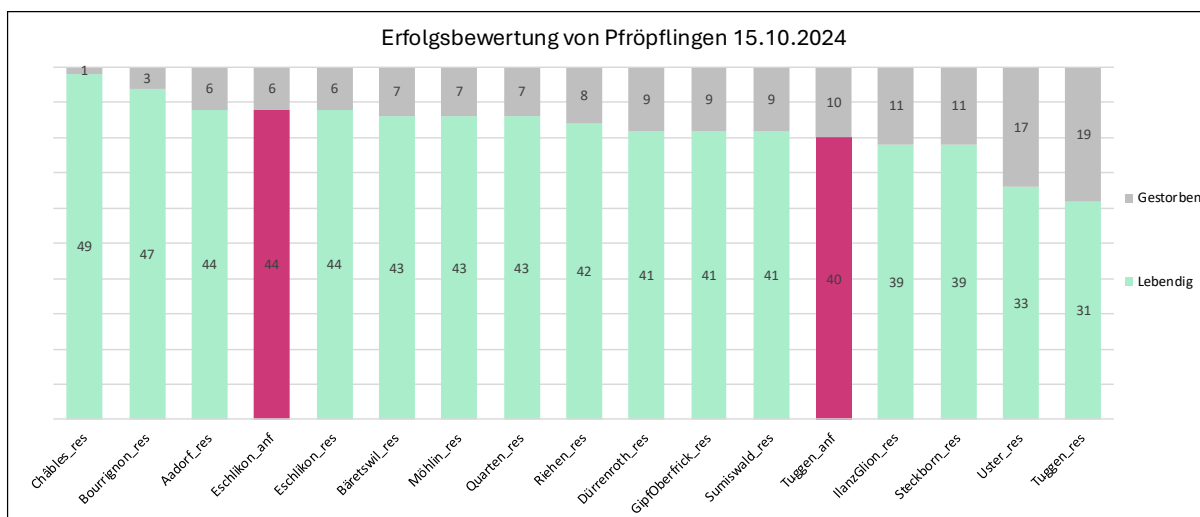


Abbildung 3: Erfolg der Pfröpflinge im Oktober 2024, geordnet nach dem Genotyp mit der geringsten Sterblichkeit (Châbles_res) bis hin zu dem mit der höchsten Sterblichkeit (Tuggen_res). Die beiden anfälligen Genotypen (anf) sind rot hervorgehoben.

Generell hatten die Pfröpflinge ein langsames Wachstum. Einige wuchsen nur wenige Millimeter pro Jahr, was die Auswahl und die Festlegung der Protokolle erschwerte. Diese Situation führte zur Entscheidung, den Test auf Resistenz gegen ETS im Jahr 2024 und den Test auf Resistenz gegen EPK-Larven im Jahr 2025 durchzuführen, da im Jahr 2024 zu wenige Pfröpflinge von ausreichender Grösse verfügbar waren. Ein weiteres Jahr zu warten, gab den verbleibenden Pfröpfingen die Chance zu wachsen, in der Hoffnung, dass genügend von ihnen eine ausreichende Grösse erreichen würden. Im Jahr 2024 waren die für den Resistenztest gegen die ETS gemessenen Pfröpflinge die grössten ihrer jeweiligen Genotypen. Sie hatten eine mittlere Grösse von 42 cm, wobei die beiden Extreme durch die Pfröpflinge aus Tuggen_res mit einer mittleren Grösse von 53 cm und diejenigen aus Bourrignon_res mit 33 cm repräsentiert wurden (Anhang, Abb. 18). Das mittlere Wachstum der ausgewählten Eschen betrug 2024 7 cm, aber der Unterschied zwischen dem stärksten Wachstum (Tuggen_res, >20 cm) und dem schwächsten Wachstum (Bourrignon_res, 1,4 cm) war beträchtlich (Anhang, Abb. 19). Das mediane Wachstum lag 2024 bei 6 cm. Im Jahr 2025 betrug die mittlere Grösse der ausgewählten Pfröpflinge 45 cm, während das mittlere Wachstum 2,8 cm betrug, aber auch in diesem Jahr war die Diskrepanz zwischen dem stärksten Wachstum (Tuggen_res, 10 cm) und dem schwächsten (Riehen_res, 5 mm) sehr gross. Das mittlere Wachstum im Jahr 2025 beträgt 1,8 cm (Anhang, Abb. 18, 19).

6.2 Resistenztests

6.2.1 Eschentriebsterben-Resistenz

Sowohl oberflächliche Nekrosen als auch subkortikale Nekrosen wurden gemessen. Da die subkortikalen Nekrosen, die sich im Kambium befanden, im Durchschnitt länger waren und positiv mit der Länge der oberflächlichen Nekrosen korrelierten (Anhang, Abb. 21), wurden für die statistischen Analysen der Resistenz nur letztere herangezogen. Wenn daher im Folgenden von „Nekrosen“ die Rede ist, ist damit automatisch die subkortikale Nekrose gemeint.

Die Resultate des Resistenztests gegen das Eschentriebsterben zeigen einen Gradienten unter den getesteten Genotypen (Abb. 4). Nicht alle als resistent geltenden Genotypen weisen systematisch eine höhere Resistenz gegen das ETS auf als die beiden als Kontrolle dienenden anfälligen Genotypen (Eschlikon_anf und Tuggen_anf). Châbles_res und Tuggen_res führen unter allen Genotypen die Rangliste der Resistenz gegen ETS an, mit den geringsten mittleren Nekrosenlängen (21,4 mm bzw. 82,1 mm). Die beiden Genotypen, die sich als am anfälligsten für ETS erwiesen haben, sind Dürrenroth_res (mittlere Nekrosenlängen 225 mm) und Eschlikon_anf (mittlere Nekrosenlängen 214 mm).

Da die Pfröpflinge insgesamt klein waren, wurde die Korrelation zwischen der Gesamthöhe der Pfröpflinge und der Nekrosenlänge geprüft. Die Resultate zeigen keine Korrelation zwischen Nekrosenlänge und der Pfröpflingshöhe, wodurch eine mögliche Verzerrung der Resultate ausgeschlossen werden kann (Abb.5).

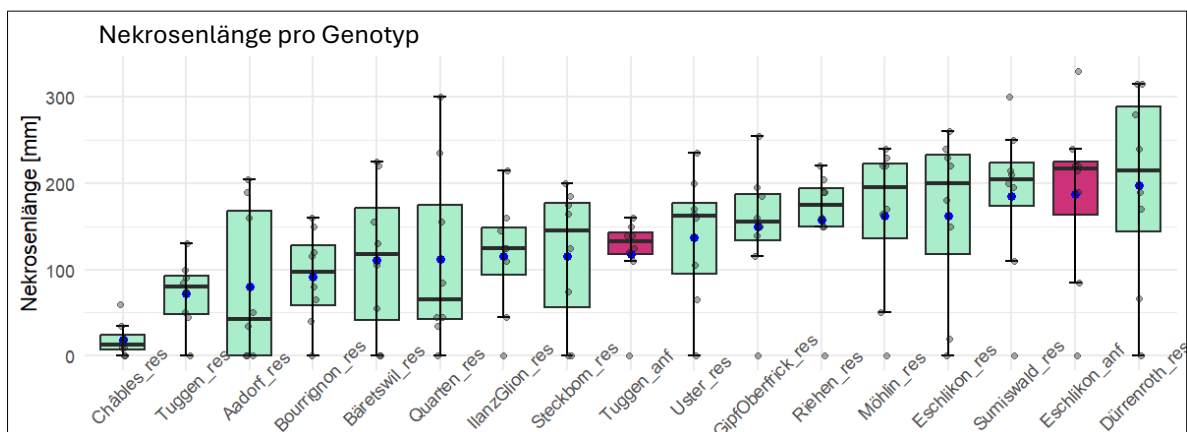


Abbildung 4: Grafik zur Darstellung der durchschnittlichen Länge der Nekrosen nach Genotyp, geordnet vom Genotyp mit den kürzesten Nekrosen (Châbles_res) bis zu dem mit den längsten Nekrosen (Dürrenroth_res). Die beiden anfälligen Genotypen (anf) sind rot hervorgehoben.

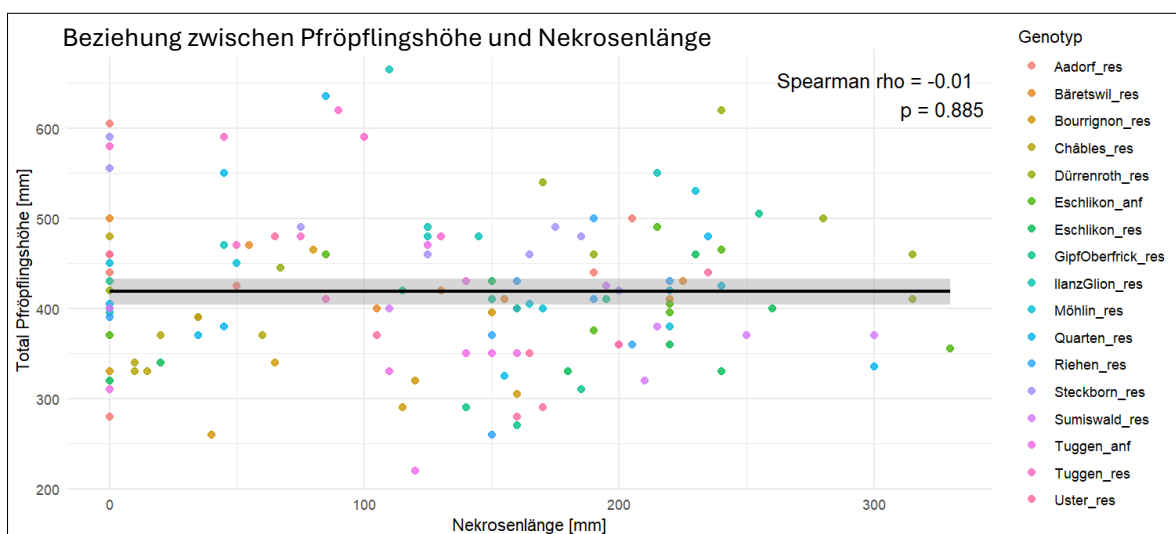


Abbildung 5: Diagramm, das die Pfröpflingshöhe mit der Länge der subkortikalen Nekrosen korreliert. Die Pfröpflingshöhe war kein entscheidender Faktor für die Intensität der ETS-Infektion (die sich in der Größe der Nekrosen manifestierte), wie der p-Value von 0,885 eindeutig zeigt.

6.2.2 Resistenz gegen EPK-Larven

Die Schlupfrate der EPK-Eier wurde bei den getesteten Pfröpflingen auf 80 % geschätzt (328 der 408 Eier, die zu dem Befall der Pfröpflinge verwendet wurden).

Die Interpretation der Resistenz der Pfröpflinge gegenüber ADF erfolgt auf der Grundlage von Indizes der Gesamtfitness der entnommenen Larven. Zwei dieser Indizes wurden gemessen: die Breite der Kopfkapseln, anhand derer sich das Entwicklungsstadium der Larven ableiten lässt, sowie das Trockengewicht. Da die Breite der Kopfkapsel mit dem Trockengewicht korreliert (Anhang, Abb.22), wurden die Ergebnisse des Resistenztests ausschliesslich unter dem Gesichtspunkt des Trockengewichts analysiert, da die Untersuchung der Kopfkapselbreite restriktiver ist (sobald diese beschädigt ist oder teilweise fehlt, kann die Breite nicht mehr bestimmt werden).

Von den 328 Larven, die die Pfröpflinge befallen hatten, wurden jedoch nur 117 (36 %) gefunden und extrahiert. Da die Wahrscheinlichkeit, dass eine Larve der Extraktion entgangen ist, sehr gering ist, gelten die übrigen 211 Larven als tot. Um zu verstehen, welche Faktoren diese Sterblichkeitsrate beeinflusst haben könnten, wurden die Beziehungen zwischen Überlebensrate und Trockengewicht der Larven (Abb. 6) sowie zwischen Überlebensrate und Durchmesser der Pfröpflinge (Abb. 7) untersucht. Die Ergebnisse deuten auf einen leichten Bezug zwischen Überlebensrate und durchschnittlichem Larvengewicht pro Genotyp hin, auch wenn dieser nicht signifikant ist (p -Value = 0,053). Es ist jedoch denkbar, dass die Larven der Genotypen, bei denen sie kleiner sind, tendenziell geringere Überlebenschancen haben. Umgekehrt sind die Genotypen, bei denen die Larven ein höheres Gewicht erreichten, auch diejenigen, bei denen die Larven weniger leicht sterben. Die Daten zeigen keine Korrelation zwischen dem Durchmesser der Pfröpflinge und der Überlebensrate der Larven (p -Value = 0,55, Abb. 7). Dieses Ergebnis legt nahe, dass die kleinen Durchmesser kein wesentliches Hindernis für die Entwicklung der Larven darstellten und dass dieser beengte Raum keine ungewöhnliche Kannibalismus-Strategie ausgelöst hat. Der Durchmesser der Pfröpflinge hatte auch keinen Einfluss auf das Larvengewicht (Abb. 8).

Der Genotyp mit der höchsten Mortalität der Larven war Sumiswald_res mit einer Überlebensrate der geschlüpften Larven von 35 % (6 von 17 Larven, Abb. 9), wobei diese Larven im Durchschnitt ein relativ geringes Gewicht aufwiesen und auch die Extremwerte niedrig waren (Abb. 10). Obwohl Möhlin die meisten überlebenden Larven aufwies (64,3 %, 9 von 14 Larven), gehören diese nicht zu den Schwergewichten. Der Genotyp mit dem höchsten Durchschnittsgewicht war Tuggen_anf (50 % Überlebensrate bei 12 Larven), gefolgt von Eschlikon_res (44 % Überlebensrate, 7 von 16 Larven). Diese Durchschnittswerte wurden stark durch das Gewicht einiger aussergewöhnlich schwerer Larven beeinflusst: Eine davon, die in einem Pfröpfung von Tuggen_anf gefunden wurde, wog mehr als 3,5 mg.

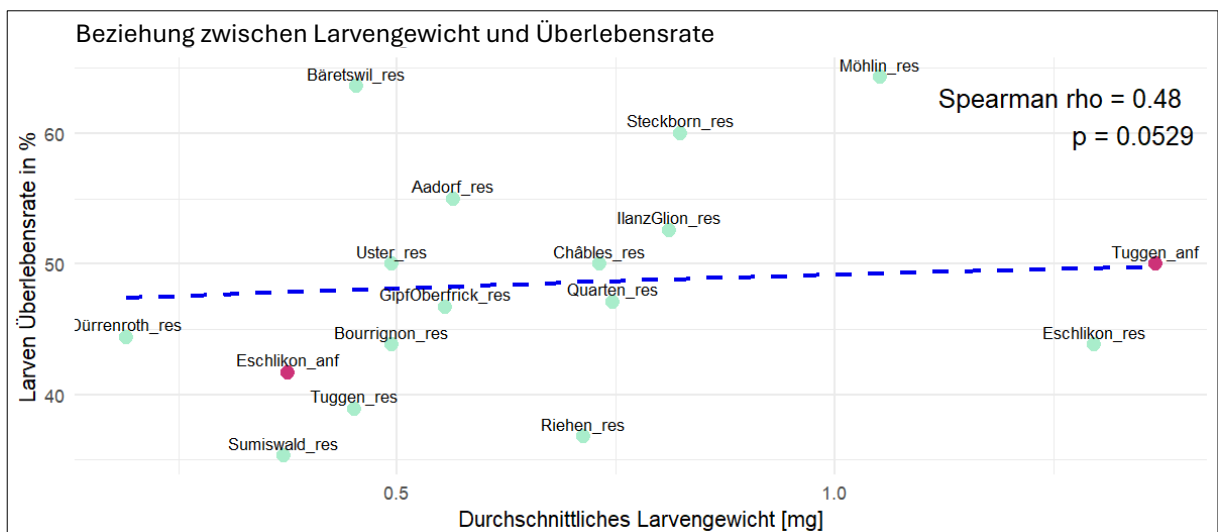


Abbildung 6: Beziehung zwischen Überlebensrate und durchschnittlicher Larvengewicht nach Genotyp. Der p -Value (0,053) deutet auf einen leichten, wenn auch nicht signifikanten Trend hin.

Die Gerade basiert auf der „gam“-Methode (General Additive Model), da die Variablen keinen linearen Zusammenhang aufweisen. Die beiden anfälligen Genotypen (anf) sind rot hervorgehoben.

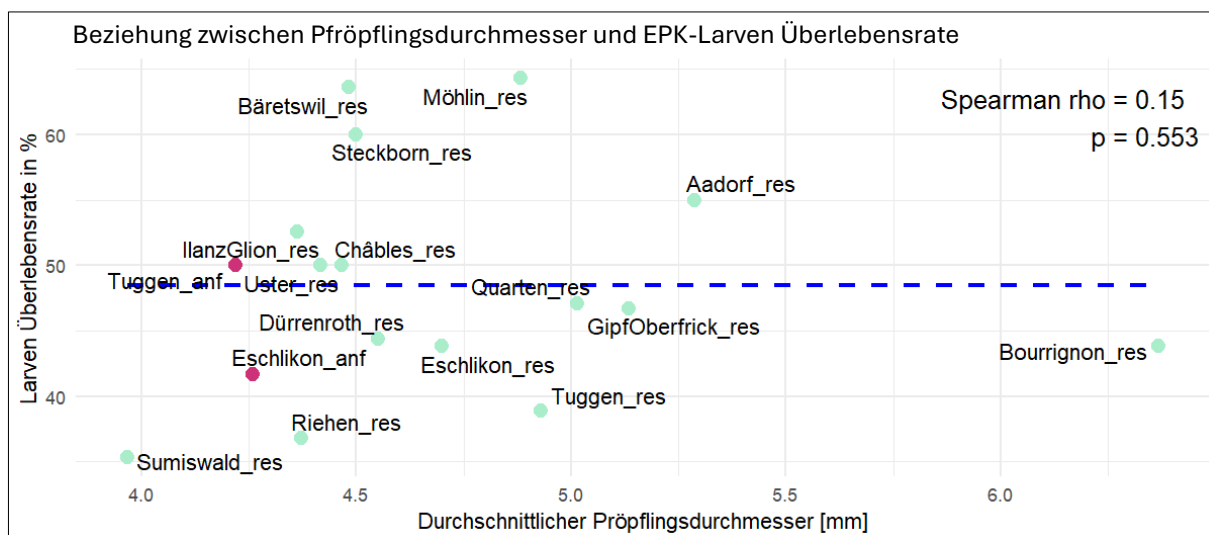


Abbildung 7: Beziehung zwischen Überlebensrate der Larven und Durchmesser der Pfröpfe. Das Ergebnis des Spearman-Tests deutet darauf hin, dass die beiden Faktoren nicht miteinander zusammenhängen. Die Gerade basiert auf der „gam“-Methode (General Additive Model), da die Variablen keine lineare Beziehung aufweisen. Die beiden anfälligen Genotypen (anf) sind rot hervorgehoben.

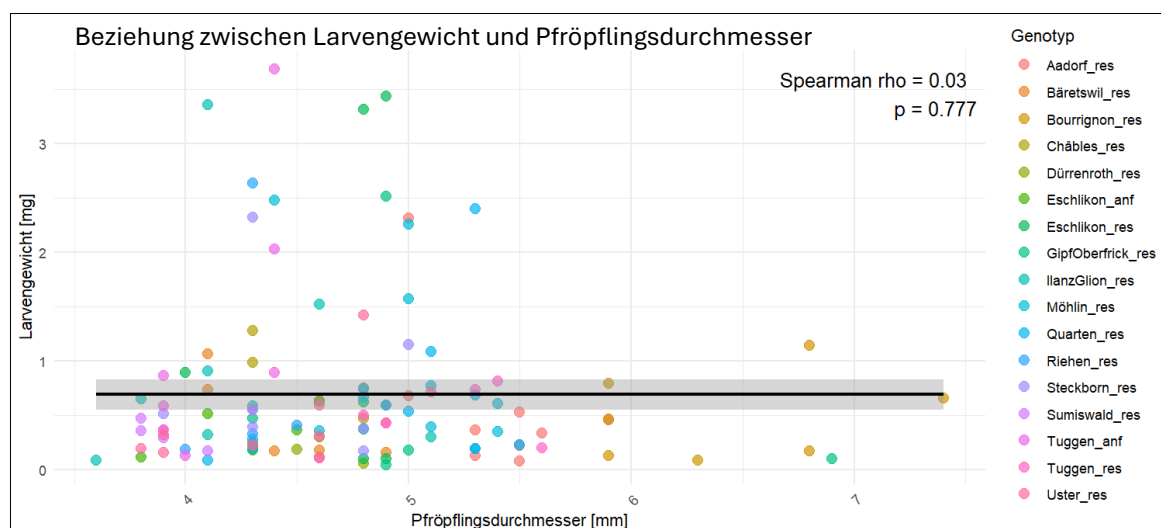


Abbildung 8: Beziehung zwischen dem Larvengewicht und dem Durchmesser der Pfröpfe. Die Entwicklung der Larven wurde durch die geringen Durchmesser der für das Experiment verwendeten Pfröpfe nicht beeinträchtigt.

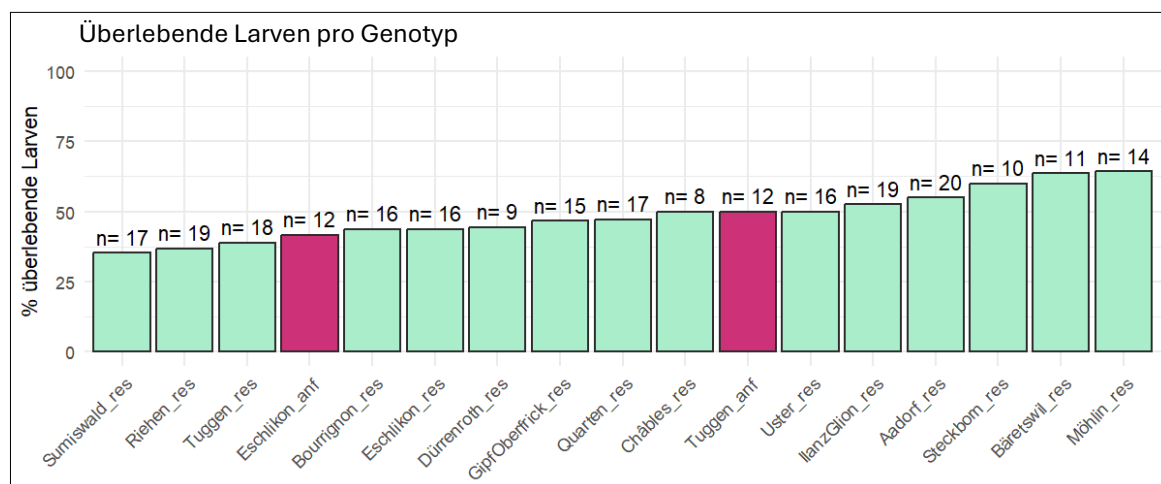


Abbildung 9: Überlebensrate der Larven nach Genotyp, geordnet von der niedrigsten Rate (Sumiswald, 35 %) bis zur höchsten (Möhlins, 64 %). Die beiden anfälligen Genotypen (anf) sind rot hervorgehoben.

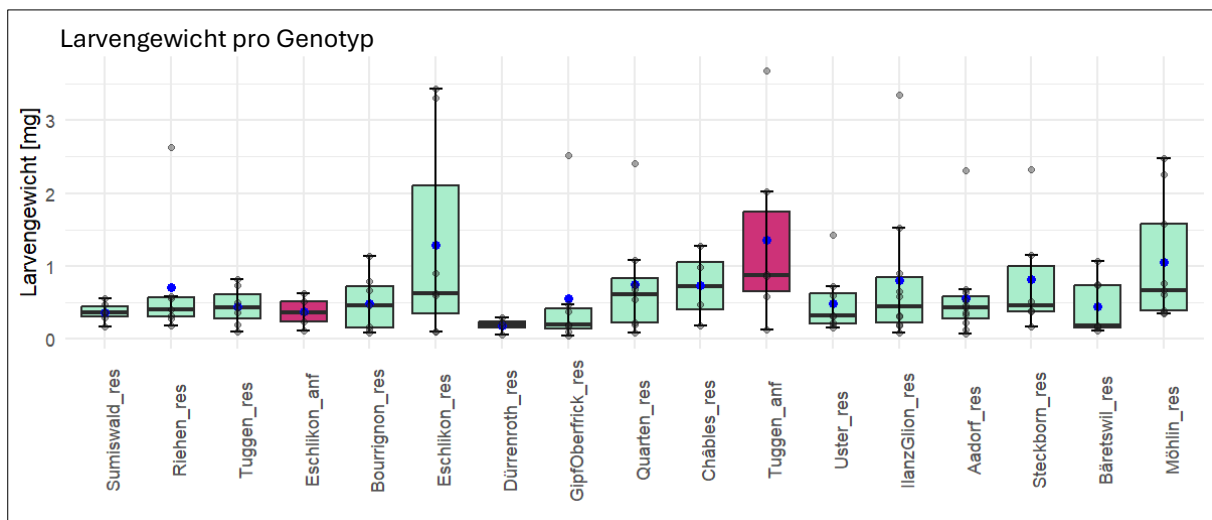


Abbildung 10: Larvengewicht nach Genotyp, sortiert nach der Überlebensrate (von der niedrigsten zur höchsten). Die beiden anfälligen Genotypen (anf) sind rot hervorgehoben.

6.2.3 Kreuzresistenz:

Die Beziehung zwischen dem durchschnittlichen Larvengewicht und dem durchschnittlichen Nekrosenlänge wurde für jeden Genotyp untersucht. Das Analyseergebnis zeigt, dass keine Beziehung zwischen diesen zwei Variablen besteht (p-Value = 0,5, Abb. 11).

Ein Vergleich der Resistenzleistung der Genotypen ergibt, dass 5 von 15 Genotypen sowohl gegenüber das ETS als auch gegenüber den EPK-Larven gute Resistenzergebnisse aufweisen (Abb.12). Diese Genotypen sind Aadorf_res (TG), Bärenswil_res (ZH), Bourrignon_res (JU), IllanzGlion_res (GR) und Tuggen_res (SZ). Der Fall Châbles_res (FR) ist differenzierter: Obwohl dieser Genotyp die geringsten Nekrosen aufweist und damit wahrscheinlich der resistenteste Genotyp gegen ETS ist, gehören die aus den Eschen dieses Genotyps entnommenen Larven eher zu den schwersten Larven und liegen in der Nähe der 3. Quartil (Q3 = 0,785 mg).

Insgesamt deuten die Resultate darauf hin, dass einige der vermutlich resistenten Genotypen unter Laborbedingungen nicht vollständig resistent waren. Allerdings erbrachten ein Drittel der als resistent eingestuften Genotypen gegenüber den beiden exotischen Organismen gute Leistungen und beweisen damit, dass es in den Schweizer Wäldern vielversprechende Genotypen gibt, die für die Zukunft wertvoll sind.

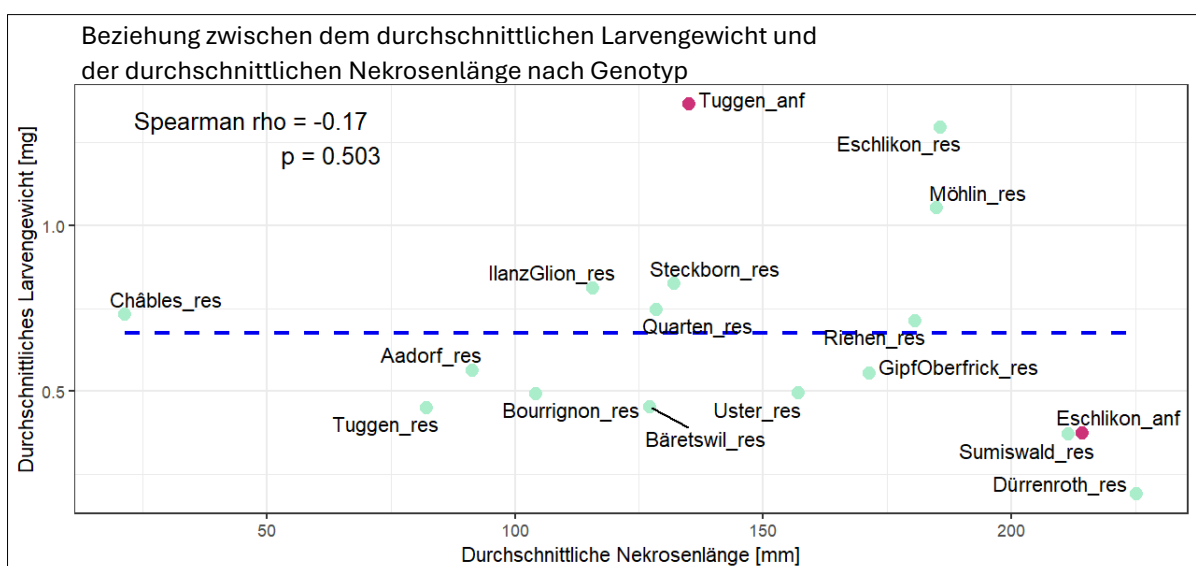


Abbildung 11: Beziehung zwischen dem durchschnittlichen Larvengewicht und der durchschnittlichen Nekrosenlänge, nach Genotyp.

Die Gerade verwendet die „GAM“-Methode (General Additive Model), da die Variablen keine lineare Beziehung aufweisen. Die beiden anfälligen Genotypen (anf) sind rot hervorgehoben.

	Durchschnittliche Nekrosenlänge [mm]	Durchschnittliches Larvengewicht [mg]
Châbles_res	21.4	0.731
Tuggen_res	82.1	0.451
Aadorf_res	91.4	0.564
Bourrignon_res	104.3	0.493
IlanzGlion_res	115.6	0.476
Bäretswil_res	127.1	0.454
Quarten_res	128.6	0.746
Steckborn_res	132.1	0.824
Tuggen_anf	135.0	1.366
Uster_res	157.1	0.474
GipfOberfrick_res	171.4	0.527
Riehen_res	180.7	0.712
Möhlin_res	185.0	1.052
Eschlikon_res	185.7	1.296
Sumiswald_res	211.4	0.371
Eschlikon_anf	214.3	0.375
Dürrenroth_res	225.3	0.190

Abbildung 12: «Heatmap» mit der durchschnittlichen Nekrosenlänge [mm] und dem durchschnittlichen Larvengewicht [mg] für jeden Genotyp. Die Farbe Weiß entspricht dem 50. Perzentil, während die dunkelsten Grün- und Rottöne den kleinsten bzw. größten Wert des Datensatzes darstellen.

7 NUTZEN FÜR DIE PRAXIS

Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass es zwar nur selten, aber doch Eschen gibt, die Anzeichen einer Kreuzresistenz gegenüber ETS und EPK aufweisen. Diese Eschen stehen möglicherweise zu weit voneinander entfernt, um sich fortpflanzen zu können. Es ist daher von entscheidender Bedeutung, die als resistent identifizierten Eschen zu erhalten und weiterhin nach neuen Exemplaren zu suchen.

8 SCHLUSSFOLGERUNGEN

Insgesamt haben die Ergebnisse von SURVIVASH 2.0 gezeigt, dass sich die getesteten und als resistent eingestuft Genotypen gegenüber dem ETS oder EPK nicht alle als widerstandsfähiger erwiesen haben. Was die Resistenz gegen den ETS

betrifft, könnten die Ergebnisse dadurch erklärt werden, dass die erste Verteidigungslinie der Bäume im Wald in ihren Blättern liegt, über die der ETS auf natürliche Weise eindringt. Ohne diese Barriere ist die Resistenz des Stammes dieser Eschen möglicherweise nicht wesentlich höher als die der getesteten anfälligen Exemplare. Bislang sind die exakten Mechanismen der Resistenz und Toleranz der Esche sowie deren Ausprägung kaum erforscht. Eine weitere Erklärung, die sowohl für Resistenztests gegen das ETS als auch gegen das EPK gilt, könnte sein, dass die Versuchspfröpflinge zu klein sind und in allen Fällen nicht über genügend Ressourcen verfügen, um eine optimale Abwehr zu entwickeln. Dies lässt sich in den letzten Jahren im Wald beobachten, wo der Eschenverjüngung dem Infektionsdruck des ETS nur schwer standhalten kann, auch wenn diese Verjüngung in der Nähe von scheinbar gesunden Bäumen stattfindet (geringe Kronenschäden und keine Stammfussnekrosen). Die Grösse und Entwicklung der Pfröpflinge stellen jedoch eine gemeinsame Einschränkung aller Resistenzversuche dar, da es sich um die schnellste und am einfachsten umzusetzende Methode handelt. Da die Ergebnisse keinen Zusammenhang zwischen der Grösse der Pfröpflinge und der Nekrose oder der Fitness der Larven zeigen, kann dieser Faktor glücklicherweise als Verzerrungsquelle ausgeschlossen werden.

Die Resistenztests haben fünf Genotypen identifiziert, die sich sowohl gegenüber dem ETS als auch gegenüber dem EPK als besonders resistent erwiesen haben. Diese Genotypen sind wertvoll, da sie gekreuzt werden können, um neue Generationen resistenter Eschen zu züchten. Diese Ergebnisse zeigen auch, wie selten wirklich resistente Eschen derzeit vorkommen und wie weit sie im Gelände voneinander entfernt sind. Dies unterstreicht die Notwendigkeit, im Wald nach scheinbar resistenten Eschen zu suchen, um eine Chance zu haben, ihr Erbgut für den Wald der Zukunft zu bewahren.

9 DANKSAGUNG

Das gesamte Projektteam dankt der Wald- und Holzforschungsförderung Schweiz WHFF-CH, dem Bundesamt für Umwelt BAFU sowie der Konferenz für Wald, Wildtiere und Landschaft für die Unterstützung und das entgegengebrachte Vertrauen. Wir danken auch Michael Eisenring und Anouchka Perret-Gentil für ihre Beratung zum Umgang mit Eschenprachtkäfern und zur Anpassung der Versuchsprotokolle. Wir möchten uns bei Jacob St. Amour und dem Team des Great Lakes Forestry Centre für die Zusendung von EPK-Eiern bedanken, ohne die wir dieses Projekt nicht hätten durchführen können. Ein besonderer Dank gilt auch Max Liam Philippi, Federico Monteleone, Mona Hallenberger, Johanna Gnägi, Alice Pessina, Vittorio Bizzozero, Nicoleta-Teodora Bulancea und Achchutan Perinpanathan für ihre zeitweise Hilfe sowohl beim Giessen und Pflegen der Pfröpflinge als auch im Labor.

10 LITERATUR

- Baral, H.O., Queloz, V. & Hosoya, T. (2014). *Hymenoscyphus fraxineus*, the correct scientific name for the fungus causing ash dieback in Europe. *IMA Fungus* 5, 79–80. <https://doi.org/10.5598/ima fungus.2014.05.01.09>
- Baranchikov, Y., Mozolevskaya, E., Yurchenko, G. and Kenis, M. (2008), Occurrence of the emerald ash borer, *Agrilus planipennis* in Russia and its potential impact on European forestry. *EPPO Bulletin*, 38: 233–238. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2338.2008.01210.x>
- Enderle, R., Sander, F., & Metzler, B. (2017). Temporal development of collar necroses and butt rot in association with ash dieback. *IForest*, 10(3), 529–536. <https://doi.org/10.3832/for2407-010>
- Gossner, M. M., Perret-Gentil, A., Britt, E., Queloz, V., Glauser, G., Ladd, T., Roe, A. D., Cleary, M., Liziniewicz, M., Nielsen, L. R., Ghosh, S. K., Bonello, P., & Eisenring, M. (2023). A glimmer of hope – ash genotypes with increased resistance to ash dieback pathogen show cross-resistance to emerald ash borer. *New Phytologist*, 240(3), 1219–1232. <https://doi.org/10.1111/nph.19068>
- Gross, A. and Sieber, T.N. (2016). Virulence of *Hymenoscyphus albidus* and native and introduced *Hymenoscyphus fraxineus* on *Fraxinus excelsior* and *Fraxinus pennsylvanica*. *Plant Pathol*, 65: 655–663. <https://doi.org/10.1111/ppa.12450>
- Haack, R. A., Baranchikov, Y., Bauer, L. S., Poland, T. M. (2015). Emerald ash borer biology and invasion history. In: Van Driesche RG, Reardon RC (eds) *Biology and control of emerald ash borer*. FHTET 2014–09. *U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest health technology Enterprise team*, Morgantown, pp 1–13 <https://research.fs.usda.gov/treesearch/11858>
- Klesse, S., Abegg, M., Hopf, S. E., Gossner, M. M., Rigling, A., & Queloz, V. (2021). Spread and Severity of Ash Dieback in Switzerland – Tree Characteristics and Landscape Features Explain Varying Mortality Probability. *Frontiers in Forests and Global Change*, 4. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2021.645920>
- Kowalski, T. (2006). *Chalara fraxinea* sp. nov. associated with dieback of ash (*Fraxinus excelsior*) in Poland. *Forest Pathology*, 36: 264–270. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0329.2006.00453.x>
- Kowalski, T., Bilański, P., Holdenrieder, O. (2015). Virulence of *Hymenoscyphus albidus* and *H. fraxineus* on *Fraxinus excelsior* and *F. pennsylvanica*. *PLoS One*. Oct 30;10(10): e0141592. doi: 10.1371/journal.pone.0141592. PMID: 26517266; PMCID: PMC4627758
- Lévesque, M., Bustamante Eduardo, J. I. (2021). *Espèces d’arbres de remplacement pour le frêne commun en Suisse – Rapport final*. *ETH Zürich, Project : 00.5053.PZ / 7368828B9*
- Mack, R.N., Simberloff, D., Mark Lonsdale, W., Evans, H., Clout, M. and Bazzaz, F.A. (2000). BIOTIC INVASIONS: CAUSES, EPIDEMIOLOGY, GLOBAL CONSEQUENCES, AND CONTROL. *Ecological Applications*, 10: 689–710. [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(2000\)010\[0689:BICEGC\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(2000)010[0689:BICEGC]2.0.CO;2)
- McCullough, D.G., Katovich, S.A., (2004). Pest Alert: Emerald Ash Borer. *United States Forest Service, Northeastern Area*. NA-PR-02-04
- McKinney, L. v., Nielsen, L. R., Collinge, D. B., Thomsen, I. M., Hansen, J. K., & Kjær, E. D. (2014). The ash dieback crisis: genetic variation in resistance can prove a long-term solution. *Plant Pathology*, 63(3), 485–499. <https://doi.org/10.1111/PPA.12196>
- Orlova-Bienkowskaja M. J., Bieńkowski A. O. (2018) Modeling long-distance dispersal of emerald ash borer in European Russia and prognosis of spread of this pest to neighboring countries within next 5 years. *Ecol Evol*. 2018;8:9295–9304. <https://doi.org/10.1002/ece3.4437>
- Orlova-Bienkowskaja, M. J., Drogvalenko, A. N., Zabaluev, I. A., Sazhnev, A. S., Peregudova, E. Y., Mazurov, S. G., Komarov, E. v., Struchaev, V. v., Martynov, V. v., Nikulina, T. v., & Bieńkowski, A. O. (2020). Current range of *Agrilus planipennis* Fairmaire, an alien pest of ash trees, in European Russia and Ukraine. *Annals of Forest Science* 2020 77:2, 77(2), 1–14. <https://doi.org/10.1007/S13595-020-0930-Z>
- Poland, T. M., & McCullough, D. G. (2006). Emerald Ash Borer: Invasion of the Urban Forest and the Threat to North America’s Ash Resource. *J. For.* 104, 118–124. <https://doi.org/10.1093/jof/104.3.118>
- Queloz, V., Grünig, C.R., Berndt, R., Kowalski, T., Sieber, T.N. and Holdenrieder, O. (2011). Cryptic speciation in *Hymenoscyphus albidus*. *Forest Pathology*, 41: 133–142. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0329.2010.00645.x>

- Richardson, D.M., Pyšek, P., Rejmánek, M., Barbour, M.G., Panetta, F.D. and West, C.J. (2000). Naturalization and invasion of alien plants: concepts and definitions. *Diversity and Distributions*, 6: 93-107. <https://doi.org/10.1046/j.1472-4642.2000.00083.x>
- Selikhovkin, A.V., Popovichev, B.G., Mandelshtam, M.Y., Vasaitis, R., Musolin, D.L. (2017). The frontline of invasion: The current Northern limit of the invasive range of Emerald ash borer, *Agrilus planipennis* Fairmaire (Coleoptera: Buprestidae), in European Russia. *Balt. For.* 2017,23, 309–315.
- Siegert, N. W., McCullough, D. G., Liebhold, A. M., Telewski, F. (2007). Resurrected from the ashes: a historical reconstruction of emerald ash borer dynamics through dendrochronological analyses. In: Mastro V, Reardon R, Parra G, compilers. Proceedings of the emerald ash borer research and technology development meeting. October 31–November 1, 2006, Cincinnati, Ohio. *USDA Forest Service, Forest Health Technology Enterprise Team, FHTET publ. 2007–04. p. 18–19.* <https://research.fs.usda.gov/treesearch/19561>
- Spiegel, P., Hintze, T., Kopp, A., Sahli, M., Detter, A., Queloz, V., Prospero, S., Heinzelmann, R. (2025). Synergistic negative effects of ash dieback and Armillaria root rot on health and stability of mature ash trees. *Forest Ecology and Management*, Volume 580, 122476, ISSN 0378-1127, <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2024.122476>
- Stocks, J. J., Metheringham, C. L., Plumb, W. J., Lee, S. J., Kelly, L. J., Nichols, R. A., & Buggs, R. J. A. (2019). Genomic basis of European ash tree resistance to ash dieback fungus. *Nature Ecology & Evolution* 2019 3:12, 3(12), 1686–1696. <https://doi.org/10.1038/s41559-019-1036-6>

11 ANHANG

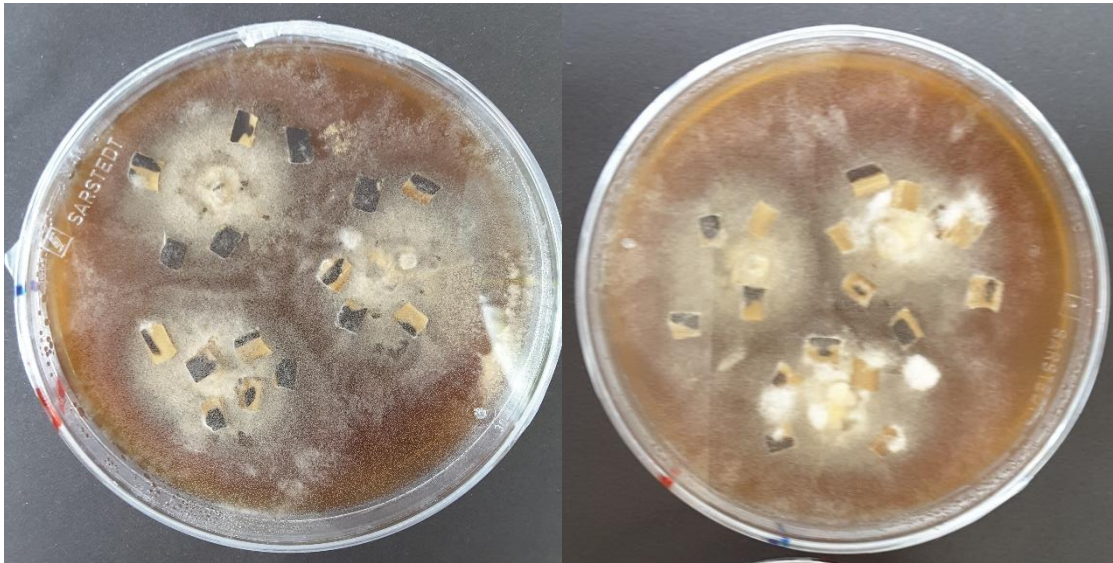


Abbildung 13: Petrischale mit Agar, der mit Eschenblättern angereichert wurde (Ash-Agar), auf denen sich *Hymenoscyphus fraxineus* auf kleinen Eschenholzstückchen entwickelt.



Abbildung 14 : Von der ETS befallene Pfropfstämme. Links eine für die Krankheit typische rotbraune Verfärbung. Rechts eine für eine subkortikale Nekrose charakteristische Verfärbung des Kambiums.



Abbildung 15: Verfahren zur Inokulation der Stämme von Pfröpfingen mit Holzstückchen, die mit *H. fraxineus* befallen sind.



Abbildung 16: Verfahren zur Entnahme von EPK-Larven. Links, über die gesamte Länge: ein Eschenstamm, in den die Larven Gänge gegraben haben, vor allem rund um das Kambium. Es handelt sich um diese Art von Schäden, die die Larven des Eschenbohrers für das Überleben der befallenen Esche gefährlich machen. Die Pfeile zeigen auf den Bildern das Vorkommen von Larven an.



Abbildung 17: Zwei mikroskopische Aufnahmen der Kopfkapsel einer EPK-Larve, mit Angabe der Breite. Oben ein klarer und einfacher Fall. Unten eine Situation, in der die Beobachtung schwieriger, aber noch möglich ist.

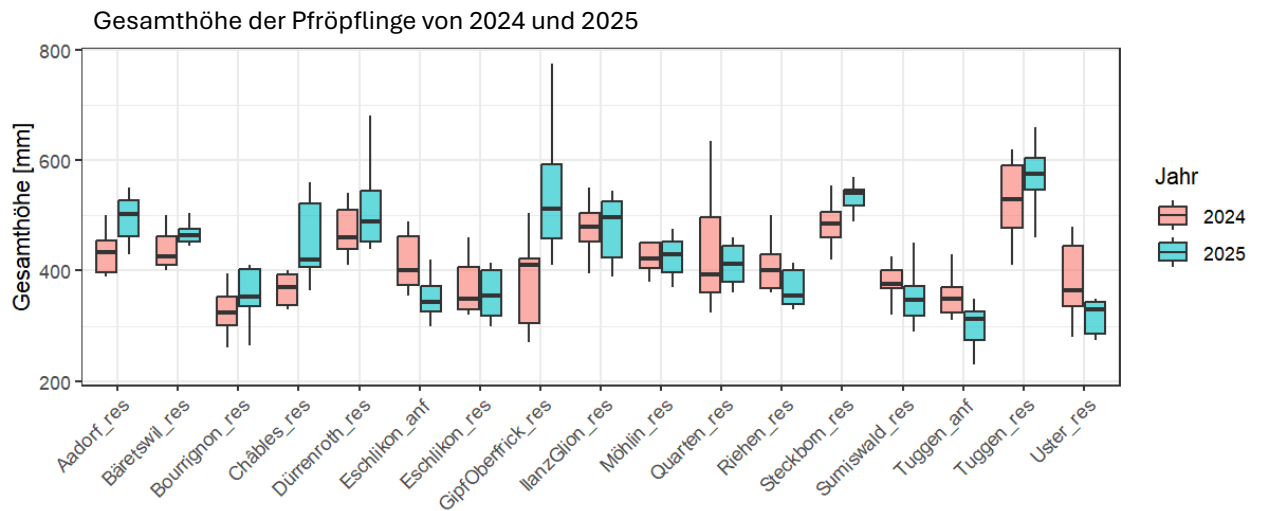


Abbildung 18: Gesamthöhe der Versuchspfröpflinge von 2024 und 2025. Dabei ist zu beachten, dass es sich von Jahr zu Jahr um unterschiedliche Pflanzen handelt.
 Die Gesamthöhe umfasst den Wurzelstock und den Pfröpfstück.

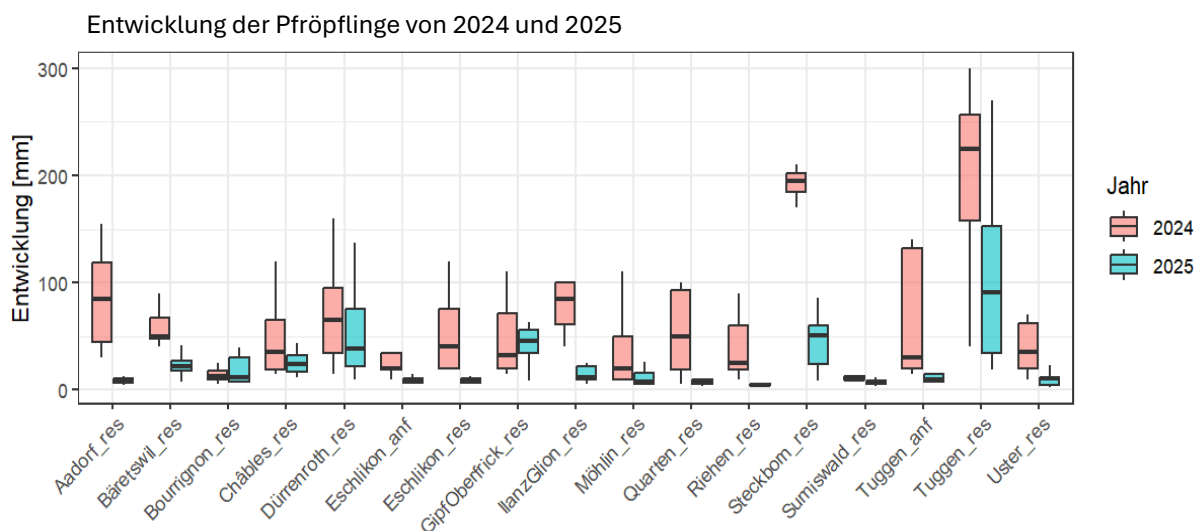
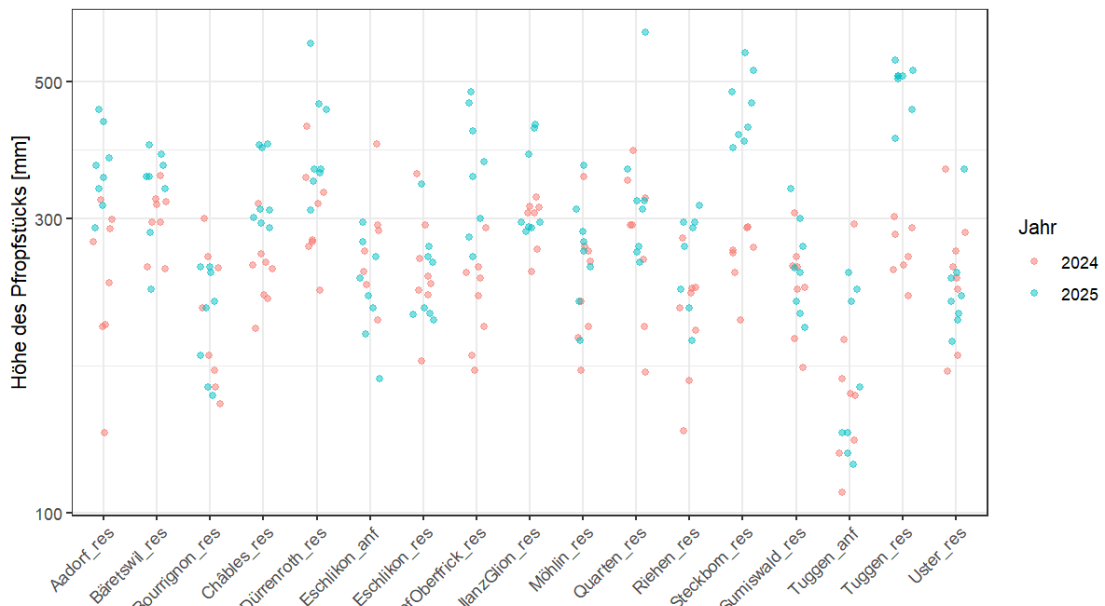
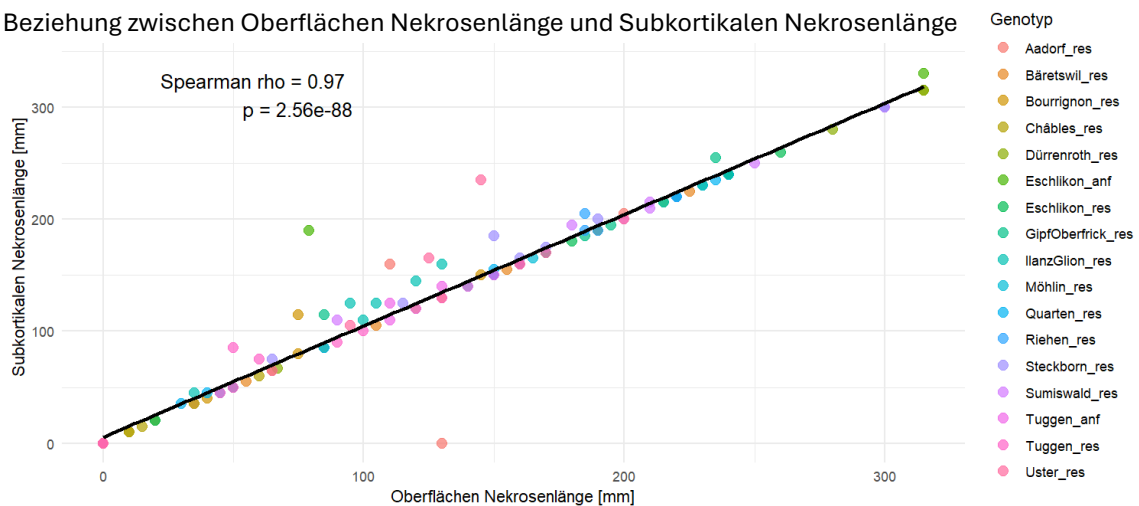


Abbildung 19: Entwicklung der in den Versuchen von 2024 und 2025 verwendeten Pfröpflinge. Zu beachten ist, dass es sich von Jahr zu Jahr um unterschiedliche Exemplare handelt.
 Hier wird nur der diesjährige Trieb gemessen. Er ist an der Oberfläche des Stiels an einer feinen Abgrenzung zu erkennen, die von den Wachstumsphasen der einzelnen Jahre zurückbleibt.
 Zwei mikroskopische Aufnahmen der Kopfkapsel einer EPK-Larve mit Längenangabe. Oben ein klarer und einfacher Fall.
 Unten eine Situation, in der die Beobachtung schwieriger, aber noch möglich ist.

Höhe der Pfropfstücke von 2024 und 2025



Beziehung zwischen Oberflächen Nekrosenlänge und Subkortikalen Nekrosenlänge



Beziehung zwischen Kopfkapseln breite und Larven Trockengewicht

