
Evidenz mehlttauresistenter Eichen für die Waldverjün- gung im Klimawandel (MetaEiche)



- Schlussbericht -

Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz

**Rheinland-Pfälzische Technische Universität Kaiserslautern – Fachbereich Biologie –
Abt. Phytopathologie**

Waldklimafonds 2220WK16A4 und 2220WK16B4

30.07.2025

SAEED, M, SCHLOSSER, F. HAHN, M. & SEEGMÜLLER, S.

Evidenz mehlttauresistenter Eichen für die Waldverjün-gung im Klimawandel (MetaEiche)

Teilvorhaben 1: Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz

**Teilvorhaben 2: Rheinland-Pfälzische Technische Universität Kaiserslautern –
Fachbereich Biologie – Abt. Phytopathologie**



Gefördert durch:



Bundesministerium
für Ernährung
und Landwirtschaft

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit
und Verbraucherschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

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

Gesamtgliederung

- 1 Kurzfassungen und Summaries**
- 2 Schlussbericht**
- 3 Erfolgskontrollberichte**

**Evidenz mehltaresistenter Eichen für die Waldverjüngung im Klimawandel
(MetaEiche)**

Kurzfassungen und Summaries

Berichtsblatt - Kurzfassung des Vorhabens ¹

Zuwendungsempfänger: Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz	Förderkennzeichen: 2220WK16A4
--	-------------------------------

Thema: Evidenz mehltreuerresistenter Eichen für die Waldverjüngung im Klimawandel.

Teilvorhaben 1: Waldbau und Physiologie in kleinflächigen Eichen-Naturverjüngungen unter Berücksichtigung der Mehltreuerinfektion

Laufzeit des Vorhabens: 01.07.2021-31.01.2025

Projektbeschreibung: (maximal 2.000 Zeichen)

Stieleichen und Traubeneichen sollen im Klimawandel aufgrund ihrer Wärme- und Trockentoleranz primär auf dem Wege kleinflächiger Naturverjüngungen vermehrt am Waldaufbau beteiligt werden. Allerdings stellt der Eichenmehltau die Erfolgsaussichten dafür in Frage. Er führt Jahr für Jahr epidemisch und flächendeckend zu erheblichen Schäden an den proleptischen Sommertrieben, die Jungpflanzen bleiben im Wachstum signifikant zurück oder sterben sogar. In Zukunft werden die wärmeren Winter die Krankheit wohl weiter begünstigen. Es besteht die Gefahr, dass die Eichennaturverjüngung gerade in den kleinflächigen Verfahren gegenüber der Konkurrenzvegetation versagt. Deshalb war es das Gesamtziel des MetaEiche-Projekts, die Evidenz mehltreuerresistenter und –toleranter Eichen als Voraussetzung für erfolgversprechende Verfahren zur punktwirksamen Vermehrung der Eichen auf natürlichem Wege zu prüfen. Das Teilvorhaben 1 befasste sich in diesem Rahmen mit waldbaulichen und physiologischen Fragestellungen und legte waldbaupraktische Demonstrationsflächen zur Veranschaulichung der Erkenntnisse für die Praxis an.

Projektergebnisse: (maximal 2.000 Zeichen)

In den untersuchten Naturverjüngungen hat es wohl keine vollständig resistenten Individuen gegeben. Einzelne Pflanzen und Herkünfte leiden aber weniger unter der Pilzkrankheit. Mutterbäume und Nachkommenschaften korrelieren in ihrer Mehltreueranfälligkeit. Demzufolge sind Differenzen in der Mehltreueranfälligkeit aufgrund erblicher Unterschiede nicht auszuschließen.

An Mehltreuer erkrankte Eichen wiesen leicht erhöhte Blattgehalte an Wasserstoffperoxid, mitunter signifikant weniger Ascorbat sowie unveränderte Glutathionreductase-Aktivitäten auf. Trotz Mehltreuer gab es nicht mehr Biomembranschäden. Offensichtlich leiden die Eichen mit Mehltreuer nicht an oxidativen Stress. So fallen erkrankte Bäume auch nicht im Wachstum zurück. Sie leiden jedoch unter mehr (Winter-)Mortalität.

Die Mehltreuerkrankung und die Blattgehalte an Gesamtphenol und Ellagttanninen korrelierten 2021. Die Eichenblätter hatten ihre wichtigsten Tannine, Vescalagin und Castalagin (VC), umso mehr angereichert, je höher die Infektionsrate war. Damit einhergehend häuften sie den entscheidenden VC-Vorläufer β -Glucogallin (β -GG), an, aktivierten jedoch nicht substanziell das Schlüsselenzym Galloyltransferase I. Vielmehr kommt die UDP-Glucose als entscheidendes Substrat für die β -GG-Synthese nur in Eichenblättern mit Mehltreuer merklich vor.

Zur Veranschaulichung der Ergebnisse wurden vier Lichtkegelverjüngungen mit je sechs Probeflächen angelegt. Im Durchschnitt waren die Flächen zu 50 bis 70 % überschirmt. Die Masten 2022 bzw. 2024 haben mit 30 und 45 Eicheln / m² genug Saatgut für eine Naturverjüngung ergeben. Die hangparallele Bodenverwundung hat am Steilhang nicht zu mehr Saatgutrückhalt geführt. Die Keimrate 2023 von 25 bis 45 % sicherte ein erfolgreiches Auflaufen der Verjüngung. Auf den Demonstrationsflächen hat sich zwischenzeitlich Mehltreuer eingefunden, der bereits über die Hälfte aller Sämlinge befallen hat und mitunter zu erheblicher Mortalität geführt hat.

¹ Das Berichtsblatt ist bei Verbundvorhaben für jedes Teilvorhaben separat zu erstellen.

Short Project Description ¹

Beneficiary: Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz	Project number: 2220WK16A4
---	----------------------------

Project title: Evidence of powdery mildew resistant oak for the forest rejuvenation under climate change constraints.

Project part 1: Silviculture and physiology of small space natural oak regenerations with special respect to oak powdery mildew infections.

Project :July 1 2021 through to January 31 2025

Project objective: (maximal 2.000 Zeichen)

Due to their heat and drought resistance, pedunculate and sessile oak are good candidates for the forest composition under climate change constraints. The primary way of forest enrichment with the two oak species in question will be small space rejuvenation practices. However, oak powdery mildew compromises the possible success of such strategies. Year by year, it leads to substantial damage of proleptic shoots, the seedlings drop behind in height growth or even die back. As projected, the disease will be more severe with winter warming. This threatens oak natural regeneration with failure especially when applied in the small scale practices for mixed stands. Therefore, it was the overall objective of the MetaEiche project to investigate into the evidence of powdery mildew resistant or tolerant oak trees or origins, respectively, as a prerequisite for a successful small scale forest enrichment with oak in a natural way. Within this framework part 1 took special respect to the silvicultural and physiological bases of Powdery mildew infestation. As an addition it edited the results for practitioners use in silvicultural demonstration sites.

Project results: (maximal 2.000 Zeichen)

On the natural regeneration sites of the MetaEiche project there was virtually no completely Powdery mildew resistant oak rejuvenation. However, single plants or origins proofed to be less affected by the plant disease. Furthermore, there was a correlation between mother trees and their respective offspring. In terms of mildew susceptibility. Therefore, heritable differences in susceptibility must not be ruled out.

Oak plants with powdery mildew hardly exhibited elevated H_2O_2 , tended to have less ascorbate, unchanged glutathione reductase activities and no extra biomembrane damage. Therefore, there was no clue to extra oxidative stress through mildew infestation. In line with this, there was no loss of height increment in infested trees. However, there was more (winter) mortality in these trees.

Mildew infestation regressed to elevated total phenolics and ellagatannins. This was traced back to significantly more vescalagine and castalagine (VC) and more β -glucogallin (β -GG), the pivotal VC precursor, in mildew infested oak leaves, however without substantial more activity in galloyl transferase as the key enzyme for tannin formation. This is in line with UDP-glucose as the decisive β -GG precursor being traceable virtually exclusively in infested plants.

The results were edited in four demonstration sites with six small scale regeneration plots each. In average, plots had a crown coverage of 50 to 70 %. The seeds were at 30 to 45 acorn per m^2 in 2022 and 2024, respectively. This was enough for a good germination result as shown with 25 to 45 % in 2023, yielding good seedling coverage. In the meantime, Powdery mildew has affected all sites and infested more than 50 % of the seedlings, leading to a substantial mortality.

Berichtsblatt - Kurzfassung des Vorhabens

Zuwendungsempfänger:	Förderkennzeichen:
Rheinland-Pfälzische Technische Universität Kaiserslautern – Fachbereich Biologie – Abt. Phytopathologie	2220WK16B4

Thema: Evidenz mehltresistenter Eichen für die Waldverjüngung im Klimawandel.

Teilvorhaben 2: Cytologische und molekulare Evidenzen für genetisch determinierte Resistenz bei Eichen gegen den Mehltapilz

Laufzeit des Vorhabens: 01.07.2021-30.06.2024

Projektbeschreibung:

Stieleichen und Traubeneichen sollen im Klimawandel aufgrund ihrer Wärme- und Trockentoleranz primär auf dem Wege kleinflächiger Naturverjüngungen vermehrt am Waldaufbau beteiligt werden. Allerdings stellt der Eichenmehltau die Erfolgsaussichten dafür in Frage. Er führt Jahr für Jahr epidemisch und flächendeckend zu erheblichen Schäden an den proleptischen Sommertrieben, die Jungpflanzen bleiben im Wachstum signifikant zurück oder sterben sogar ab. In Zukunft werden die wärmeren Winter die Krankheit wohl weiter begünstigen und es besteht die Gefahr, dass die Eichennaturverjüngung gerade in den kleinflächigen Verfahren gegenüber der Konkurrenzvegetation versagt. Deshalb war es das Gesamtziel des MetaEiche-Projekts, die Evidenz mehltresistenter und -toleranter Eichen als Voraussetzung für erfolgversprechende Verfahren zur wirksamen Vermehrung der Eichen auf natürlichem Wege zu prüfen. Das Teilvorhaben 2 befasste sich in diesem Rahmen mit der Entwicklung eines Schnelltests zur zuverlässigen Identifizierung mehltresistenter Eichen. Zu diesem Zweck wurden Methoden zur kontrollierten Inokulation isolierter Eichenblätter mit Mehltapilzkonidien und zur makroskopischen, mikroskopischen und molekularen Quantifizierung des Infektionsverlaufs etabliert. Auf dieser Basis wurde die differenzielle Resistenz unterschiedlicher Eichenarten untersucht sowie die in den regionalen Wäldern vorkommenden Mehltapilzarten beleuchtet.

Projektergebnisse:

Es ist gelungen, einen Schnelltest zur kontrollierten Infektion von abgetrennten Eichenblättern mit Mehltapilz zu etablieren, mit dem sich der Infektionsverlauf visuell und mikroskopisch auf der Basis verschiedener Färbemethoden für die Sichtbarmachung des Pilzes (via Chitin) und von pflanzlichen Abwehrreaktionen (via Callose) quantifizieren lässt. Der Mehltapilz ist auf jungen Blättern aus den Klimakammern auch nach 10 Tagen noch aktiv, stellt aber auf vergleichbar jungen Blättern aus dem Freiland, die in der zweiten Sommerhälfte geerntet worden sind, bereits nach drei Tagen sein Wachstum ein. Während Traubeneichen sehr anfällig für Mehltapilz sind, erwiesen sich Zerreichen als teilweise und Roteichen als nahezu vollständig mehltresistent. Zwar können die Mehltapilzkonidien auf allen Blättern keimen, bei Zerreichen kommt es aber nur zu einem geringen und bei Roteichen zu fast keinem Wachstum der Elongationshyphen, die eine erfolgreiche Haustorienbildung und den Übergang in die biotrophe Wachstumsphase anzeigen. Dennoch gibt es in der MetaEiche-Untersuchungsregion auch auf Zerreichen gelegentliche Mehltapilzinfektionen, und selbst auf Roteichen wurden erstmals vereinzelt mehltapilzinfizierte Blätter beobachtet. Erste Hinweise für genetisch determinierte Resistenz bei Stieleiche wurden erhalten, aber noch nicht bestätigt. In dem Projekt wurde eine Methode zur Quantifizierung der Mehltapilzinfektion mittels RT-qPCR etabliert. Mit Mehltapilz inokulierte Eichenblätter zeigten für das Pflanzenabwehr-Gen PR1 eine erhöhte Expression im Vergleich zu gesunden Blättern. Auf der Pilzseite zeigte sich in der Region Kaiserslautern eine Diversität des Mehltaus. Neben dem dominierenden *Erysiphe alphitoides* wurde auch *E. quercicola* an manchen Standorten gefunden. Die Eichen zeigten auf cytologischer Ebene in den ersten Tagen keine sichtbaren Abwehrreaktionen, wie die Anhäufung von reaktiven Sauerstoffspezies [ROS, H₂O₂] oder Zelltod, auf die Infektion. Eine Ausnahme war die Bildung von Callose bei Zerreichen unter den Appressorien des Pilzes.

Short Project Description

Beneficiary:	Project number:
Rheinland-Pfälzische Technische Universität Kaiserslautern – Fachbereich Biologie – Abt. Phytopathologie	2220WK16B4
Project title: Evidence for powdery mildew resistant oak for forest rejuvenation under climate change constraints	
Project part 1: Cytological and molecular evidence for a genetically determined resistance of oak against powdery mildew infestation	
Project duration: July 1 2021 to June 30 2024	

Project objective:

Due to their heat and drought resistance, pedunculate and sessile oak are good candidates for improved forest composition in central Europe under climate change constraints. The primary way of forest enrichment with these two oak species will be small space rejuvenation practices. However, oak powdery mildew can compromise the success of such strategies. Year by year, this disease leads to substantial damage of proleptic shoots. The seedlings are lagging behind in height growth or even might die back. As projected, the disease will be more severe with winter warming. This threatens natural oak regeneration with failure, especially when applied in the small-scale practices for mixed stands. It was therefore the overall objective of the MetaEiche project to investigate the evidence for existence of powdery mildew resistant or tolerant oak trees or origins, in order to increase the success of natural small scale forest enrichment with oak. Within this framework, part 2 of the project aimed at the development of a rapid test for the reliable identification of genetically oak powdery mildew (OPM) resistant oak individuals. For this purpose, a method for controlled inoculation of excised leaves with OPM conidia was developed. This allowed for a macroscopic, microscopic, and molecular quantification of the infection progress and yielded insight into the differential resistance of different oak species and into the prevailing powdery mildew species in our local forests.

Project results:

We have succeeded to establish a reproducible rapid test for a controlled powdery mildew infection of excised oak leaves. This test allows to quantify the OPM infection progress on a macroscopic, microscopic, and molecular scale. Quantification was performed based on three different staining methods for the visualization of the fungus (via chitin) and of plant defense reactions (via callose). OPM is still active on young leaves harvested from climate chambers after 10 days, but it stops growing on comparably young leaves from the field, if they are harvested not in spring but in the second half of summer, after just three days. While sessile oaks are very susceptible to OPM, Turkey oaks have proven to be partially and red oaks almost completely resistant to mildew. Although powdery mildew conidia can germinate on all leaves, there is only slight growth of the secondary elongation hyphae on Turkey oaks and almost no growth on red oaks, which indicate successful haustoria formation and the transition to the biotrophic growth phase. Nevertheless, there are occasional mildew infections on Turkey oaks in the MetaEiche study region, and even the leaves of red oaks were not always spared. Initial indications of genetically determined resistance in sessile oak have been obtained but not yet confirmed. We also established a one tube method for the RT-qPCR quantification of OPM infestation. In infected oak leaves the plant defence gene PR1 was upregulated compared to healthy leaves. Besides *Erysiphe alphitoides*, also *E. quercicola* was occasionally present in the MetaEiche region of investigation. OPM infection did not induce apparent cytological defence reactions such as elevated H₂O₂ formation or even hypersensitive cell death in sessile, Turkey or red oak. An exception to the rule was the observation of callose depositions beneath the fungal appressoria on Turkey oak.

Evidenz mehlttauresistenter Eichen für die Waldverjüngung im Klimawandel (MetaEiche)

Schlussbericht

SCHLUSSBERICHT

Evidenz mehltaresistenter Eichen für die Waldverjüngung im Klimawandel (MetaEiche)

Teilvorhaben 1: Waldbau und Physiologie in kleinflächigen Eichen-Naturverjüngungen unter Berücksichtigung der Mehltauinfektion (FKZ 2220WK16A4)

Teilvorhaben 2: Cytologische und molekulare Evidenzen für genetisch determinierte Resistenz bei Eichen gegen den Mehltaupilz (FKZ 2220NR16B4)

Gliederung

I.	Ziele.....	5
I.1	Aufgabenstellung.....	5
I.1.1	Stand der Technik.....	6
I.1.2	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	6
II.	Ergebnisse.....	7
II.1	Erzielte Ergebnisse.....	7
II.1.1	Waldbau und Physiologie in kleinflächigen Eichen-Naturverjüngungen unter Berücksichtigung der Mehltauinfektion	7
II.1.1.1	Es gibt eher keine vollständig resistenten Individuen, aber weniger anfällige Herkünfte	7
II.1.1.2	Die Mehltauerkkrankung betrifft vor allem vorwüchsige Pflanzen und verursacht mehr Wintermortalität	11
II.1.1.3	Mehltau im Altbestand und in der Verjüngung korrelieren möglicherweise	13
II.1.1.4	Die Mehltauinfektion verursacht keinen oxidativen Stress	14
II.1.1.5	Die Gerbstoffe könnten ein Schlüssel für die Mehltautoleranz sein	17
II.1.1.6	Fazit der wissenschaftlichen Untersuchungen	22
II.1.1.7	Lichtkegelverjüngung geht auch unter erschwerten Bedingungen	22
II.1.2	Cytologische und molekulare Evidenzen für genetisch determinierte Resistenz bei Eichen gegen den Mehлтаupilz.....	26
II.1.2.1	Methode zur kontrollierten Mehltauinfektion isolierter Eichenblätter:	26
II.1.2.2	Reproduzierbare Färbeprotokolle:	26
II.1.2.3	Mehltau-Symptome auf Blättern aus Klimakammern und aus dem Freiland	27
II.1.2.4	Mehltau-Quantifizierung mittels qPCR	29
II.1.2.5	Reaktionen von Traubeneiche, Zerreiche und Roteiche auf Mehltau-Inokulation	30
II.1.2.6	Zelluläre Resistenzreaktionen bei Eichenarten	32
II.1.2.7	Durch Mehltau induzierte Genexpression in Eichenblättern	33
II.1.2.8	Phänotypische Bewertung des Mehltaubefalls an Sämlingen verschiedener Provenienzen	34
II.1.2.9	Diversität von <i>Erysiphe</i> spp. in der Region Kaiserslautern	35
II.1.2.10	Aktivität von Vescalagin und Castalagin gegen Eichenmehltau	36
II.1.2.11	Erster Bericht über den Echten Mehltau an <i>Quercus cerris</i> (Zerreiche) in Deutschland	38
II.1.2.12	Erster Bericht über Echten Mehltau an Roteiche in Deutschland	39
II.2	Verwertung	41
II.2.1	Voraussichtlicher Nutzen	41
II.2.2	Wissenschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende	41
II.2.3	Wirtschaftliche Erfolgsaussichten	41
II.3	Erkenntnisse von Dritten	42
II.4	Veröffentlichungen	46
III	Literatur.....	49
IV	ANHANG	55
IV.1	Teilvorhaben 2220WK16A4	55
IV.1.1	Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens	55
IV.1.2	Bearbeitete Arbeitspakete.....	55
IV.1.3	Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens	56

IV.2	Teilvorhaben 2220WK16B4	57
IV.2.1	Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens	57
IV.2.2	Bearbeitete Arbeitspakete.....	57
IV.2.3	Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens	57

I. Ziele

Stieleichen und Traubeneichen (*Quercus robur* L. und *Q. petraea* Liebl.) sollen mit Blick auf den Klimawandel aufgrund ihrer Wärme- und Trockentoleranz primär auf dem Wege kleinflächiger Naturverjüngungen vermehrt am Waldaufbau beteiligt werden. Allerdings stellt der Eichenmehltau (*Erysiphe alphitoides*), ein neophytischer Blattparasit, die Erfolgsaussichten dafür in Frage. Er führt epidemisch und flächendeckend zu erheblichen Schäden an den proleptischen Sommertrieben, die Jungpflanzen bleiben im Wachstum signifikant zurück oder sterben sogar. In Zukunft werden die wärmeren Winter die Krankheit wohl darüber hinaus weiter begünstigen. Es besteht die Gefahr, dass die Eichennaturverjüngung gerade in den kleinflächigen Verfahren gegenüber der Konkurrenzvegetation versagt.

Es gibt jedoch immer wieder Beobachtungen von einzelnen befallsfreien oder nur wenig geschädigten Pflanzen in den Verjüngungen. Solche Beobachtungen könnten auf zufälligen oder standortbedingten Effekten beruhen, oder aber auch Ausdruck von Resistenz oder Toleranz der Eichen gegenüber dem Mehltau sein. Eine vererbte Resistenz oder Toleranz wären wichtige Faktoren, um die kleinflächige Naturverjüngung der Eichen im Klimawandel wie gewünscht voranzubringen. Deshalb ist es das Gesamtziel des MetaEiche-Projekts, die waldbauliche, physiologische, cytologische und molekularbiologische Evidenz mehltauresistenter und – toleranter Eichen zu prüfen, anpassungsfähige Herkünfte zu identifizieren und die Erkenntnisse den Waldbau-Praktiker*innen auf Demonstrationsflächen verfügbar zu machen. Zur schnellen und zuverlässigen Identifizierung mehltauresistenter Eichen sollte ein Schnelltest etabliert werden, bei dem abgeschnittene Blätter mit Mehltaukonidien inokuliert werden und der Infektionsverlauf makroskopisch, mikroskopisch und molekular quantifiziert wird.

I.1 Aufgabenstellung

Die Planung des Projekts umfasste die waldbaulichen Untersuchungen ab dem ersten Projektjahr, die Klärung der Pathophysiologie der an Mehltau erkrankten Eichen sowie die Cytologie, Biochemie und Molekularbiologie der Infektion. Mit dem Plan übereinstimmend wurden zu Projektbeginn drei Althölzer mit Naturverjüngung identifiziert und wachstumskundlich aufgenommen. Dauerhaft markierte Pflanzen in den Probekreisen der Naturverjüngungen wurden bis zum Projektende planmäßig mehrfach jährlich unter verschiedenen Gesichtspunkten bonitiert und beprobt. Die Blattproben wurden jährlich pathophysiologisch analysiert. Im dritten Projektjahr wurden einige Untersuchungsflächen mit einer Drohne befliegen und die Aufnahmen orientierend ausgewertet.

In den Naturverjüngungen gab es auch nach vier Jahren noch offensichtlich gesunde Individuen. Die Mehltau-erkrankung betraf eher die vorwüchsigen Individuen. Mehltau führte zu einer erhöhten Wintermortalität. Erkrankte Pflanzen zeigten keine erhöhte oxidative Belastung oder mehr Antioxidantien, aber hatten signifikant mehr Gerbstoffe (Vescalagin und Castalagin, VC) angereichert. VC dürfte daher ein Marker für die Mehltau-toleranz der Pflanzen sein.

Im Vorlauf zum Projektbeginn wurde am Genressourcenzentrum Rheinland-Pfalz ein Herkunftsversuch mit insgesamt 25 Traubeneichenherkünften angelegt. Alle Pflanzen wurden jährlich wachstumskundlich aufgenommen und nach ihrer Mehltau-erkrankung bonitiert. Im zweiten Projektjahr wurde der Zusammenhang von Johannistriebbildung und Mehltau analysiert. Es gab eine Herkunft, die in allen vier Ansprachejahren signifikant weniger an Mehltau erkrankt war als alle anderen. Die Mehltau-erkrankung korrelierte positiv mit dem Höhenwachstum, nicht jedoch mit dem Auftreten von Johannistrieben.

Statt gepfropfter Pflanzen wurden ab dem zweiten Projektjahr im großen Umfang freie Absaaten von Traubeneiche und Stieleiche, sowie als teil- oder vollresistente Kontrollen Zerreiche und Roteiche unter Klimakammerbedingungen kultiviert. Trauben- und Stieleiche wurden in den Projektjahren zwei und drei doppelt pathophysiologisch analysiert. Mehltau hatte zu signifikant erhöhten VC-Gehalten geführt. Weiterführende Untersuchungen im Rahmen eines Folgeprojekts (EichenResisT, FAWF-Förderung 5.1-01-2024) haben gezeigt, dass VC die Keimung der Mehltaukonidien und das Wachstum der Elongationshyphen effektiv behindert. Vor diesem Hintergrund wurde im MetaEiche-Projekt klargestellt, dass die Gerbstoffanreicherung auf mehr β -Glucogallin (β -GG, Vorläufersubstanz von VC) zurückzuführen ist. Allerdings beruhte dies nicht unbedingt auf einer aktiveren Galloyltransferase (GTase; Schlüsselenzym der β -GG-Synthese), sondern ließ sich mit mehr UDP-Glucose (Substrat der GTase zur β -GG-Synthese) in Verbindung bringen. Hier wären weitere Untersuchungen, insbesondere der UDP-Glucose-Phosphorylase (UGPase; Schlüsselenzym der UDP-Glucose-Synthese) vonnöten, die klären, ob die Mehltauinfektion UGPase-Aktivitätsunterschiede provoziert. Dies könnte einen Weg hin zu einem Mehltau-Schnelltest ebnen, der auf der Untersuchung des Gens in der Kern-DNA oder der RNA mittels dPCR auf unterschiedliche Kopienzahlen oder Unterschiede in der Transkription zwischen anfälligen und resistenten Individuen beruht.

Zur Etablierung des Mehltautoleranz-Schnelltests wurden junge, nicht infizierte Eichenblätter in den späten Frühlings- und den Sommermonaten aus dem Freiland entnommen. Zu anderen Zeiten waren mehltauempfindliche Blätter nur von in Klimakammern kultivierten Pflanzen verfügbar. Infektionsfähige Mehltausporen wur-

den zwischen Juni bis September von im Freiland infizierten Blättern gewonnen, in den übrigen Monaten wurden sie ebenfalls von in Klimakammern kultivierten, künstlich mit Mehltau infizierten Pflanzen geerntet. Abgeschnittene Blätter wurden mit einer definierten Zahl an Sporen inokuliert und der Infektionsverlauf sowohl visuell/fotografisch als auch mikroskopisch verfolgt, um eine quantitative Erfassung der Mehltaresistenz der untersuchten Eichen zu ermöglichen. Mit Hilfe geeigneter Färbemethoden sowie licht- und fluoreszenzmikroskopischer Verfahren sollte eine quantitative cytologische Auswertung der Entwicklung des Mehltaus auf der Pflanze erfolgen. Weitere Ziele waren die Entwicklung molekularer Werkzeuge wie die (RT-)qPCR zur präzisen Quantifizierung des Pathogens und Messungen der Induktion von pflanzlichen Abwehrgenen. Darüber hinaus sollte die genetische Vielfalt der Eichenmehltau-Arten (*Erysiphe* spp.) in den untersuchten Gebieten bewertet werden.

Neben den wissenschaftlichen Untersuchungen wurden vier weitere Eichenbestände für die Ausformung waldbaulicher Anschauungsobjekte zur kleinflächigen Eichen-Naturverjüngung unter besonderer Berücksichtigung spezifischer Fragestellungen ausgewählt. Auf allen Demonstrationsflächen wurden bis zum Projektende in vollem Umfang Kleinzäune gestellt und größtenteils die Verjüngungsaufnahmen begonnen. Die auflaufende Verjüngung in den Kleinzäunen wurde ab dem jeweiligen Keimjahr planmäßig jährlich unter besonderer Berücksichtigung der Mehltaresistenz aufgenommen. Im zweiten Erhebungsjahr waren etwa zwei Drittel der im ersten Jahr scheinbar gesunden Pflanzen an Mehltau erkrankt.

I.1.1 Stand der Technik

Um den Waldschäden im Klimawandel zu begegnen, wird es als aussichtsreich angesehen, die heimischen Eichenarten auf dem Wege kleinflächiger Naturverjüngungen vermehrt am Aufbau klimastabiler Wälder zu beteiligen (VON TEUFFEL, 2010; DERING & CHYBICKI, 2012; WILHELM *et al.*, 2019 A). Allerdings müssen sich die Eichen in den ersten Jahren mit ihren proleptischen Trieben gegen die begleitende Konkurrenzvegetation durchsetzen (BARNOLA *et al.*, 1990; COLLET *et al.*, 1997). Die Konkurrenzfähigkeit der Eiche wird jedoch heutzutage durch den Eichenmehltau (*Erysiphe alphitoides* Griffon & Maublanc 1912) massiv beeinträchtigt (WILHELM *et al.*, 2019 A). Erkrankte Pflanzen fallen im Wachstum gegenüber der Konkurrenzvegetation zurück und leiden unter einer erhöhten Mortalität (NEGER, 1915; SOUTRENON, 1998; THOMAS *et al.*, 2002; MARÇAIS & BRÉDA, 2006; PAP *et al.*, 2012; MARÇAIS & DESPREZ-LOUSTAU, 2014).

Andererseits gibt es immer wieder Beobachtungen mehrjährig befallsfreier Pflanzen in den Verjüngungen (HAUCH & KØLPIN-RAVN, 1913; ROSLIN *et al.*, 2007; WILHELM *et al.*, 2019 B). Solche Beobachtungen könnten bei der Stieleiche auf einer genetisch basierten prädisponierenden Resistenz gegen den Mehltau beruhen (BARTHOLOMÉ *et al.*, 2020). Unklar ist jedoch, ob es sich dabei um zufällige Beobachtungen handelt oder ob sie Ausdruck einer vererbbaaren erhöhten Toleranz bzw. Resistenz der Pflanzen sind. Außerdem ist bisher nicht bekannt, auf welchen physiologischen, cytologischen oder molekularbiologischen Grundlagen eine erhöhte Widerstandskraft beruhen könnte.

Wegen der verwendeten Fachliteratur, auch über die im vorliegenden Abschlussbericht zitierte hinaus, vgl. Kap. III

I.1.2 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Verbundpartner haben für das Projekt mit verschiedenen internen und externen Partnern kooperiert. So konnte die FAWF für die Auswahl der Untersuchungsflächen auf den Fundus an waldbaulichen Versuchsflächen einer anderen Arbeitsgruppe im Hause zurückgreifen. Des Weiteren half die örtliche Kompetenz der Mitarbeiter*innen des Forstamts Johanniskreuz bei der Auswahl einer zusätzlichen Untersuchungsfläche weiter. Die waldbaulichen Demonstrationsflächen wurden mit Hilfe der örtlichen Kompetenz der Mitarbeiter*innen der Forstämter Boppard und Bad Dürkheim identifiziert. Für alle Standortsansprachen standen Informationen der Forsteinrichtungsabteilung der Zentralstelle der Forstverwaltung in Neustadt an der Weinstraße sowie der Arbeitsgruppe Standortkunde in der Forschungsgruppe 5.2 „Umweltmonitoring“ der FAWF zur Verfügung. Das Forstamt Boppard leistete außerdem wertvolle Unterstützung beim praktischen Zaunbau.

Die Kooperation mit der Abteilung Pflanzenphysiologie der RPTU stellte eine wichtige Unterstützung bei der Etablierung geeigneter Anzuchtbedingungen für die Eichensämlinge dar, um infekionsfähige Blätter zu erhalten. Eine weitere Zusammenarbeit erfolgte mit Dr. Birgit Kersten (Institut für Forstgenetik, Thünen-Institut, Hamburg), die das ebenfalls von der FNR geförderte Projekt Survivor-Oaks koordiniert und uns eine Datenbank mit cDNAs von Mehltau-infizierten Eichenblättern zur Verfügung stellte, aus der wir die Sequenzen für PR1, Actin und GAPD zur Durchführung von qPCR und Transkript-Analysen extrahieren konnten.

II. Ergebnisse

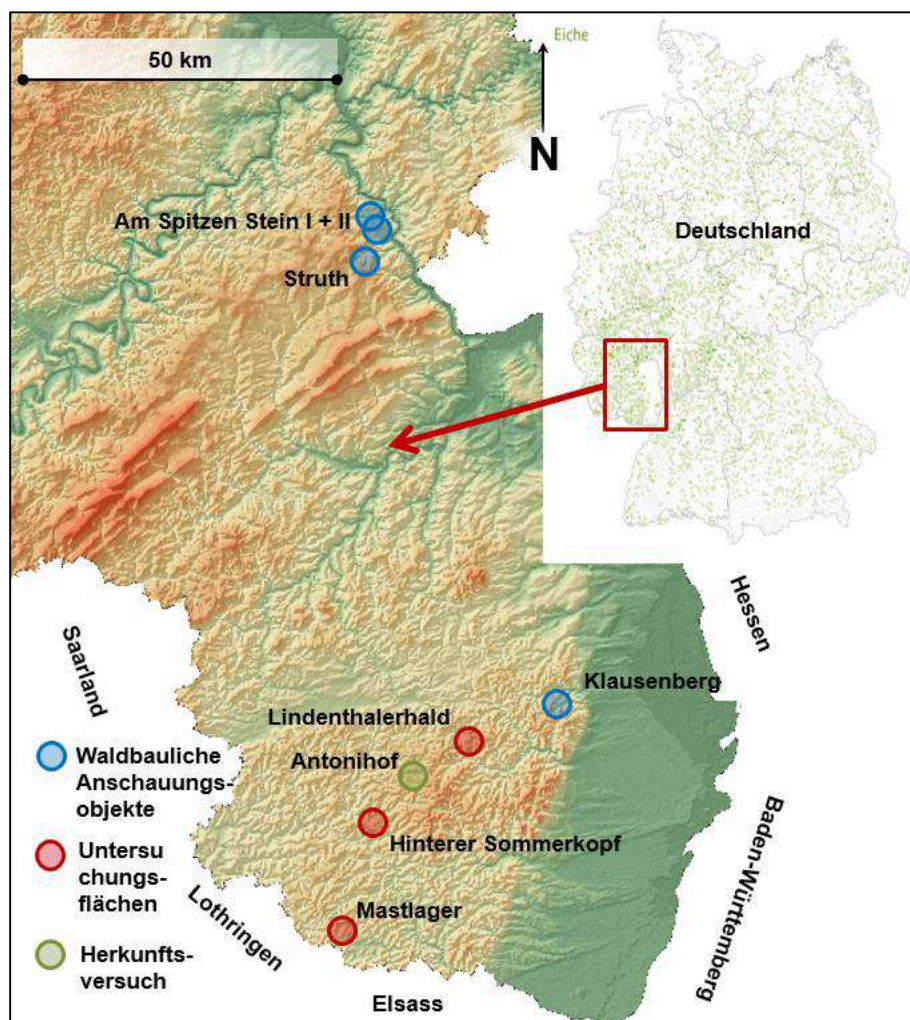
II.1 Erzielte Ergebnisse

II.1.1 Waldbau und Physiologie in kleinflächigen Eichen-Naturverjüngungen unter Berücksichtigung der Mehltauinfektion

II.1.1.1 Es gibt eher keine vollständig resistenten Individuen, aber weniger anfällige Herkünfte

In einem finnischen Stieleichenwald waren einzelne Verjüngungspflanzen nach drei Jahren noch dauerhaft frei von Mehltau (ROSLIN *et al.*, 2007). Auch in den Naturverjüngungen der mitteleuropäische Traubeneichenwälder scheint es einzelne hypervitale Pflanzen zu geben, auf denen der Mehltaupilz nicht Fuß fassen kann (WILHELM *et al.*, 2019 B). Ferner ist bekannt, dass Traubeneichen weniger anfällig für die Mehltauerkkrankung sind als die Stieleichen (DELATOUR, 1983). Vor diesem Hintergrund scheint denkbar, dass es einzelne Individuen oder Herkünfte gibt, die resistenter gegen Mehltaubefall sind.

Um diese Hypothese zu prüfen, wurden zu Beginn des MetaEiche-Projekts drei Traubeneichen-Althölzer mit Naturverjüngung ausgewählt und ein Traubeneichen-Herkunftsversuch am Genressourcenzentrum Antonihof bei Trippstadt in den Pfälzer Nordvogesen angelegt (Abb. 1, Tab. 1). Alle Untersuchungsbestände stockten im Wuchsgebiet 72 Pfälzerwald auf dem mittleren Buntsandstein. Sie befanden sich auf Plateaulage (Lindenthalerhald und Hinterer Sommerkopf) oder an einem steilen Osthang (Mastlager). Die Bestände wuchsen in der kollinenärmestufe, wiesen in der Regel eine schwach mittlere Trophie auf und ihr Wasserhaushalt war im frischen Bereich (Tab. 1).



Die Flächen waren geschlossene bis lückige Traubeneiche (TEi)-Buche (Bu)-Baumhölder mit einzelbaum- bis horstweisem Buchenunter- und Mittelstand sowie horst- bis kleinbestandsweise TEi-Bu-Naturverjüngung in der Etablierungs- bis Qualifizierungsphase (Abb. 2 A-C). Die Flächen maßen 20 bis 30 ha. Die Eichen waren 300 bis 350 Jahre alt. Auf der Lindenthalerhald und am Mastlager war die Verjüngung 2010 nach dem Lichtkegelverfahren (Großfemelhieb) und am Hinteren Sommerkopf im selben Jahr als Schirmhieb eingeleitet worden.

Abb. 1: Untersuchungsflächen und waldbauliche Anschauungsobjekte des MetaEiche-Projekts in Rheinland-Pfalz

Die ältesten Verjüngungskegel auf den Untersuchungsflächen sind in der Zwischenzeit fast 2 m hoch geworden und haben Sprossbasisdurchmesser von über 20 mm erreicht, ohne dass die Pflanzendichte signifikant abgenommen hätte. Offensichtlich verdämmen die Oberständler die Verjüngung derzeit noch nicht, auch wenn die Pflanzenhöhe merklich mit der Beleuchtung korreliert.

In allen Beständen wurden je acht Beobachtungsflächen für die Untersuchung der Eichen-Naturverjüngung angelegt (Abb. 3 A-C). Die Probekreise befinden sich in ein- bis dreijährigen Verjüngungskomplexen, weil die jüngsten Pflanzen am empfindlichsten für die Mehltauerkkrankung sind, und lassen sich jeweils einzelnen Mutterbäumen zuordnen. Im November 2021 haben Wildschweine einen Probekreis zur Erfassung der Naturverjüngung trotz Zaunschutz zerstört. Die Fläche wurde mit einem neuen Wildschutzzzaun versehen. In jedem

Probekreis wurden zu Projektbeginn je zehn Pflanzen augenscheinlich ohne bzw. mit Mehltaubefall dauerhaft markiert (Abb. 3 D). Jeweils im August wurden die Pflanzen auf ihre Mehltauerkrankung hin begutachtet. Alle okularen Einschätzungen wurden quantitativ molekulargenetisch bestätigt (vgl. Kap. II.1.3; Abb. 9; Tab. 4)

Tab. 1: Standorte der drei untersuchten Altbestände

Forstamt	Bestand	Wärme-stufe	Trophie	Wasserhaushalt	Boni-tät	Besto-ckungs-grad
Kaiserslautern	Staat XXXIV 11b Lindenthalerhald	kollin	mittel	ziemlich frisch – sehr frisch	2,0	0,5
Johanniskreuz	Staat LXXVI 3a ¹ Hinterer Sommerkopf	kollin	mittel	mäßig frisch – ziemlich frisch	2,5	0,6
Wasgau	Staat XVII 5a ² Mastlager	kollin	gut	ziemlich frisch - frisch	2,0	0,5

Quelle: Forsteinrichtungsangaben und eigene Untersuchungen.

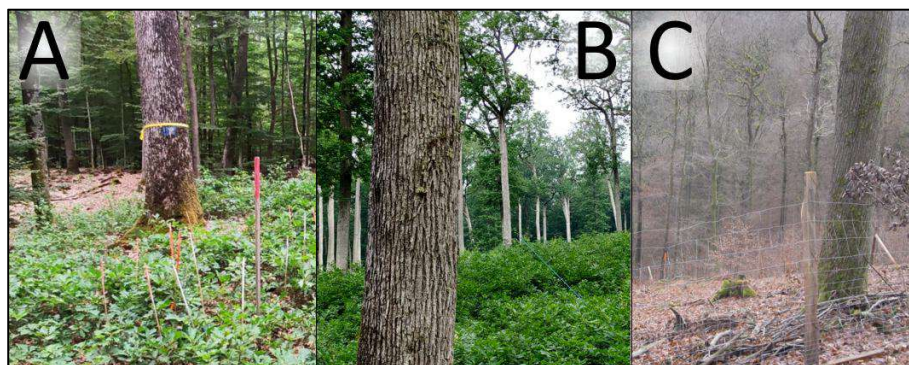


Abb. 2: Bestandsbilder der Abteilungen Lindenthalerhald (A), Hinterer Sommerkopf (B) und Mastlager (C)

Im zweiten Projektjahr waren noch durchschnittlich ca. zwei Drittel der eingangs als gesund eingeschätzten Pflanzen in den drei Naturverjüngungen

gen nach wie vor scheinbar frei von Mehltau (Abb. 4 A). Auch im Jahr darauf haben sich von wenigen Neuerkrankungen abgesehen dieselben Bäume als weiterhin gesund erwiesen. Allerdings sind im letzten Projektjahr sehr viele Pflanzen in den Naturverjüngungen erstmals am Mehltau erkrankt, so dass nur wenige Bäume als weiterhin gesund gelten konnten (Abb. 4 A). Vor diesem Hintergrund erscheint die Prognose, auch weiterhin gesunde Pflanzen in den Naturverjüngungen zu finden, als wenig plausibel. Vielmehr deuten die Ergebnisse an, dass es kaum vollständig resistente Traubeneichen-Jungpflanzen in den Verjüngungen geben dürfte. Dies stimmt mit einer Beobachtung an einem finnischen Stieleichenwald überein, in dem nach drei Jahren weniger als 5 % künstlich eingebrachter Heister dauerhaft infektiionsfrei geblieben sind (ROSLIN *et al.*, 2007). Des Weiteren ergab die Untersuchung der Nachkommenschaft eine Eichen-Elternpaares keine Hinweise auf konsistent immune Genotypen (Klone; BARTHOLOMÉ *et al.*, 2020). Vor diesem Hintergrund erscheint die Hoffnung, in den Naturverjüngungen auf einzelne dauerhaft Mehltau resistente Individuen zu treffen, wenig aussichtsreich (WILHELM *et al.*, 2019 B).

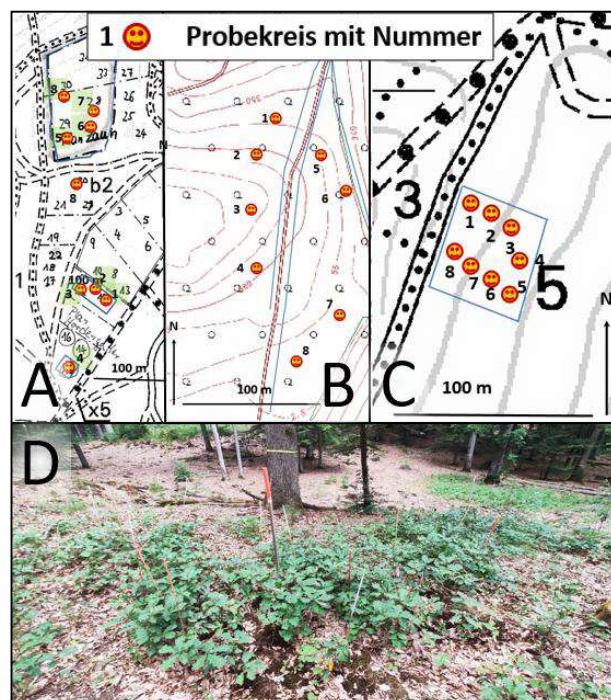


Abb. 3: Anlage der Probekreise (Lindentalerhald; A, Hinterer Sommerkopf, B und Mastlager, C) sowie exemplarisch der Probekreis 3 an der Linenthalerhald (D)

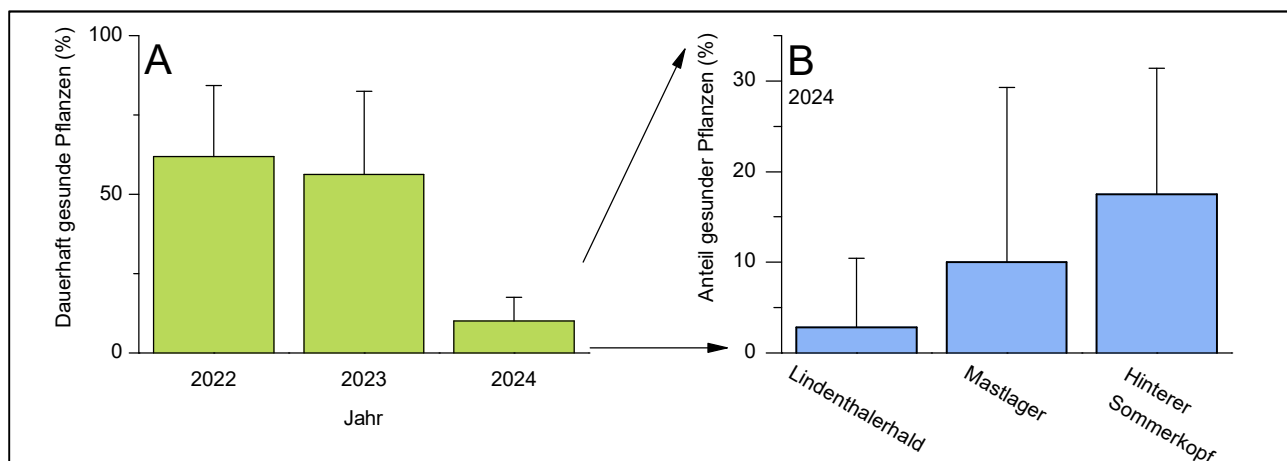


Abb. 4: Gesunde Traubeneichen ohne Mehltauinfektionen seit 2021 in den drei Untersuchungsflächen insgesamt (A) und Unterschiede im Anteil dauerhaft gesunder Pflanzen zwischen den Untersuchungsflächen im Jahr 2024 (B)

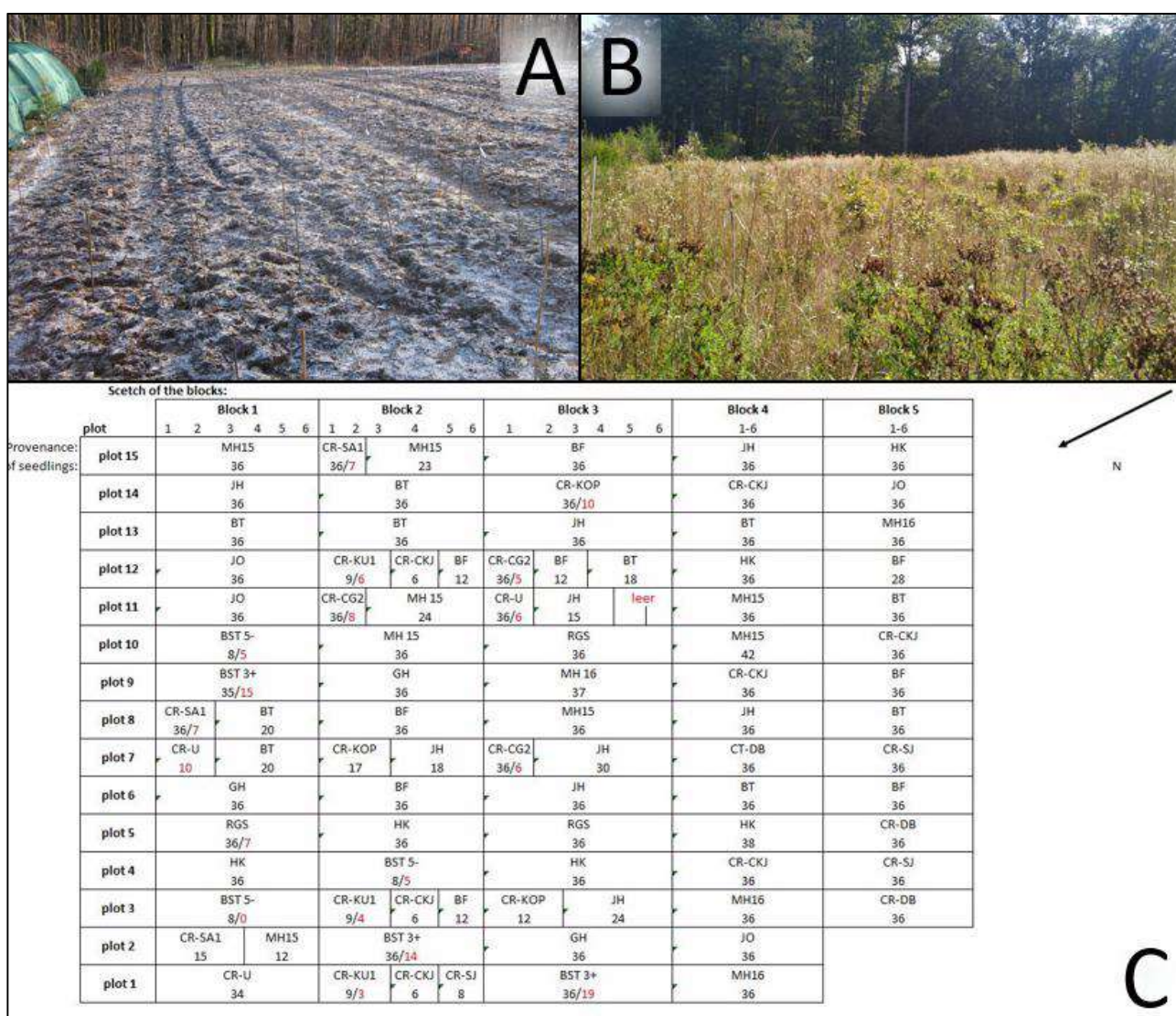


Abb. 5: Traubeneichenherkunftsversuch am Genressourcenzentrum Antonihof: Anlage im Winter 2018 (A), Zustand im Sommer 2024 (B) und Pflanzplan

Auf der anderen Seite unterschieden sich die drei Naturverjüngungen sehr deutlich in ihrem Anteil dauerhaft gesund erscheinender Pflanzen. Die Werte schwankten auch vergangenes Jahr noch um etwa den Faktor 6 zwischen 2,8 % (Lindentalerhald) und 17,5 % (Hinterer Sommerkopf; Abb. 4 B). Inwieweit standörtliche, oder waldbauliche Unterschiede zwischen den drei Beständen die Erkrankung beeinflusst haben, lässt sich derzeit

nicht entscheiden. Es könnte aber auch ein Hinweis darauf sein, dass nicht alle lokalen Eichenpopulationen gleich anfällig für die Blattkrankheit sind. Bestätigt wurde diese Vermutung im Eichenherkunftsversuch am Genressourcenzentrum Antonihof.

Der Herkunftsversuch war bereits 2018 mit neunzehn Traubeneichenherkünften, darunter elf aus Rheinland-Pfalz und acht aus Kroatien, angelegt worden (Abb. 5 A-C). Er wurde einmalig 2020 und ab 2021 regulär im Rahmen des MetaEiche-Projekts jeweils Ende August oder Anfang September auf Mehltaubefall hin bonitiert. Gleichzeitig wurde der Anteil gesunder erscheinender Pflanzen erhoben. Zu diesem Zweck wurde jede Pflanze einzeln auf die Erkrankung hin begutachtet. Insgesamt gingen 2024 nahezu 1.500 Pflanzen in die Untersuchungen ein.

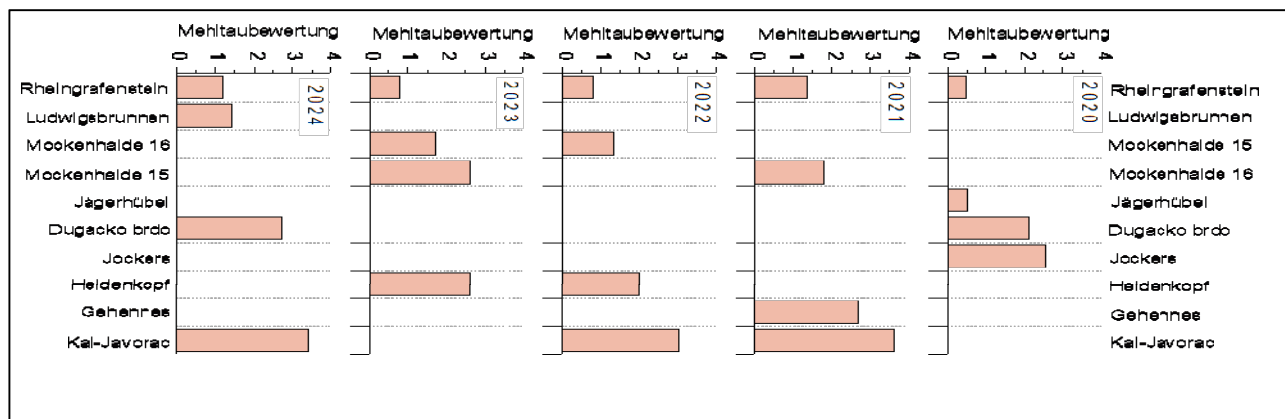


Abb. 6: Ergebnisse der Mehltaubonitierung 2020 bis 2024

Die Pflanzen des Herkunftsversuchs wurden einzelbaumweise auf Mehltau hin bonitiert. Die Mehltaubonitierung reicht von der Einschätzung 0 = ohne Befall bis 4 = flächiger Befall mit geschädigten bis abgestorbenen Johannistrieben. In die Darstellung gingen nur die Herkünfte ein, die auch 2024 noch mit mindestens 30 Individuen im Versuch vertreten waren. In die Darstellung gingen in jedem Jahr nur die jeweils zwei gesündesten und am schwersten erkrankten Herkünfte ein.

Es gab in jedem Jahr wechselnde Herkünfte, die mit Mehltaubonitäten von bis zu 3,6 stark unter Mehltau gelitten haben (Abb. 6). Auf der anderen Seite gab es in jedem Jahr auch solche, die deutlich gesünder waren. Besonders auffällig war, dass die Herkunft Rheingrafenstein aus der Nähe von Bad Kreuznach in allen fünf Untersuchungsjahren den günstigsten Gesundheitszustand aufwies (Abb. 6). Mit Bonitäten zwischen 0,5 und 1,4 waren die Pflanzen aus diesem Bestand Jahr für Jahr allenfalls leicht an Mehltau erkrankt. Im Gegensatz dazu waren in einem französischen Pflanzgartenexperiment alle Eichenherkünfte gleich stark an Mehltau erkrankt (BARRÉS *et al.*, 2023). Offensichtlich ist die Herkunft Rheingrafenstein ein Beispiel für eine Eichenpopulation, die besser als üblich mit dem Mehltaupilz umgehen kann. Vor diesem Hintergrund dürfte es aussichtsreich sein, in den deutschen Ländern nach weiteren solchen Eichenherkünften zu suchen, die mit diesem Krankheitserreger toleranter oder resistenter umgehen können. Die molekularen Grundlagen einer solchen Überlegenheit sind jedoch noch nicht ausgeleuchtet.

Tab. 2: Mittlere Mehltaubonitäten kroatischer und rheinland-pfälzischer Traubeneichenherkünfte

Parameter	Herkünfte		p
	kroatisch Mittel (± Stabw*)	rheinland-pfälzisch Mittel (± Stabw)	
Mehltaubonität	2,93 (0,41)	2,01 (0,41)	0,006
Anteil gesunder Pflanzen (%)	2,9 (2,8)	19,0 (13,0)	0,062
Anzahl der Herkünfte (N)	3	10	

*, Stabw, Standardabweichung. In die Untersuchung gingen nur solche Herkünfte ein, die mit mehr als 30 Individuen im Herkunftsversuch vertreten waren. Diese Vorgabe erfüllten drei kroatische und 10 rheinland-pfälzische Herkünfte. Insgesamt wurden 281 kroatische und 1.111 rheinland-pfälzische Pflanzen berücksichtigt.

Die kroatischen Herkünfte waren im Sommer des abschließenden Projektjahres 2024 mit einer Mehltaubonität von durchschnittlich 2,93 signifikant stärker vom Mehltau in Mitleidenschaft gezogen worden als die rheinland-pfälzischen mit einer Bonität von 2,01 (Tab. 2). Möglicherweise sind die Traubeneichen aus dem südosteuropäischen Land anfälliger für die Blattkrankheit als diejenigen aus der mitteleuropäischen Region. Ob dies mit

der Rückwanderungsgeschichte der Eichen zusammenhängt, lässt sich derzeit nicht entscheiden. Bekannt ist, dass die Traubeneichen der linksrheinischen Regionen außer der Rheinebene, in der es kaum Traubeneichen gibt, aus Rückzugsgebieten auf der iberischen Halbinsel stammen, während die kroatischen Herkünfte auf das südosteuropäische Rückzugsgebiet auf dem Balkan zurückgehen (NEOPHYTOU & MICHIELS, 2013). Ob dies einen Einfluss auf die Mehltauerkkrankung hat, ließe sich in zusätzlichen Pflanzgartenexperimenten prüfen. Derzeit jedoch sollte mit dem Anbau südosteuropäischer Traubeneichen in Mitteleuropa zurückhaltend verfahren werden.

Schlussfolgerung: Es scheint eher unwahrscheinlich, dass es vollständig resistente Individuen unter den mitteleuropäischen Eichen gibt. Auf der anderen Seite unterscheiden sich die verschiedenen Eichenherkünfte deutlich in ihrer Mehltauanfälligkeit. Insbesondere dürfte es solche geben, die nur wenig unter der Erkrankung leiden.

II.1.1.2 Die Mehltauerkkrankung betrifft vor allem vorwüchsige Pflanzen und verursacht mehr Wintermortalität

Zu den Symptomen der Mehltauerkkrankung gehört anscheinend, dass die Jungpflanzen im Höhenzuwachs zurückbleiben, im Herbst nicht die volle Winterhärte erreichen und die Johannistriebe vermehrt über Winter zurückfrieren oder die Pflanzen sogar ganz absterben (HARMER, 1992; SCHRÖDER *et al.*, 2014; BARRÉS *et al.*, 2024). Dies scheint umso fataler, als die Johannistriebe den jungen Eichen eigentlich ihr überlegenes Jugendwachstum sichern sollten (BARNOLA *et al.*, 1990; COLLET *et al.*, 1997). Vor diesem Hintergrund war es ein Ziel des MetaEiche-Projekts, zu beurteilen, ob der Mehltau das Höhenwachstum der Pflanzen beeinträchtigt, die wuchskräftigsten Individuen mit vielen unterjährigen Trieben besonders bremst und möglicherweise zu mehr Wintermortalität führt.

Um die Frage nach dem Höhenzuwachs zu beantworten, wurden die Pflanzenhöhen der drei Naturverjüngungen (vgl. Kap. II.1.1) jeweils im Oktober 2021 und 2022 nach dem Ende der Vegetationsperiode gemessen. Die Höhen der gesunden Eichen lagen zu Untersuchungsbeginn bei durchschnittlich 28,2 und der kranken bei 31,2 cm (Tab. 3). Sie unterschieden sich nicht signifikant voneinander, so dass Unterschiede im Höhenzuwachs nicht auf unterschiedliche Ausgangszustände zurückgeführt werden können. Es gab keinerlei signifikante Differenzen im Zuwachs zwischen den gesunden und kranken Pflanzen, weder auf den einzelnen Untersuchungsflächen, noch insgesamt. Über alle Flächen hin unterschied sich der Höhenzuwachs der gesunden Eichen mit $6,3 \text{ cm} \pm 2,3 \text{ cm}$ nur undeutlich von den kranken mit $5,2 \text{ cm} \pm 3,5 \text{ cm}$ (Tab. 3). Damit übereinstimmend beeinflusste der Mehltau auch das Höhenwachstum von Stieleichenverjüngungen in Schweden nicht signifikant (VAN DIJK *et al.*, 2022). Offensichtlich beeinträchtigt die Pilzinfektion entgegen den bisherigen Annahmen den Höhenzuwachs der Eichen nicht merklich. Man kann nicht davon ausgehen, dass der Mehltau die Pflanzen in den Naturverjüngungen gegenüber der Konkurrenzvegetation signifikant zurückwirft. Diese Erkenntnis spricht dafür, die kleinflächigen Verjüngungsverfahren der Eichen nicht wegen des Mehltaupilzes waldbaulich auszuschließen.

Tab. 3: Ausgangshöhen und Höhenzuwachs der Pflanzen in den drei untersuchten Naturverjüngungen

Standort	Pflanzenhöhen 2021* (cm)		Höhenzuwachs 2022 (cm / a)		Stichprobenzahl (N)
	Mehltau ohne	Mehltau mit	Mehltau ohne	Mehltau mit	
Lindenthalerhald	48,3 (26,9)	54,7 (28,4)	8,10 (6,73)	8,13 (17,03)	7
Hinterer Sommerkopf	24,2 (16,4)	25,6 (14,5)	7,20 (3,53)	6,06 (6,19)	8
Mastlager	12,1 (1,8)	10,3 (2,2)	3,72 (2,95)	1,33 (1,20)	8
Mittel	28,2 (18,4)	31,2 (21,3)	6,34 (2,31)	5,17 (3,48)	3

*, Werte in Klammern, Standardabweichungen. In keinem Fall gab es einen signifikanten Unterschied zwischen den gesunden und kranken Pflanzen. Deshalb wurde auf die Anbringung von Indices zur Kennzeichnung solcher Differenzen verzichtet.

Im Pflanzgartenexperiment am Antonihof (vgl. Kap. II.1.1) wurden im Jahr 2023 alle Pflanzenhöhen und das Auftreten proleptischer Triebe zusammen mit der Mehltaubonitur erhoben. Während in den Naturverjüngungsuntersuchungen die Probekreise so eingerichtet worden waren, dass die Pflanzen homogene Größen aufwiesen, war im Pflanzgarten die Frage, ob sich der Mehltau auf unterschiedlich große Pflanzen differenziert auswirkt. Die Bäumchen des Herkunftsversuchs maßen je nach Herkunft im Mittel zwischen 16,5 cm und 65,3 cm (Abb. 7 A). Sie wiesen signifikant umso mehr Mehltausymptome auf, je größer sie waren, so dass die kleinste Herkunft (Rheingrafenstein) mit einer Mehltaubonitur von unter 1 kaum Krankheitssymptome zeigte, während die schnell wachsenden Herkünfte mit Bonituren bis zu über 2,5 mindestens mittelschwer erkrankt waren (Abb. 7 A). Über 80 % der Streuung der Mehltaubonitur ließ sich über die Pflanzengröße erklären (Abb. 7 A). Auf der anderen Seite sank der Anteil gesunder Pflanzen dramatisch, je schneller sie gewachsen waren (Abb. 7 B).

Offensichtlich betrifft die Mehltauerkkrankung vor allem schnell wachsende Bäume. Im Gegensatz dazu gab es in einem französischen Pflanzgartenexperiment jedoch kein Zusammenhang zwischen den Pflanzenhöhen und dem Mehлтаubefall (BARRÉS *et al.*, 2024). Hier könnten weiterführende Untersuchungen für mehr Klarheit sorgen.

Die Eichen wachsen dann besonders schnell, wenn sie in der Lage sind, viele unterjährige Triebe zu schieben (BARNOLA *et al.*, 1990; COLLET *et al.*, 1997). Bekannt ist ferner, dass der Mehltaupilz besonders die unterjährigen Triebe befällt (PAP *et al.*, 2012; DESPREZ-LOUSTAU *et al.*, 2014). Dies legt die Annahme nahe, dass besonders solche Herkünfte vom Mehltau betroffen sind, die zu reichlicher Johannistriebbildung neigen. Die Abundanz proleptischer Triebe lag im Herkunftsversuch 2023 je nach Provenienz zwischen 18 % und 47 %, im Mittel aller untersuchten Provenienzen bei 32 %. Entgegen der Annahme gab es jedoch keinen Zusammenhang zwischen dem Auftreten unterjähriger Triebe und der Mehltausymptomatik. Damit übereinstimmend lag

auch die besonders wenig erkrankte Herkunft „Rheingrafenstein“ (vgl. Kap. II.1.1) mit nahezu 30 % Johannistrieben nahe dem Mittelwert von 32 % (s. o.), obwohl sie die am wenigsten wüchsige war. Diese Ergebnisse machen deutlich, dass es für die Eichen im Umgang mit der Mehltauerkkrankung vorteilhaft ist, langsam zu wachsen. Dies lässt sich aber nicht darauf reduzieren, dass solche Bäume weniger anfällige Triebbildung aufweisen. Im Gegensatz zu den vorliegenden Resultaten wurden in der Vergangenheit immer wieder vorwüchsige Exemplare beobachtet, die scheinbar frei von Mehltau waren (WILHELM *et al.*, 2019 A). Solche Beobachtungen dürften eher zufälliger Natur sein, so dass nicht darauf geschlossen werden kann, in den Naturverjüngungen auf hypervitale Individuen mit überlegener Mehltaresistenz zu treffen. Vielmehr sollte der Waldbau darauf Rücksicht nehmen, dass besonders die langsamwüchsigen Glieder in den Verjüngungen toleranter mit der Erkrankung umgehen.

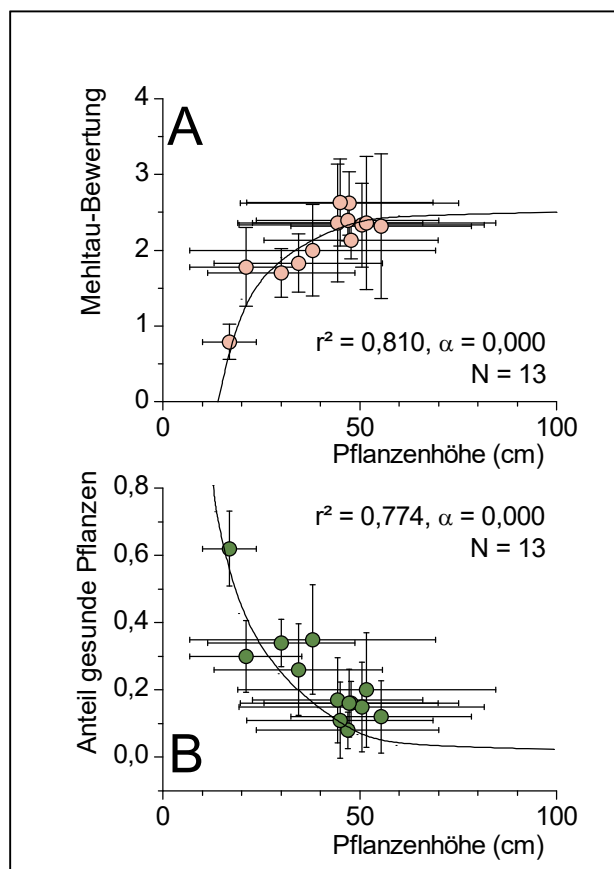


Abb. 7: Mehltaubonitur (A) und Anteile gesunder Pflanzen (B) unterschiedlich großer Eichenpflanzen

Die Regressionsanalyse wurde auf der Ebene der Herkünfte durchgeführt. Dementsprechend kommt den Standardabweichungen der Herkünfte in der Abbildung lediglich informativische Bedeutung zu: Innerhalb der Provenienzen streuten insbesondere die Pflanzenhöhen stark. Insgesamt gingen die Erhebungen an 1522 jungen Eichen ein.

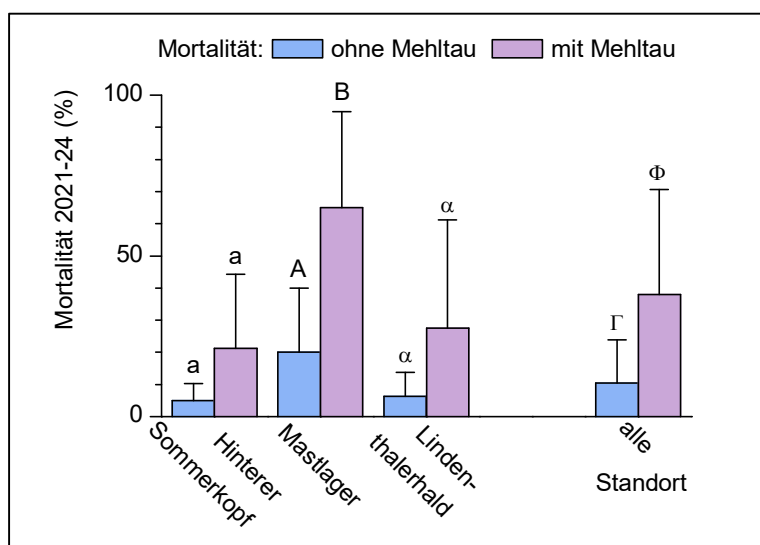


Abb. 8: Mortalität der gesunden und erkrankten Eichen in den Naturverjüngungen am Hinteren Sommerkopf, auf dem Mastlager und an der Lindenthalerhald

Die Statistik wurde auf der Ebene der Probenkreise berechnet. Daher lag der Stichprobenumfang auf den einzelnen Flächen bei $N = 8$. Insgesamt wurde die Mortalität in 24 Probenkreisen erhoben. Weil sich die Stichprobe signifikant von einer Normalverteilung unterschied, wurden alle Auswertungen mittels Man-Whitney-U-Test berechnet. Die Mittelwerte (Balkenhöhen) und Standardabweichungen (Antennen auf den Balken) haben nur informativischen Wert.

Im Zusammenhang mit dem Auftreten der Mehltauerkkrankung wurden immer wieder erhöhte Mortalitätsraten in den Eichenverjüngungen beschrieben (THOMAS *et al.*, 2002; MARÇAIS & BRÉDA, 2006; BARRÉS *et al.*, 2024). Um diese Beobachtungen zu prüfen, wurden die Mortalitätsraten der dauerhaft markierten Pflanzen in

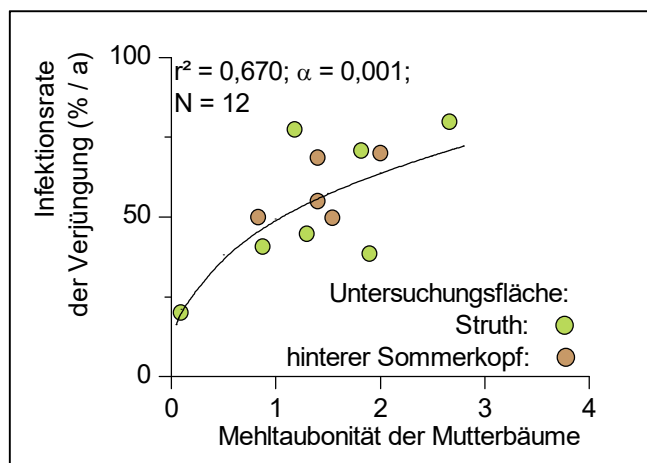
den drei untersuchten Naturverjüngungen über den gesamten Projektzeitraum hin erhoben. Die Mortalitätsraten lagen ohne Mehltau je nach Fläche zwischen fünf und 20 % (Abb. 8). Die Sterblichkeitsrate mit Mehltau war mit 21 bis 65 % sichtbar höher (Abb. 8). Auf den einzelnen Flächen unterschieden sich die Mortalitäten ohne und mit Mehltau jedoch nicht immer signifikant voneinander, weil es in dieser Hinsicht erhebliche Schwankungen von Probekreis zu Probekreis gab. Insgesamt jedoch hat die Mehltauerkrankung zu signifikant erhöhter Sterblichkeit geführt (Abb. 8). Offensichtlich kann der Pilz übereinstimmend mit früheren Berichten je nach Population die Lebensfähigkeit ganzer Verjüngungen auf die Dauer in Frage stellen (REIF & GÄRTNER, 2007). Deshalb sollte der Schwellenwert 2-8,5 Pflanzen / m² Keimlingen als Kennzeichen einer gelungenen Verjüngung auf ca. 20 Pflanzen gutachtlich angehoben werden, wenn mit erheblichem Mehltaubefall zu rechnen ist (WILHELM, 2022; TISCHER *et al.*, 2023). Ein Zusammenhang mit dem Waldbauverfahren deutet sich aber nicht an, sind doch sowohl die beiden Flächen mit Lichtkegelverjüngung als auch die Fläche mit Schirmhieb gleichermaßen betroffen (Abb. 8).

Fazit:

- 1) Der Mehltau hat in dem vorliegenden Projekt das Höhenwachstum der Pflanzen nicht signifikant beeinträchtigt.
- 2) Er kann aber in den Verjüngungen eine erhebliche Mortalität verursachen. Die Mortalität hängt nicht vom Waldbauverfahren ab, unterscheidet sich aber von Fläche zu Fläche.
- 3) Umso wichtiger scheint es, klarzustellen, ob es unterschiedlich resistente bzw. tolerante Populationen bzw. in den Verjüngungen resistenter oder toleranter Individuen gibt, und woran man sie erkennen kann.
- 4) So sind besonders die vorwüchsigen Pflanzen vom Mehltau betroffen, während die kleinsten eher verschont bleiben. Das hängt nicht von den Johannistrieben ab. Das bedeutet ein Umdenken in der Etablierungsphase.
- 5) Darüber hinaus gilt es, weitere Marker für Resistenz und Toleranz der jungen Eichen auszumachen.

II.1.1.3 Mehltau im Altbestand und in der Verjüngung korrelieren möglicherweise

Die Unterschiede von Naturverjüngung zu Naturverjüngung und vor allem die dauerhaft weniger erkrankte Herkunft im Pflanzgartenversuch deuteten an, dass es möglicherweise in der Mehltaresistenz eine erbliche Komponente gibt. Um diese Annahme weiter zu prüfen, wurden die Kronendächer der Mutterbäume am hinteren Sommerkopf und auf der Demonstrationsfläche Struth mit einer Drohne im Spätsommer 2023 orientierend fotografisch aufgenommen und mit dem Gesundheitszustand der Naturverjüngung darunter verglichen. Die Untersuchung setzte voraus, dass die Alteichen die Mütter der jungen Pflanzen darunter sind. Die Hypothese lautete, dass sich die Alteichen und die Naturverjüngung darunter in ihrer Mehltauerkrankung entsprechen.



Die Bilder der Alteichen wurden visuell entsprechend der Boniturvorschrift vom Antonihof ausgewertet (vgl. Kap. II.1.1; Abb. 6). Die Resistenz der Verjüngungen gegen den Mehltau wurde anhand der Rate an Neuerkrankungen 2023 (Hinterer Sommerkopf) bzw. 2024 (Struth) abgeschätzt. Die Erkrankungsrate wurde als Differenz aus der Anzahl aller Bäume und der gesunden abgeleitet (vgl. Abb. 4).

Abb. 9: Infektionsraten der Naturverjüngung bei unterschiedlichen Mehltaubonitäten der Mutterbäume

Im Mittel lag der Befall der Alteichen bei einer Mehltaubonität von etwa 1,4. Offensichtlich waren die Mutterbäume in den Altbeständen etwas weniger erkrankt als die jungen Eichen im Pflanzgarten (vgl. Tab. 2). Die Infektionsraten der Verjüngungspflanzen lagen zwischen 50 und 60 % im Jahr. In den beiden untersuchten Beständen ergab sich ein deutlicher Zusammenhang zwischen der Mehltaubonität der Mutterbäume und der Infektionsrate der Naturverjüngung ($r^2 = 0,67$; Abb. 9). Die Verjüngung unter solchen Alteichen, die mehr unter der Mehltauerkrankung zu leiden haben, befinden sich ebenfalls in einem schlechteren Gesundheitszustand. Ein erblicher Zusammenhang der Mehltaresistenz zwischen Alteichen und Nachkommenschaft kann derzeit nicht ausgeschlossen werden. Damit übereinstimmend zeigte sich in einer französischen Untersuchung auch zwischen den Nachkommen eines Elternpaares und der Mehltauinfektion eine gewisse Erblichkeit. Die wurde im Falle des Infektionswiderstandes eher vom Vater vererbt (BARTHOLOMÉ *et al.*, 2020).

Allerdings können die Ergebnisse des MetaEiche-Projekts bisher nur als Hinweis gewertet werden, können doch auch gemeinsame Faktoren wie Kleinstandort oder zufälliges Auftreten von Inokulum nicht ausgeschlossen werden. Eine systematische Untersuchung des Sachverhalts ist wegen der Kürzung der Arbeitskapazität im wissenschaftlichen Bereich und des darauffolgenden Verlusts an Arbeitskapazität im technischen Bereich nicht mehr zustande gekommen.

Fazit:

Ein erblicher Zusammenhang zwischen der Mehltaresistenz der Mutterbäume und der Nachkommenschaft kann derzeit nicht ausgeschlossen werden.

II.1.1.4 Die Mehltauinfektion verursacht keinen oxidativen Stress

Die Toleranz der Eichen gegen den Mehltau könnte vom Stress abhängen, den die Pflanzen durch die Pilzinfektion erleiden. Stress teilt sich den Pflanzen in der Regel als oxidative Belastung und ggfs. oxidative Schäden mit (RENNENBERG *et al.*, 2006). Um zu klären, ob der Mehltaupilz für die Eichen erhöhten oxidativen Stress bedeutet, wurden oxidative Belastung (H_2O_2), Antioxidantien (Ascorbat, Asc), ein regenerierendes Enzym (Glutathionreductase, GR) und ein Marker für Biomembranschäden (Malondialdehyd, MDA) in den Blättern junger Eichen bestimmt. Die Wasserstoffperoxidbelastung ohne und mit Mehltau wurde 2022 und 2023 in Klimakammerexperimenten sowie in den Naturverjüngungen (s. o.) in den Jahren 2021-23 gemessen.

Die Klimakammerexperimente wurden in zwei baugleichen Fititron FGC 120 Klimakammern durchgeführt. Die Anzuchtbedingungen waren den sommerlichen Bedingungen im Freiland angenähert (Tag/Nacht: 16 h / 8 h, 21 °C / 16 °C, RF 55 % / 75 %, 500 ppmv CO_2 , 500 μ mol PAR / s * m² auf der Ebene der obersten Blätter). Die Pflanzen wurden in 16 cm tiefe Trays ausgesät, um ein ungestörtes Wurzelwachstum zu gewährleisten. Das Pflanzsubstrat war ein Sand-Torfgemisch (5:1, v:v) mit 10 % (v) Eichenhumus aus einem benachbarten Traubeneichenaltholz sowie 4,5 g / l Nutricote Langzeitdünger. Die Pflanzen wurden zweimal wöchentlich bis zur Feldkapazität gewässert. Sie wuchsen entweder ohne Mehltaupilz oder in Gegenwart infizierter Pflanzen. Die Blätter wurden geerntet, wenn sie augenscheinlich voll ausdifferenziert waren.

Der Mehltaubefall wurde in allen Proben quantitativ molekulargenetisch anhand der ct-Verhältnisse eines Mehltaugens (ITS_{Mehltau}) und zweier housekeeping-Gene der Eichen (Actin und GAPDH) charakterisiert (vgl. auch Kap. II.1.2.6). In den Klimakammern wiesen vollständig gesunde Pflanzen ct-Verhältnisse von ca. 0,7 auf, während stark erkrankte Eichen ct-Verhältnisse von bis zu 1,25 zeigten (Abb. 10). In allen Stichproben unterschieden sich die erkrankten Eichen signifikant von den gesund erscheinenden Individuen (Abb. 10; Tab. 4). Offensichtlich ist es gelungen, eindeutig zwischen erkrankten und gesunden Individuen zu differenzieren.

Allerdings gab es in den Naturverjüngungen mit ct-Verhältnissen von ca. 0,9 auch unter den gesund erscheinenden Individuen wohl keine, die vollständig frei vom Mehltaupilz waren (Abb. 10).

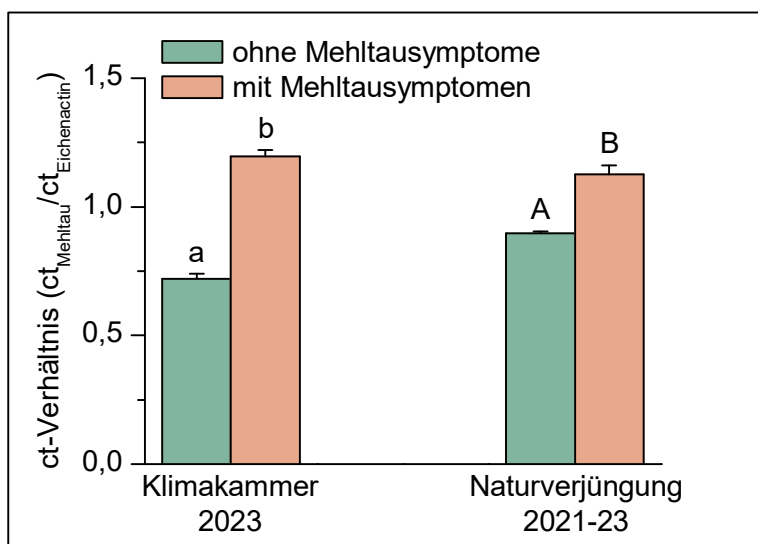


Abb. 10: ct-Verhältnisse von Mehltau-zu Eichen-DNA

Die DNA wurde aus den Eichenblättern mit einem E.Z.N.A. Plant DNA Kit (BIO-TEK, Thermo Fisher Scientific, Schwerte, D) extrahiert und mit einem QuantStudio 3 (Thermo Fisher Scientific, Darmstadt, D) amplifiziert. Stichprobenumfang in den Klimakammern: 4 (Mischproben aus drei bis sechs Pflanzen); Stichprobenumfang in den Naturverjüngungen: 48. Unterschiedliche Indices kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Blattproben gesund erscheinender und erkrankter Eichen.

In den Eichenblättern der Klimakammerpflanzen ließen sich ohne Unterschied zwischen gesunden und kranken Pflanzen durchschnittlich knapp 800 nmol H_2O_2 / g TS nachweisen. Die Gehalte in den Naturverjüngungen lagen je nach Untersuchungsjahr um den Faktor zwei bis zehn höher. Dort schienen die Pflanzen mit Mehltau etwas mehr Wasserstoffperoxid in ihren Blättern zu haben als die gesunden Pflanzen (Tab. 5). Allerdings waren diese Unterschiede wegen der großen Streuung der Messwerte signifikant. Offensichtlich gibt es in den Blättern der jungen Eichen mit Mehltau keine signifikant erhöhte oxidative Belastung und allenfalls ein schwaches Signal für einen oxidativen Ausbruch oder verstärkte Lignifizierung als Antwort auf die Pilzinfektion (HOGENHOUT *et al.*, 2009; EDWARD & AYRES, 1981; GRZEBYTA *et al.*, 2005). Dies unterstreicht die Beobachtung, dass

es bei den Eichen wohl eher keine vertikale, mit deutlicher Abwehr verbundener Resistenz gegen den Mehltaupilz gibt (vgl. Kap. II.1.1).

Asc wurde nur in den Naturverjüngungen gemessen. In den Blättern junger Eichen waren je nach Jahr zwischen ca. 11 (2022 und 2023) und 28 $\mu\text{mol Asc} / \text{g TS}$ (2021; Abb. 10). Der Grund für die Schwankungen von Jahr zu Jahr dürfte die Witterung sein, schwinden die Gehalte an diesem Antioxidans doch signifikant bei Trockenheit (ARAB *et al.*, 2022). Auffällig ist jedoch, dass die Pflanzen mit Mehltau tendenziell (2021) oder signifikant (2022 und 2023) an Asc verarmt waren (Abb. 11). Auch in einem polnischen Gewächshausexperiment waren die Eichenblätter im August signifikant an Asc verarmt, sofern sie nicht zu stark vom Mehltau in Mitleidenschaft gezogen waren (SKWAREK-FADECKA *et al.*, 2024). Diese Beobachtung lässt sich damit in Verbindung bringen, dass die Mehltauerkrankung die Photosynthese schwächt (BRÜGGEMANN & SCHNITZLER, 2001; WATANABE *et al.*, 2014). Weniger Photosynthese bedeutet auch weniger oxidative Belastung und das antioxidative System verliert an Kapazität (RENNENBERG *et al.*, 2006). Auf der anderen Seite besteht für solche Pflanzen aber die Gefahr, dass die Empfindlichkeit für Trockenstress steigt.

Tab. 4: ct-Verhältnisse zur Quantifizierung der Mehltauinfektionen in den Naturverjüngungen 2021-23 sowie in den Klimakammern

Proben	Jahr	Mehltau	ct*	Stichprobe (N)
Naturverjüngung	2021	ohne	1,02 ^a (0,02)	6
		mit	1,19 ^b (0,04)	5
	2022	ohne	0,96 ^A (0,04)	10
		mit	1,09 ^B (0,03)	9
	2023	ohne	0,87 ^a (0,01)	10
		mit	1,11 ^B (0,06)	8
Klimakammer	2023	ohne	0,72 ^r (0,02)	4
		mit	1,20 ^A (0,02)	4

*, Werte in Klammer, Standardabweichungen. Unterschiedliche Indices kennzeichnen jeweils signifikante Unterschiede zwischen den Blattproben gesund erscheinender und erkrankter Eichen. Aus den Klimakammern wurden Mischproben von drei bis sechs Sämlingen gewonnen.

Tab. 5: Wasserstoffperoxid in den Blättern junger Traubeneichen ohne und mit Mehltau aus Klimakammeranzucht bzw. aus den Naturverjüngungen in den Jahren 2021-23

Proben	Jahr	H ₂ O ₂ ⁺ ($\mu\text{mol} / \text{g TS}$)		Stichprobe (N)
		ohne Mehltau	mit Mehltau	
Klimakammer	2023	0,83 (0,37)	0,74 (0,35)	15
Naturverjüngungen	2021	2,27 (0,91)	2,45 (1,01)	48
	2022	1,55 (0,61)	1,99 (0,89)	38
	2023	7,70 (2,09)	8,42 (3,11)	28

*, Werte in Klammer, Standardabweichungen. In keinem Fall gab es signifikante Unterschiede zwischen den Blattproben von Pflanzen ohne bzw. mit Mehltau. Deshalb wurde auf die Anbringung von Indices verzichtet. Die Wasserstoffperoxidgehalte wurden mit der Xylenorange-Methode photometrisch bestimmt (JIANG *et al.*, 1990)

Die GR wurde 2021 einmal orientierend in den Naturverjüngungen untersucht. Die Aktivitäten dieses Enzyms lagen auf den drei Flächen bei durchschnittlich etwa 10 U / g TS (Tab. 6). Dies entspricht der Größenordnung nach den GR-Aktivitäten in jungen Stieleichen (SCHWANZ *et al.*, 1997). In keiner Naturverjüngung gab es einen Hinweis auf Unterschiede zwischen den Pflanzen ohne und mit Mehltau (Tab. 6). Auch bei Gewächshauspflanzen ergab sich kein signifikanter Unterschied zwischen Sämlingen ohne und mit Mehltau (SKWAREK-FADECKA *et al.*, 2024). Offensichtlich reagiert die GR nicht auf die Pilzerkrankung. Dies unterstützt die Auffassung, dass die GR der Eichen weniger von biotischen oder abiotischen Einflüssen abhängt, sondern eher den Biomembranabbau unterbindet, falls es doch einmal zu Schäden kommt (ASADA, 1996; ARAB *et al.*, 2025). Damit übereinstimmend korrespondierten die einheitlichen GR-Aktivitäten im MetaEiche-Projekt mit den einheitlichen Blattgehalten an MDA derselben Pflanzen (s. u.: Tab. 7).

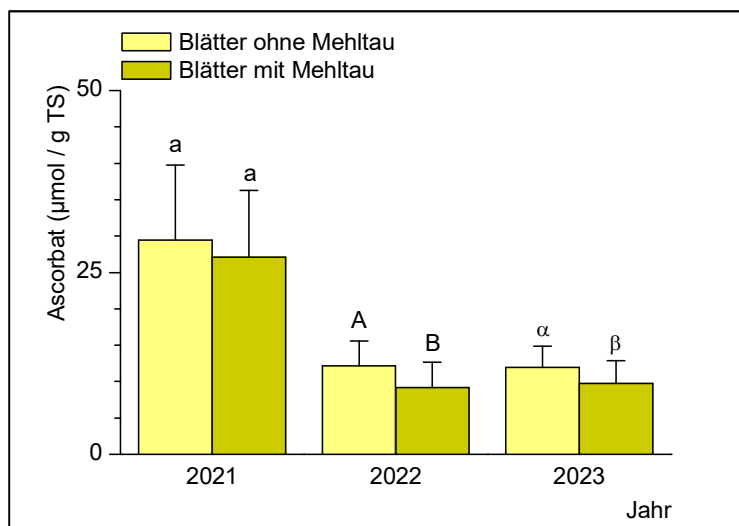


Abb. 11: Ascorbat in den Blättern junger Eichen ohne und mit Mehltau aus Naturverjüngungen

Unterschiedliche Indices kennzeichnen jeweils signifikante Unterschiede zwischen Pflanzen ohne und mit Mehltau. N_{2021} : 48; N_{2022} : 45; N_{2023} : 42. Das Asc wurde mit Hilfe der Asc-Peroxidase photometrisch bestimmt.

Das MDA ist das mengenmäßig wichtigste Abbauprodukt der Biomembranen und zeigt oxidative Schäden der Zelle sicher an (GUÉRAUD *et al.* 2010). Damit übereinstimmend litten beispielsweise auch Stieleichensämlinge mit Mykorrhizen unter erhöhten MDA-Gehalten (KEBERT *et al.*, 2022). Auch im MetaEiche-Projekt wurde es als ein möglicher Indi-

kator für pilzbedingte oxidative Schäden in den Naturverjüngungen von 2021 bis 2023 bestimmt. In den Blättern der jungen Eichen lagen die MDA-Gehalte zwischen ca. 130 nmol / G TS und 270 nmol / G TS (Tab. 7). Dies entsprach in etwa den Blattgehalten junger Traubeneichen aus Klimakammeranzucht (ARAB *et al.*, 2020). Die Werte schwankten von Fläche zu Fläche und von Jahr zu Jahr, die Untersuchungen ergaben jedoch keinerlei Hinweise auf pilzbedingte Biomembranschäden (Tab. 7). Offensichtlich verursachte der biotrophe Mehltaupilz keine zusätzlichen Schäden in den infizierten Blattzellen. Die Störung der stomatären Leitfähigkeit, die der Pilz in den Pflanzen induziert, bedeutete keine weitere Einschränkung für die Pflanzen durch oxidativen Stress (MARÇAIS & DESPREZ-LOUSTAU, 2014).

Tab. 6: GR-Aktivitäten in den Pflanzen aus den Naturverjüngungen im Jahr 2021

Fläche	GR-Aktivität* (U / g TS)		N
	ohne Mehltau	mit Mehltau	
Lindenthalerhald	10,214 (2,325)	8,277 (1,863)	12
Mastlager	11,811 (-) ⁺	10,057 (-) ⁺	2
Hinterer Sommerkopf	10,120 (4,684)	10,246 (5,313)	11
Insgesamt	10,715 (0,950)	9,527 (1,087)	25

⁺, Werte in Klammer, Standardabweichungen. In keinem Fall gab es signifikante Unterschiede zwischen den Blattproben von Pflanzen ohne bzw. mit Mehltau. Deshalb wurde auf die Anbringung von Indices verzichtet. ⁺Am Mastlager wurde nur ein Probekreis untersucht. Die GR wurde mit Hilfe des NADPH-Verbrauchs bei der GSSG-Reduzierung photometrisch bestimmt (POLLE *et al.*, 1990)

Tab. 7: MDA* in den Blättern von Pflanzen ohne und mit Mehltau in den drei Naturverjüngungen

Fläche	Mehltau	Jahr					
		2021		2022		2023	
		MDA* (nmol / g TS)	N	MDA (nmol / g TS)	N	MDA (nmol / g TS)	N
Lindenthalerhald	ohne	268,08 (127,74)	8	159,98 (29,79)	5	199,20 (35,46)	4
	mit	259,97 (193,85)	8	191,91 (43,10)	5	192,09 (61,61)	7
Mastlager	ohne	207,34 (76,77)	7	191,32 (42,51)	7	193,77 (22,60)	8
	mit	209,62 (75,00)	7	205,00 (42,68)	8	191,04 (18,95)	8
Hinterer Sommerkopf	ohne	170,58 (34,58)	8	196,11 (48,22)	7	134,87 (17,04)	8
	mit	167,48 (34,10)	8	207,90 (31,93)	7	129,83 (11,98)	6
Insgesamt	ohne	215,33 (49,24)	23	182,47 (19,62)	19	175,95 (35,67)	20
	mit	212,36 46,31	23	201,60 (8,52)	20	170,99 (35,65)	21

^{*}, Werte in Klammer, Standardabweichungen. In keinem Fall gab es signifikante Unterschiede zwischen den Blattproben von Pflanzen ohne bzw. mit Mehltau. Deshalb wurde auf die Anbringung von Indices verzichtet. Das MDA wurde nach Reaktion mit Thiobarbitursäure photometrisch quantifiziert (PEEVER & HIGGINS, 1989).

Fazit:

- 1) Der Mehltau führt nicht zu signifikant mehr oxidativer Belastung (H_2O_2) oder dadurch verursachte Biomembranschäden (MDA). Pflanzen mit Mehltau haben kein aktiveres antioxidatives System (Asc, GR). Offensichtlich führt die Blatterkrankung, die der parasitische Pilz hervorruft, nicht dazu, dass die Pflanzen mehr oxidativen Stress erleiden.
- 2) Es gibt ein schwaches Signal für erhöhte Wasserstoffperoxidgehalte in den Blättern mit Mehltau. Dies kann einerseits auf eine gewisse Fähigkeit der Bäume hinweisen, auf die Pilzinfektion mit einem oxidativen Ausbruch zu antworten. Dies wäre ein Zeichen für eine Mehлтаuresistenz. Andererseits ist das H_2O_2 ein Substrat für die apoplastische Ligninsynthese. Zusätzliche Lignifizierung wäre ein Hinweis auf eine Toleranzreaktion der Bäume, die es dem Pilz schwerer macht, in die Wirtszellen einzudringen.
- 3) In der Regel hat die Pilzinfektion zu einem Verlust an Asc geführt. Asc ist das mengenmäßig bedeutendste Substrat im antioxidativen System der Chloroplasten, das den Photosyntheseapparat besonders bei Trockenstress vor Schäden bewahrt. Vor diesem Hintergrund besteht die Befürchtung, dass der Mehлтаupilz die Pflanzen anfälliger für Trockenstressschäden macht.

II.1.1.5 Die Gerbstoffe könnten ein Schlüssel für die Mehлтаutoleranz sein

Neben dem antioxidativen System haben die phenolhaltigen Substanzen in den Eichenblättern eine besondere Bedeutung für die Abwehr ungünstiger Bedingungen. So machen die Gesamtphenole (GP) in der Regel mehr als 80 % der Antioxidantienkapazität in den Eichenblättern aus (SCHLOSSER *et al.*, 2022).

Vor diesem Hintergrund wurde im Rahmen des MetaEiche-Projekts in den Naturverjüngungen und in Klimakammerexperimenten untersucht, ob die Eichen mit mehr GP auf Mehltauinfektionen antworten. Die Blattgehalte an GP lagen in den jungen Pflanzen zwischen etwa 300 und 450 $\mu\text{mol} / \text{g TS}$ (Tab. 8). Dies entspricht den Gehalten juveniler Traubeneichen in einem anderen Klimakammerexperiment (ARAB *et al.*, 2020). Im Klimakammerexperiment des MetaEiche-Projekts lagen die Blattgehalte an GP signifikant um etwa 40% höher, wenn die Pflanzen mit Mehltau infiziert waren (Tab. 8). In den Naturverjüngungen waren die Unterschiede 2021 mit lediglich 20 % deutlich geringer. Aber selbst unter diesen Umständen unterschieden sich die Eichen mit Mehltau zumindest 2021 signifikant von den gesund erscheinenden Pflanzen (Tab. 9). Damit übereinstimmend wiesen auch Stieleichensämlinge mit Mehltau signifikant erhöhte GP-Gehalte auf (KEBERT *et al.*, 2022). Offensichtlich reagieren die Eichen mit einer Akkumulation phenolhaltiger Substanzen auf den Mehлтаupilz. Im Jahr 2021 schlug sich dies darin nieder, dass die GP linear zunahmen, wenn die Bäume quantitativ schwerer mit Mehltau infiziert waren (Abb. 12 A). Fast die Hälfte der Variabilität in den den Blattgehalten an löslichen phenolischen Substanzen ließ sich durch den Mehлтаupilz erklären ($r^2 = 0,498$; Abb. 12 A). Ein solcher Zusammenhang ließ sich im Jahr darauf jedoch nicht bestätigen (Tab. 8; $r^2 < 0,1$). Dementsprechend kann die Beobachtung der GP-Akkumulation derzeit nur als Hinweis gelten.

Tab. 8: Gesamtphenol- und Ellagtanningehalte in den Blättern junger Traubeneichen aus Naturverjüngung und Klimakammeranzucht

Parameter	Mehltau	Untersuchung					
		Naturverjüngung				Klimakammer	
		2021	N	2022	N	2022	N
Gesamtphenol* ($\mu\text{mol GSÄ}^\# / \text{g TS}$)	ohne	312,4 (45,6)	21	314,8 (77,1)	21	296,3 ^a (50,4)	8
	mit	376,5 (68,1)	20	302,6 (53,0)	21	419,9 ^b (152,8)	7
Ellagtannine* ($\mu\text{mol ESÄ}^+ / \text{g TS}$)	ohne	924,3 ^a (148,9)	21	1087,0 ^Δ (290,8)	18	882,4 ^A (210,8)	8
	mit	1099,9 ^β (174,8)	20	1071,8 ^Δ (204,1)	17	1274,2 ^A (519,7)	7

*, Werte in Klammern, Standardabweichungen. [#], GSÄ, Gallsäureäquivalente; ⁺, ESÄ, Ellagsäureäquivalente; Unterschiedliche Indices im Klimakammerversuch kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Pflanzen ohne und mit Mehltau. Die statistische Analyse der GP-Gehalte in den Proben aus den Naturverjüngungen findet sich in Tab. 9. Der Mehltau hatte keinen Bezug zu den Gesamt-ET in den Naturverjüngungsproben. Deshalb wurde in diesem Fall auf die Anbringung von Indices verzichtet.

Zu den wichtigsten Bestandteilen der löslichen Eichenphenole gehören die löslichen Ligninbausteine Coniferyl- und Sinapylalkohol. Lignin könnte eine Bedeutung für die Reaktion der Eichen auf den Mehлтаupilz haben, weil die Blätter unter den Stellen, an denen der Pilz versucht, die Zellwand zu durchdringen, ligninreiche Papillen anlagert (AYRES, 1976). Die Eichen bauen eine mechanische Barriere auf, die der Mehltau nur schwer durchstoßen kann. Die pilzbedingt erhöhten GP-Gehalte der Blätter könnten auf eine solche Ligninantwort auf den Pilzangriff hinweisen.

Tab. 9: Statistische Analyse der Blattgehalte an GP

Varianzquelle	Freiheitsgrade	F-Wert	Irrtumswahrscheinlichkeit (α)
Irrtum	71	5909,083	0,207
Jahr	1	8,973	0,004
Fläche	2	1,927	0,103
Mehltau	1	4,771	0,032
insgesamt	83		

Die Stichproben waren normalverteilt. Deshalb wurden sie mittels dreifaktorieller Varianzanalyse ausgewertet. Neben den Einzelfaktoren hatten auch die Kombination von Jahr und Mehltau einen signifikanten interaktiven Effekt ($\alpha = 0,004$). Der interaktive Effekt trug aber nichts zur Beurteilung der Arbeitshypothese bei und wurde deshalb nicht weiterverfolgt.

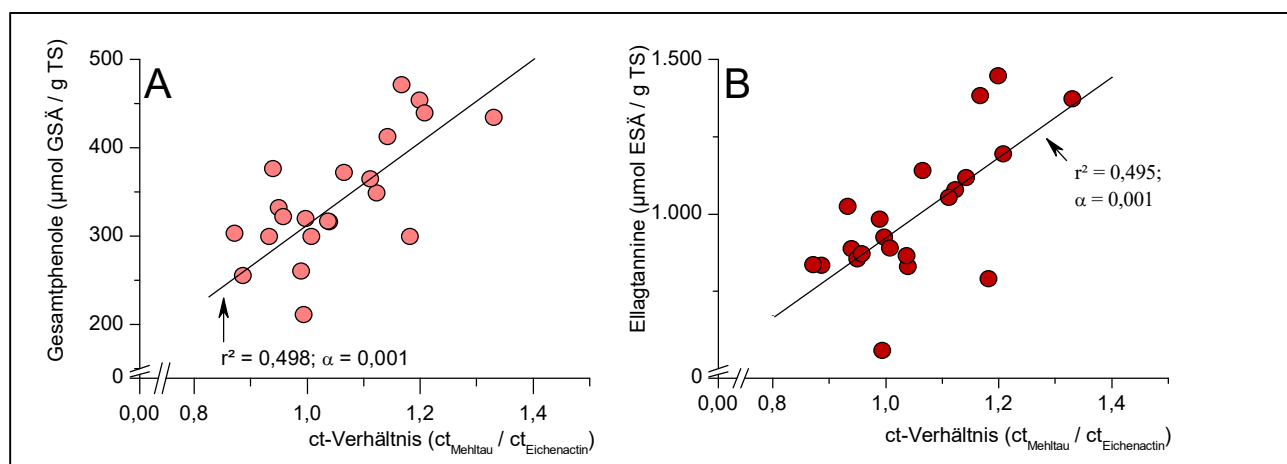


Abb. 12: Einfluss der Mehltauinfektionen auf die Akkumulation von phenolischen Substanzen im Allgemeinen (A) und Ellagtanninen im Besonderen (B) in den Blättern junger Traubeneichen aus den Naturverjüngungen im Jahr 2021.

Tab. 10: Blattgehalte an Lignin in Eichenpflanzen aus drei Naturverjüngungen in den Pfälzer Nordvogesen

Bestand	Lignin* (mg / g TS)		Signifikanz (α)	N
	ohne Mehltau	mit Mehltau		
Hinterer Sommerkopf	76,4 (9,5)	90,6 (17,1)	0,145	10
Mastlager	81,3 (14,0)	97,1 (5,6)	0,144	6
Lindenthalerhald	80,8 (45,4)	112,5 (69,5)	0,419	10
Insgesamt	79,2 (27,5)	100,5 (42,6)	0,144	26

*, Werte in Klammern, Standardabweichungen.

Um diese Hypothese zu testen, wurden die Ligninkonzentrationen in den Naturverjüngungsproben 2021 orientierend festgestellt. Die Pflanzen wiesen Ligningehalte zwischen 50 und 230 mg / g TS in ihren Blättern auf. Es schien so, als ob auf allen drei Untersuchungsflächen in den Naturverjüngungspflanzen ca. 20 bis 40 % mehr Lignin zu finden war, wenn die Bäumchen unter Mehltauinfektionen litten (Tab. 10). Allerdings war der Unterschied auf keiner Fläche signifikant (Tab. 10). Auf der anderen Seite zeigten RAMAN-spektroskopisch untersuchte Sämlingsblätter mit Mehltau nach einer KI-unterstützten Auswertung anscheinend erhöhte Ligningehalte (CLARK & GOLDBERG-OPPENHEIMER, 2024). Im MetaEiche-Projekt jedoch ließ sich kein quantitativer Einfluss der Mehltauinfektion auf die Ligningehalte der Bäumchen beobachten ($r^2 = 0,033$). Offensichtlich steht das Lignin in den Blättern in keinem eindeutigen Zusammenhang zu der Mehltauinfektion. Zusätzliche Untersuchungen könnten hier für mehr Klarheit sorgen.

Die löslichen Ellagtannine bilden den zweiten bedeutenden Anteil der löslichen Gesamtphenole. Ellagtannine sind die typischen Eichengerbstoffe. Bekannt ist, dass sie die Insekten- und Pilzresistenz im Kernholz dieser Bäume bedingen (VIVAS, 1997). Vor diesem Hintergrund wurde im Rahmen des MetaEiche-Projekts sowohl in Klimakammerexperimenten als auch in den Naturverjüngungen 2021 und 2022 über die Gehalte der Gesamtphenole hinaus auch die Blattkonzentrationen an Ellagtanninen gemessen. Diese Gruppe phenolischer

Substanzen hat deutlich auf den Mehltaupilz reagiert. Im Klimakammerexperiment 2022 waren die Blattgehalte der Pflanzen mit Mehltau mit nahezu 1.300 $\mu\text{mol ESÄ} / \text{g TS}$ fast anderthalb Mal so hoch wie in den Pflanzen ohne Mehltau (Tab. 8). Wegen der immensen Streuung zwischen den Bäumen war der Unterschied jedoch nicht signifikant, sondern stellt nur eine Tendenz dar (Überschreitungswahrscheinlichkeit $\alpha = 0,075$). Im Jahr 2021 lagen die ET-Gehalte der Pflanzen mit Mehltau in den Naturverjüngungen mit knapp 1.100 $\mu\text{mol} / \text{g TS}$ sogar signifikant über den Blattgehalten der Pflanzen ohne (Tab. 8). Sie nahmen signifikant und linear mit den Mehltauinfektionen zu. Je mehr Mehltaupilze sich auf den Blättern ansiedelten, um so mehr Ellagtannine lagerten die Eichen ein (Abb. 12 B). Allerdings bestätigte sich diese Beobachtung im Jahr 2022 zunächst nicht, so dass die betreffenden Ergebnisse allenfalls als Hinweise aufgefasst werden können und weiterer Untersuchungen bedürfen.

Tab. 11: Vescalagin- und Castalagingehalte (VC) in den Blättern junger Traubeneichen aus Naturverjüngung

Jahr	Vescalagin und Castalagin* ($\mu\text{mol} / \text{g TS}$)		N
	ohne Mehltau	mit Mehltau	
2021	39,44 ^a (18,22)	57,83 ^b (29,04)	48
2022	26,69 ^A (10,40)	48,09 ^B (23,49)	41
2023	19,91 ^a (7,19)	27,20 ^B (9,85)	34

*, Werte in Klammern, Standardabweichungen. Die Blattproben wurden mittels HPLC-UV/Vis auf ihre VC-Gehalte hin untersucht. Unterschiedliche Indices kennzeichnen signifikante Unterschiede ($\alpha \leq 0,05$) zwischen den Pflanzen ohne und mit Mehltau.

Die ET-Reaktion der Eichen ließ sich mit Vescalagin und Castalagin (VC) in Verbindung bringen. VC sind die bedeutendsten löslichen Ellagtannine der Eichen (MAYER *et al.*, 1967). In den Blättern der jungen Eichen fanden sich im Mittel zwischen etwa 25 und 50 $\mu\text{mol VC} / \text{g TS}$. Dies entspricht den Gehalten in den Blättern junger Stieleichen aus einem Klimakammerexperiment und den Blattkonzentrationen adulter Traubeneichen über die Vegetationszeit hin (ARAB *et al.*, 2020; BLEH & SEEGLMÜLLER, 2022). Die Pflanzen in den Naturverjüngungen haben signifikant mehr VC angehäuft, wenn sie unter Mehltaubefall zu leiden hatten (Tab. 11). Die VC-Antwort wurde in allen drei Projektjahren beobachtet. Bekannt war bisher, dass die blattfressenden Insekten durch massenhaften Angriff eine VC-Verarmung in den Blättern bewirken müssen, bevor sie sich entwickeln können und dass VC die Antioxidantienkapazität der Eichen bestimmt (APEK-Abschlussbericht 2019; SCHLOSSER *et al.*, 2022). Neu ist nun die Erkenntnis, dass VC auch mit der Mehltauinfektion quantitativ korreliert (Abb.13). Ihre Gehalte wachsen von unter 20 $\mu\text{mol} / \text{g TS}$ bei gesunden Pflanzen auf über 75 μmol bei schwer erkrankten signifikant an (Abb.13). Daraus ergibt sich die Hypothese, dass VC eine Schlüsselrolle bei der Limitierung des Mehltaubefalls einnehmen. Allerdings gab es bei Stieleichen über Europa hinweg anscheinend keinen Zusammenhang zwischen dem visuell geschätzten Flächenanteil von Mehltau auf den Blattoberflächen adulter Bäume und den VC-Gehalten ofengetrockneter Blätter (GAYTÁN *et al.*, 2022). Andererseits jedoch wurde die Rolle von VC bei der Krankheitsabwehr zwischenzeitlich im Folgeprojekt „Eichen-Resistenztest für die praktische Anwendung“ (EichenResistT, FF 5.1-01-2024) mit Zuwendung der FAWF positiv beantwortet (SAEED, M., 2025, vgl. auch Kap. II.1.2.12). VC behindern signifikant die Keimung von Mehltaukonidien auf der Blattoberfläche und limitieren die Ausbreitung des Pilzes über Elongationshyphen.

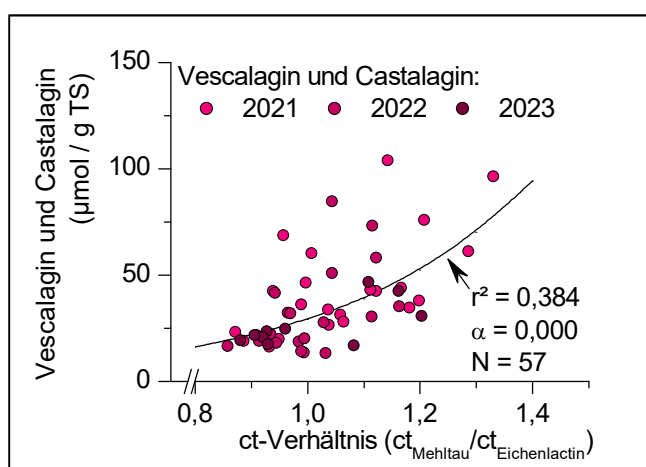


Abb. 13: Blattgehalte an Vescalagin und Castalagin in Pflanzen dreier Naturverjüngungen aus den Pfälzer Nordvogesen in den Jahren 2021 bis 2023

Wegen der Naturverjüngungen vgl. Kap. 2.1.1. Die Proben wurden mittels HPLC-UV/Vis analysiert. Die Ergebnisse sind jeweils die Mittelwerte je Probekreis. Nicht jeder Probekreis wurde jedes Jahr quantitativ molekulargenetisch auf seine Infektion hin eingestuft.

Aufbauend auf diesen Erkenntnissen wurden Klimakammerversuche eingerichtet, in denen junge Eichen unter ansonsten identischen Bedingungen ohne und mit Mehltau kultiviert wurden. Wie in den Naturverjüngungen reicherten die Eichen mit Mehltau auch unter diesen Bedingungen in erheblichem Umfang VC an (Abb. 14 A). Ursache dafür war, dass diese Blätter ca. acht Mal mehr β -Glucogallin (β -GG) enthielten (Abb. 14 B). β -GG ist die erste Galloylglucose auf dem Syntheseweg hin zu den hydrolysierbaren Gerbstoffen (GROSS, 1983). Die

hohen Konzentrationen dieses Vorprodukts deuten darauf hin, dass die Akkumulation von VC in erkrankten Eichenblättern nicht auf einem gestörten Abtransport dieser Substanzen zurückzuführen ist, sondern mit erhöhten Syntheseraten in Verbindung steht.

Vor diesem Hintergrund erscheint es aussichtsreich, für die Entwicklung eines Mehltautoleranz-Schnelltests auf dem Syntheseweg zu den beiden Gerbstoffen nach einem Schlüsselenzym zu suchen, das je nach Provenienz als Mehltautantwort differenziert aktiviert wird. Der spezifische Syntheseweg von VC geht von der Uridindiphosphat-(UDP)-Glucose und dem Gallat über das β -Glucogallin und verschiedene mehrfach-Galloylglucosen hin zu Vescalagin und Castalagin als den ersten wesentlichen hydrolysierbaren Tanninen (Schaubild 1). Die Schlüsselenzyme dieses Syntheseweges sind die Galloyltransferase I (GTase; EC2.4.1.136), die UDP-Glucose und Gallat zu β -Glucogallin synthetisiert und die UDP-Glucose-Phosphorylase (UGPase; EC 2.7.7.9), die Uridintriphosphat mit Glucosephosphat unter Abspaltung von Diphosphat zu UDP-Glucose vereinigt (Schaubild 1).

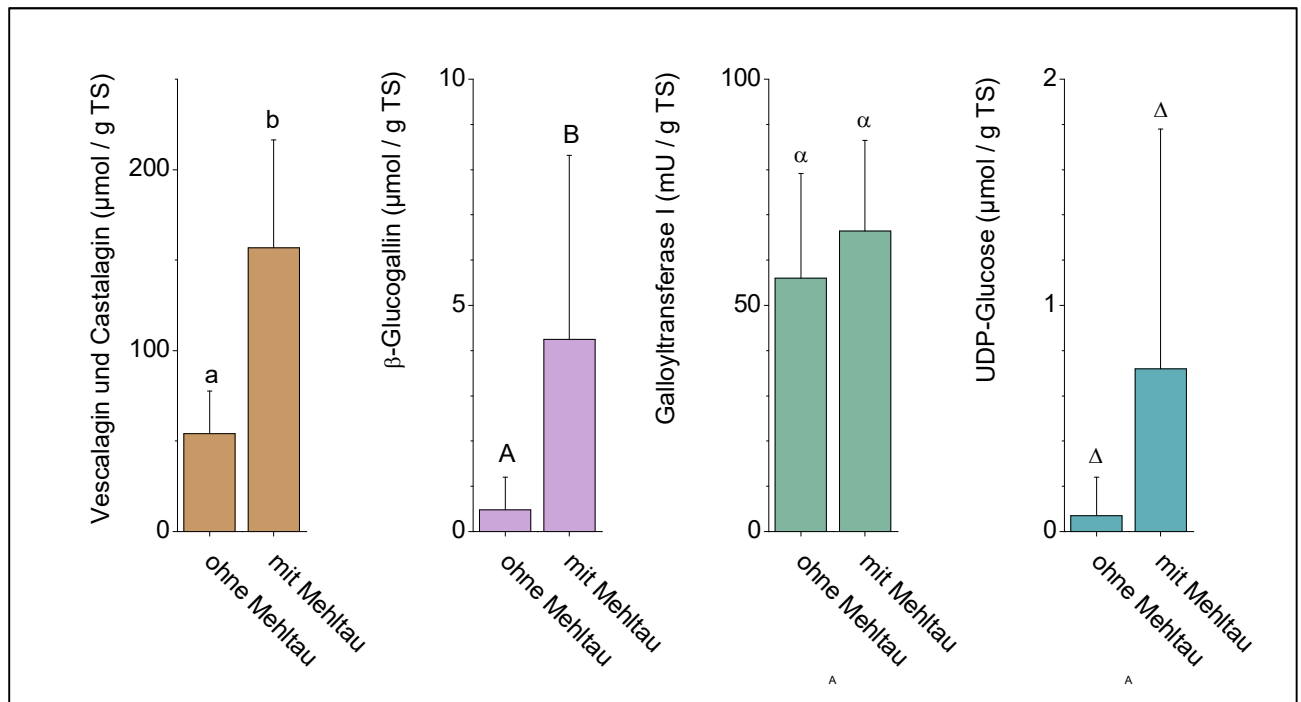


Abb. 14: Blattgehalte junger Traubeneichen aus Klimakammeranzucht ohne und mit Mehltau an VC (A), β -GG (B), und UDP-Glucose (UDP-Gluc, D) sowie die Aktivität der Galloyltransferase I (GTase; C).

Alle Parameter wurden mittels HPLC-UV/Vis untersucht. Für die GTase wurde ein Assay, ebenfalls auf HPLC-UV-Vis-Basis, entwickelt. Unterschiedliche Indices kennzeichnen signifikante Unterschiede mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit $\alpha \leq 0,05$. N = 6

- (1) UTP + alpha-D-glucose 1-Phosphate = UDP-Glucose-Phosphorylase => Diphosphat + UDP-Glucose
- (2) UDP-Glucose + Gallat = Galloyltransferase I => UDP + 1-Galloyl- β -D-Glucose (β -Glucogallin)
- (3) 5 β -Glucogallin = Galloyltransferasen II-V => 4 Glucose + Pentagalloylglucose => Vescalagin, Castalagin

Schaubild 1: Syntheseweg für Vescalagin und Castalagin

Quelle: <https://www.brenda-enzymes.org/enzyme.php?ecno=2.7.7.9>; <https://www.brenda-enzymes.org/enzyme.php?ecno=2.4.1.136>

Die β -GG-Anreicherung könnte darauf beruhen, i) dass die GTase I (UDP-glucose: vanillate 1-O-glucosyl transferase) in diesen Pflanzen krankheitsbedingt aktiver ist, oder ii) dass die Pflanzen mehr Substrate für die Gallatübertragung vorhalten. Um die erste Hypothese zu untersuchen, wurde im Rahmen des MetaEiche-Projekts erstmals ein Enzymassay in Verbindung mit einer HPLC-UV/Vis-Analyse entwickelt, die die Messung der Galloyltransferaseaktivitäten in den Eichenblättern einschließlich der Wiederfindungsraten (WF) auch ohne radioaktiv markierte UDP-Glucose erlaubt (mittlere WF = 83 %; Schaubild 2).

1. Extraktion (Extr.) für Std: 2 * 10 ml 100 mM KPP pH 6,5; 500 µM EDTA, je 10 ml 1 g PVPP, 500 mg FG, Zentrifuge mit großen Zentrifugenröhrchen Biofuge PrimoR mit Rotor 7588 8500 upm, 5 °C, 15 min, jeweils knapp 5 ml abpipettieren, vereinigen.

2. Extr.: 50 mg in 1.000 µl 100 mM KPP (ohne internen Standard (Std.)) oder 500 µl KPP + 500 µl internen Std. aus Extr. 1, außerdem externen Std.: 500 µl KPP, 500 µl Std aus Extr. 1, alles pH 6,5, 500 µM EDTA, 100 mg PVPP auf Eis, Zentrifuge 15 min 13.000 upm

Assay: 250 µl Extrakt +25 µl 2,5 mM UDP-Gluc in KPP, 25 µl 5 mM GS in KPP oder 25 µl KPP; Abnahme Aliquot 50 µl nach t 0, 15 30, 45, 60, 75 min, Abstoppen mit 10 µl 1 N HCl, +240 µl dd H2O

Proben 1:5 verdünnen mit dd H2O, HP 1090, Methode UG.m, LM isokratisch dd H2O, pH2,0, 1 ml / min, C18 Säule. Detektion bei $\lambda = 265$ nm.

Schaubild 2: Enzymassay und HPLC-UV/Vis-Analyse für die Bestimmung der Galloyltransferase I-Aktivität

Um optimale Assaybedingungen für reproduzierbare Ergebnisse zu bestimmen, wurde im Rahmen des Projekts erstmals die apparente Aktivität dieses Enzyms auf der Basis seiner Substrate charakterisiert. Sowohl hinsichtlich UDP-Glucose als auch in Bezug auf das Gallat erwies sich die Galloyltransferase als einstufiges System. Die maximale Aktivität für UDP-Glucose lag bei 2,3 mU / g TS und für Gallsäure bei 12,7 mU / g TS (Abb. 15 A, B). Als Michaelis-Menten Konstanten ergaben sich 47 µM UDP-Glucose und 121 µM Gallensäure. Offensichtlich ist das Enzym für UDP-Glucose wesentlich affiner als für Gallat. Andererseits kann es Gallat schneller umsetzen als den Zucker. Bemerkenswert ist darüber hinaus, dass dieses Enzym auch Tannine spalten und Gallate freisetzen kann, wenn die Gehalte an dieser Substanz gering sind (Abb. 15 B). Aus den Charakteristika der Enzymaktivität wurden die optimalen Assaybedingungen abgeleitet (UDP-Glucose = 200 µM, Gallat = 400 µM).

Unter diesen Bedingungen ergaben sich für die Klimakammereichen ohne und mit Mehltau Enzymaktivitäten von 56 bzw. 66 mU / g TS (Abb. 14 c). Offensichtlich wiesen die Pflanzen mit Mehltau nur marginal erhöhte Enzymaktivitäten der GTase I auf. Demzufolge scheint es zweifelhaft, ob dieses Enzym den Schlüssel für die Pflanzenreaktion auf den Pilzbefall darstellt.

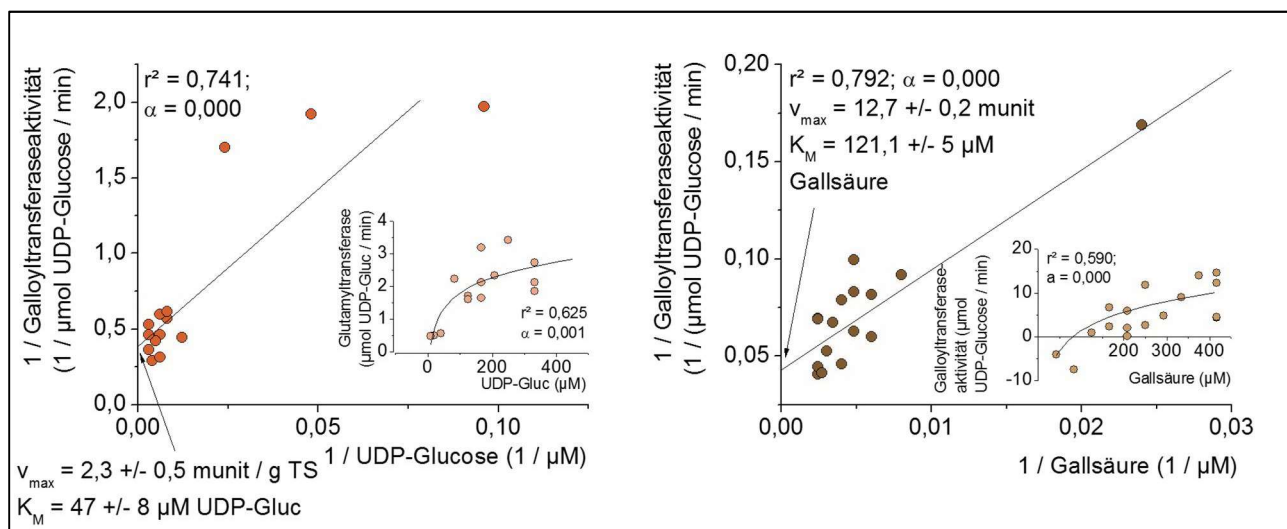


Abb. 15: Charakterisierung der apparenten Enzymaktivitäten der Galloyltransferase I für ihre Substrate UDP-Glucose und Gallat.

Für die Bestimmung der apparenten Aktivitätskennwerte $v_{\max}$ und K_M wurden die Messwerte entsprechend LINEWEAVER & BURKE (1937) doppelt invertiert.

Vielmehr zeigte sich, dass die UDP-Glucose nur gelegentlich und in geringen Konzentrationen in den gesunden Eichen aufgetreten ist. Im Mittel lagen die Gehalte in diesen Pflanzen bei lediglich 70 nmol / g TS (Abb. 14 D). Demgegenüber fand sich diese Substanz in den Blättern der erkrankten Eichen regelmäßiger und in großen Konzentrationen, so dass im Mittel in etwa zehnfach erhöhte Konzentrationen von etwa 700 nmol / g TS nachweisbar waren. Allerdings unterschieden sich die gesunden und erkrankten Eichen in dieser Hinsicht wegen der großen Streuung der Messwerte nicht signifikant voneinander, so dass die vorliegenden Ergebnisse lediglich Hinweise darstellen, die weiterer Untersuchungen bedürfen. Diese Untersuchungen konnten jedoch wegen der Kürzung der Arbeitskapazität im wissenschaftlichen Bereich um 50 % sowie dem daraus

folgenden Kapazitätsverlust im technischen Bereich von über 20 % ebenso wenig durchgeführt werden wie die anstehende Aktivitätsbestimmung der UGPase und die funktional genetische Charakterisierung der beiden Enzyme, die den Weg hin zu einem raschen Test von Eichenprovenienzen auf Mehltautoleranz geebnet hätten.

Fazit:

- 1) Die Gesamtphenolgehalte der Eichenblätter stehen in einem klaren Zusammenhang mit der Mehltau-erkrankung.
- 2) Der Zusammenhang zu erhöhten Ligningehalten lässt sich nicht vollständig ausschließen. Wahrscheinlicher ist jedoch, dass die Phenolantwort der Eichen mit den Ellagtanninen zusammenhängt.
- 3) Unter den Ellagtanninen nehmen Vescalagin und Castalagin (VC) wohl auch für die Abwehr des Mehltaupilzes eine wichtige Rolle ein.
- 4) Die Schlüsselenzyme für die VC-Synthese dürften ein vielversprechender Ansatzpunkt für die Entwicklung eines Schnelltests auf Mehltauresistenz sein. Besonders aussichtsreich erscheint in dieser Hinsicht derzeit die UGPase, weniger vielversprechend die Galloyltransferase.

II.1.1.6 Fazit der wissenschaftlichen Untersuchungen

Die wissenschaftlichen Untersuchungen haben gezeigt, dass es unter den Eichen wohl keine vollständig resistenten Individuen geben dürfte (vgl. Kap. II.1.1). Gleichwohl finden sich aber einzelne Pflanzen und Herkünfte, die weniger unter der Pilzkrankheit leiden (Kap. II.1.1). Außerdem unterschieden sich beispielsweise die Herkünfte aus zwei räumlich weit getrennten europäischen Regionen sowie die einzelnen Naturverjüngungen einer Region in ihrem Krankheitsgeschehen (vgl. Kap. II.1.2). Darüber hinaus korrelieren Mutterbäume und Nachkommenschaften in ihrer Mehltauanfälligkeit (vgl. Kap. II.1.3). Demzufolge ist die Möglichkeit von Differenzen in der Mehltauanfälligkeit aufgrund erblicher Unterschiede nicht auszuschließen.

An Mehltau erkrankte Eichen leiden offensichtlich nicht an erhöhtem oxidativen Stress (vgl. Kap. II. 1. 4). Erkrankte Bäume fallen nicht im Wachstum zurück (vgl. Kap. II.1.2). Dennoch leiden die Verjüngungen mit Mehltau unter mehr Mortalität (vgl. Kap. II. 1.2).

Der Schlüssel für die Toleranz und (Teil-)Resistenz der Eichen gegen den Mehltaupilz dürften lösliche phenolische Substanzen in den Blättern sein, und zwar vor allem Vescalagin und Castalagin. Die ausschlaggebenden Enzyme des Synthesewegs zu diesen beiden Tanninen dürften aussichtsreiche Kandidaten für die Entwicklung eines Schnelltests auf Mehltauresistenz darstellen (vgl. Kap. II.1.5).

II.1.1.7 Lichtkegelverjüngung geht auch unter erschwerten Bedingungen

Um die wissenschaftlichen Ergebnisse des MetaEiche-Projekts mit Blick auf die Machbarkeit des Lichtkegelverfahrens den Wirtschafter*innen zu vermitteln, wurden im Rahmen des Projekts vier waldbaupraktische Anschauungsobjekte erschlossen (Abb. 1; Abb. 16; Tab. 12). Mit Hilfe der Anschauungsobjekte werden verschiedene Aspekte der kleinflächigen Lichtkegelverjüngung beleuchtet. So werden die Demonstrationsflächen „Am Spitzen Stein“ Hinweise zur kleinflächigen Naturverjüngung ohne Zaun bzw. zur Anlage von Lichtkegeln auf staunassen Standorten mit einer suboptimalen Feinerschließung als Restriktion geben (Abb. 16 A, C). Die Demonstrationsfläche „Struth“ zeigt, inwieweit sich die Eiche in einem staunassen Fichtengrundbestand verjüngen lässt (Abb. 16 B), während die Demonstrationsfläche „Klausenberg“ auf die Möglichkeiten der kleinflächigen Verjüngung unter sehr trockenen bis äußerst trockenen Bedingungen aufzeigt (Abb. 16 D).

Den Zielsetzungen entsprechend stocken die Bestände auf Standorten unterschiedlicher Wasserversorgung. Hervorzuheben ist einerseits, dass der Bestand am Klausenberg teilweise als äußerst trocken angesprochen wurde und Teile der Struth und des Bestands am spitzen Stein grundnass sind (Tab. 12).

Der Bestand Am Spitzen Stein ist ein geschlossenes bis lockeres Kiefern-Traubeneiche-Fichte-Baumholz mit einem lockeren Zwischenstand von Buche, Kiefer und Fichte. Die Traubeneiche ist in den Kiefern-Grundbestand einzelbaumweise bis horstweise eingemischt. Der Boden ist teilweise vergrast. Es gibt eine unregelmäßige Feinerschließung (Abb. 16 A, C).

Die Struth ist ein geschlossenes bis gedrängte Fichten-Baumholz mit einzelnen bis gruppenweise eingemischten reliktschen Traubeneichen. Sie ist im Osten mittel stau- oder grundnass. Unter den reliktschen Traubeneichen war die Verjüngung bereits plätzeweise angelaufen (Abb. 16 B; Tab. 13).

Der Klausenberg ist ein geschlossenes bis lückiges Kiefern-Traubeneiche-Baumholz mit einzelnen Edelkastanien im oberen Bereich. Viele Kiefern leiden unter Mistelbefall und sterben einzeln bis horstweise ab. Im Allgemeinen schieben die Traubeneichen ihre Kronen zunehmend durch das Kiefern-Kronendach. Die meisten Eichen sind aus Stockausschlag entstanden. Der Boden ist flächig mit Heidekraut bewachsen. Dort, wo Heidekraut vorkommt, gibt es eine Rohhumusauflage (Abb. 16 D).

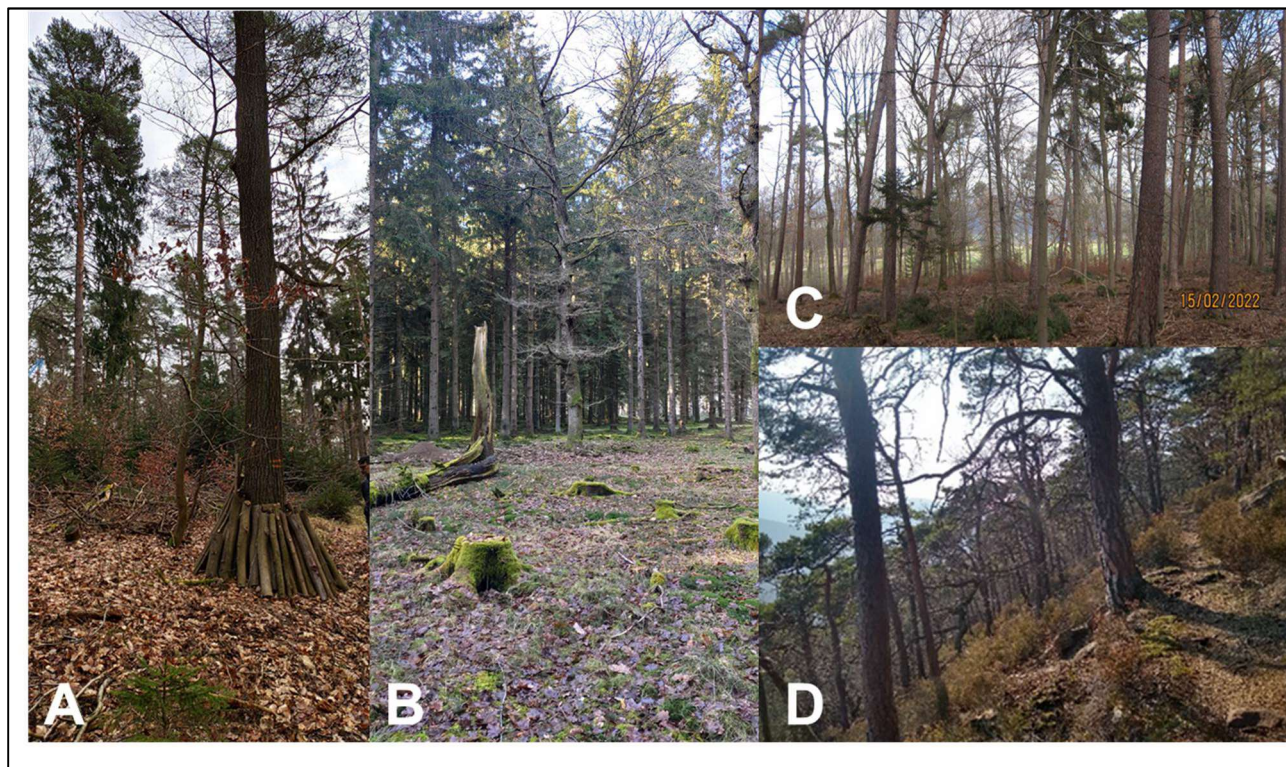


Abb. 16: Bestandesfotos (A) Am Spitzer Stein I; (B) Struth; (C) Am Spitzer Stein II, (D) Klausenberg.

Die Bestände A-C liegen im Forstamt Boppard. Bestand D liegt im Forstamt Bad Dürkheim.

Tab. 12: Standorte der vier waldbaupraktischen Anschauungsobjekte

Forstamt	Bestand	Wärme- stufe	Trophie	Wasserhaushalt	Boni- tät	Besto- ckungs- grad
Boppard	Staat III 2 b ¹ Am Spitzten Stein	kollin	mittel	ziemlich frisch - frisch, im O schwach - mittel grundnass	2,5	0,8
	Staat VI 11 a ¹ Struth	submon- tan	mittel	frisch - sehr frisch schwach - mittel grundnass	4,0	0,1
Bad Dürkheim	Staat XXIV 1 a und 1 d ¹ KLAUSENBERG	kollin	arm	trocken –äußerst tro- cken	5,0-6,0	0,9

Quelle: Forsteinrichtungsangaben und eigene Untersuchungen.

Im Herbst 2022 wurden die Lichtkegelflächen nach einer auskömmlichen Fruchtansatzprognose ausgewiesen und außer auf einer der beiden Demonstrationsflächen Am Spitzten Stein (Zielsetzung: Verjüngung ohne Zaun!) mit Kleinzäunen versehen (Abb. 17 A, B). Auf den Flächen im Forstamt Boppard wurden jeweils sechs Plätze für die Lichtkegelverjüngung identifiziert und am Klausenberg zunächst nur drei. Hier wurden nach einer weiteren Mast 2024 die drei übrigen Flächen für die Lichtkegelverjüngung gezäunt. Am Klausenberg wurde jeweils die halbe Fläche der Kleinzäune gerieft, um zu prüfen, ob hangparallel freigelegter Mineralboden den Saatgutrückhalt und den Keimerfolg erhöht. Auf allen Flächen wurden die Vorausverjüngung und Konkurrenzvegetation sowie die Samendichte und Überschirmungsverhältnisse erhoben. Am Standort Am Spitzten Stein ohne Zäune fand sich bereits in vielen Lichtkegeln holzige Konkurrenzvegetation (Tab. 13) und auf der Struth gab es Vorausverjüngungen von Fichte und Eiche (Tab. 13). An allen Standorten ließ sich eine durchschnittliche Saatedichte von fast 40 Eicheln je m² nachweisen (Tab. 13). Dies entspricht einer „Vollmast“, d. h. einem flächenhaft mindestens ausreichenden Saatgutaufkommen. (ALBERT & WOMELSDORF, 1987). Außerdem kam regelmäßig holzige Begleitvegetation vor, die aber keinen Aufnahmepunkt dominierte (Tab. 13). Durchschnittlich waren die Lichtkegel zu etwas mehr als der Hälfte überschirmt (Tab. 13). Die größten Kronenlücken gab es am „Klausenberg“ und am dichtesten war das Kronendach Am Spitzten Stein (Tab. 13).



Abb. 17: Kleinzäune für die Lichtkegelverjüngung im Bestand Am Spitzer Stein I (A) und im Bestand Klausenberg (B).

Tab. 13: Holzige Begleitvegetation, Samendichte und Überschirmungsverhältnisse auf den waldbaulichen Demonstrationsflächen

Fläche	Jahr	Eicheln* (N / m ²)	Verjüngungsvorrat* (N / m ²)				Brombeere* (N / m ²)	Überschirmung* (%)
			Eiche	Buche	Fichte	Douglasie		
Klausenberg ohne Riefen	2022	45,0 (5,0)						52,8 (15,0)
	2024	72,2 (18,2)						
Klausenberg mit Riefen	2022	37,7 (27,5)						
	2024	66,7 (10,0)						
Struth	2022	29,2 (36,4)	29,2 (42,3)		25,0 (27,7)		0,2 (-)*	49,9 (9,3)
Am spitzen Stein mit Zaun	2022	41,3 (35,0)	6,0 (-)*					70,3 (4,0)
Am spitzen Stein ohne Zaun		nd*	16,1 (22,6)	0,8 (0,9)	0,3 (0,5)	0,5 (0,8)		nd
Mittel~		38,3 (6,8)	17,1 (11,6)	0,8 (-)	12,6 (17,5)	0,5 (-)	0,2 (-)	57,6 (11,1)

*, Werte in Klammern: Standardabweichungen. *, nd, nicht erhoben. ~, Beschreibende Statistik nur für die Flächen mit Verjüngung berechnet.

Tab. 14: Keimrate und Verjüngungsdichte auf den Flächen zur Demonstration der Lichtkegelverjüngung unter besonderen Bedingungen

Fläche	Bodenbearbeitung	Keimrate (%)	Verjüngungsdichte (N / m ²)	Lichtkegel* (N)
Struth		43,1 (26,5)	40 (45)	8
Am Spitzen Stein		N.N.*	111 (105)	6
Klausenberg	gerieft	37,6 (36)	23 (15)	3
	ungerieft	25,9 (36)	19 (32)	3

*, Die Keimraten ließen sich nicht berechnen, weil nach unserer Herbstaufnahme 2022 noch in beträchtlichem Maß Eichelmast gefallen ist. *, nur 2022 angelegte Lichtkegel.

Die Eichelmast 2022 hat im Juni 2023 zu einem reichlichen Keimerfolg auf den Lichtkegeln der waldbaupraktischen Anschauungsobjekte geführt. Von den 30 bis 50 Eicheln / m² waren im Frühjahr 2023 zwischen 25 und über 40 % gekeimt, so dass die Verjüngungsdichte im Juni zwischen knapp 20 und über 110 Keimlingen / m² lag (Tab. 14). Dies bedeutet für alle Flächen ein ausreichendes Auflaufen der Mast. So gelten im Vergleich dazu Dichten von 2-8,5 Pflanzen / m² als ausreichend (WILHELM *et al.*, 2021; TISCHER *et al.*, 2023). Offensichtlich konnten sich selbst auf der trockensten Demonstrationsfläche die Eichen vollumfänglich verjüngen, wenn sie hinter Zaun geschützt waren. Auch Mäusefraß und Verpilzung konnten die Mast wohl nicht vernichten. Allerdings gab es zwischen den Lichtkegeln auf allen Flächen eine hohe Variabilität (Tab. 14). Der Keimerfolg war wohl nicht überall gleich, ja, auf einigen Kegeln war sogar ein Totalausfall zu konstatieren. Dem konnten

auch die Riefen nicht signifikant abhelfen, allerdings war die Verjüngung nach Bodenbearbeitung etwas gleichmäßiger aufgelaufen (Tab. 14).

Auf der ungezäunten Fläche Am Spitzen Stein war der Verjüngungsvorrat nach der Mast 2022 im Spätsommer 2023 mit 167 ± 140 Keimlingen etwa zehn Mal so hoch wie im Jahr zuvor. Selbst ohne Zaunschutz konnte die Vollmast vom Jahr zuvor einen erheblichen Verjüngungsvorrat zeitigen. Weder das Wild, noch Mäuse oder Pilze haben die flächendeckende Verjüngung stark beeinträchtigt.

Im Jahr 2023 wurden in den Kleinzäunen auf der Struth und Am Spitzen Stein je zwanzig augenscheinlich gesunde und 20 an Mehltau erkrankte Keimlinge dauerhaft markiert. Im Jahr darauf wurde erstmals der Anteil weiterhin gesunder Pflanzen sowie die Mortalität ohne und mit Mehltau-Vorerkrankung erhoben. Nach einem Jahr waren in beiden Demonstrationsbeständen deutlich über 50 % der im Vorjahr als gesund eingeschätzten Sämlinge weiterhin frei von Mehltau (Tab. 15). Die Mortalität lag unter den Pflanzen mit Vorerkrankung bis zu zehnmal so hoch wie bei den gesunden (Tab. 15).

Tab. 15: Mehлтаubonitur auf den gezäunten waldbaupraktischen Anschauungsflächen auf der Struth und Am Spitzen Stein

Fläche	Anteil gesunder Keimlinge* (%)	Mortalität* (%)		Anzahl der Zaunflächen (N)
		ohne Mehltau	Mit Mehltau	
Am Spitzen Stein	64,4 (6,5)	4,3 (3,8)	40,0 (52,9)	6
Struth	57,4 (24,4)	1,4 (2,4)	5,0 (2,9)	7

*, Werte in Klammern, Standardabweichungen.

Ausblick:

Derzeit sind die waldbaupraktischen Anschauungsobjekte noch nicht so weit, so dass sie sich noch nicht für waldbauliche Bereisungen mit forstlichen Praktiker*innen eignen. Deshalb werden sie auch in den kommenden Jahren weiterhin hinsichtlich Lichtmanagement gepflegt sowie auf das Verjüngungswachstum, den Anteil gesunder Individuen und die Mortalitätsraten ohne und mit Vorerkrankung hin regelmäßig untersucht. Die Ergebnisse auf den Demonstrationsflächen werden einerseits zu den übrigen Erkenntnissen des MetaEiche-Projekts und andererseits zu weiteren Flächen in der Nachbarschaft in Beziehung gesetzt und den beteiligten Forstämtern in aufbereiteter Form zur Verfügung gestellt.

Als übrige Erkenntnisse des MetaEiche-Projekts wird auf das Kap. II.1.6 verwiesen. Andere Untersuchungsflächen sind

- a) der Bräuningerfels und der Staatswald-Bestand XXIV 8 c¹ Schaumertal für den Klausenberg und
- b) Brandwald und Bienenkopf für die Flächen Am Spitzen Stein und auf der Struth

Am Bräuningerfels wurden im Rahmen des APEK-Projekts (28WK400201) grundlegende Erkenntnisse über die Trockeneichen gewonnen, die im AQUAREL-Projekt (22WK413502) bestätigt wurden, und sich hier besonders anschaulich vermitteln lassen. Schaumertal zeigt die Möglichkeiten und Grenzen des Anbaus von Seestrandkiefern am Beispiel eines zweischichtigen Baumholzes. Brandwald und Bienenkopf sind ein Buchen-Durchforstungsversuch und ein Betriebsformenversuch, unter anderen auch an denen die Stressantwort der Buchen auf Durchforstung bzw. Lichtstellung derzeit klargestellt wird (FAWF-Projekt KW2100 im Auftrag der Landesregierung Rheinland-Pfalz).

II.1.2 Cytologische und molekulare Evidenzen für genetisch determinierte Resistenz bei Eichen gegen den Mehltaupilz

II.1.2.1 Methode zur kontrollierten Mehltauinfektion isolierter Eichenblätter:

Für das Screening auf genetische Mehltaresistenz von Eichen sollten möglichst das ganze Jahr über ein gleichförmig lebensfähiges Inokulum und vital, junge Eichenblätter zur Verfügung stehen. Wir haben ein Inokulationsverfahren entwickelt, das eine kontrollierte Infektion auf abgetrennten Eichenblättern ermöglicht. Die Sporen wurden mit frischen Mehltaukolonien bedeckten Blättern entnommen, die entweder aus dem Freiland oder -bevorzugt- aus Klimakammern der FAWF geerntet worden waren. Das nachstehend beschriebene Protokoll gewährleistet die reproduzierbare Herstellung von Inokulum, das für Dutzende von Inokulationen ausreichend ist:

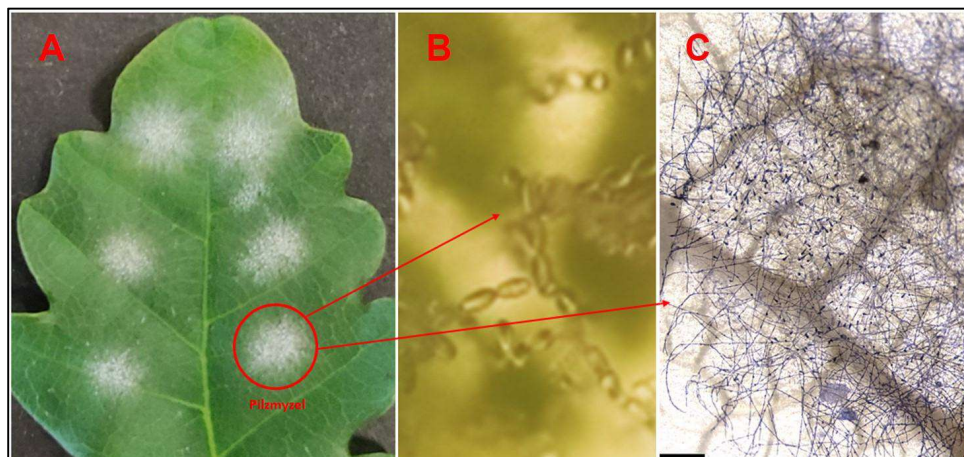


Abb. 18: Visuelle und mikroskopische Beobachtung acht Tage nach Inokulation (8 dpi) von abgetrennten Blättern der Traubeneiche mit Mehltausporen

Mehltaukolonien an den Impfstellen (A); Beobachtung von Konidienketten unter mit dem Binokular (B). Mikroskopische Mehltaukolonien (C).

- 0,25-1,0 g infiziertes Blattgewebe wird geerntet und in einen sauberen Behälter mit 50 ml sterilem Wasser überführt.
- Es wird 30 Sekunden gevortext, um die Sporen von den Blättern zu lösen.
- Die Suspension wird durch eine Schicht Glaswolle filtriert, um Gewebeteile und größere Partikel zu entfernen.
- Das Filtrat wird 5 Minuten bei 4.000 U/min zentrifugiert, um die Sporen zu pelletieren.
- Das Sporenpellet wird vorsichtig in 0,25-1,0 mL sterilem Wasser resuspendiert und bis zur Inokulation auf Eis aufbewahrt.
- Die Sporen werden mit einer Zählkammer unter dem Mikroskop ausgezählt und auf eine Konzentration von 50 Sporen/ μ l eingestellt.
- Mit einer Pipette werden 2,5 μ L (250 Sporen) Suspension als Tropfen auf die Blattoberfläche auftragen (6 Tropfen pro Blatt (s. Abb. 18).

Die inokulierten Blätter wurden auf feuchtem Papier bei 80-100 % Luftfeuchtigkeit, 21 °C/16 °C (Tag/Nacht) und einer Photoperiode von 16/8 Stunden inkubiert.

Auf suszeptiblen Blättern wurden 24 Stunden nach Inokulation (hpi) Infektionsstrukturen des Pilzes mikroskopisch beobachtet. 3-4 Tage nach Inokulation wurde Pilzmyzel gut sichtbar, und nach 8 Tagen waren die Pilzkolonien gut entwickelt (Abb. 18).

II.1.2.2 Reproduzierbare Färbeprotokolle:

Mit natürlich mehltauinfizierten Blättern haben wir drei Färbemethoden für die Untersuchung der Interaktion zwischen Eichenmehltau und Eiche optimiert, nämlich Färbungen mit Coomassie-Brilliantblue R250 für Proteine, mit Calcofluor White (CFW; Fluoreszenz) für Chitin und Cellulose und mit Oregon Green®-488-Weizenkeim Agglutinin-Konjugat (WGA; Fluoreszenz) für Proteinkonjugate und Lipide sowie als Sensor mäßig saurer Bereiche (Abb. 19).

Eichenpflanzen, die auf natürliche Weise mit Eichenmehltau (OPM) infiziert waren, wurden mit Oregon Green™ 488 WGA angefärbt. Die Proben wurden mit einem konfokalen Laser-Scanning-Mikroskop analysiert (Abb. 20). Die vom Mehltaupilz oberflächlich gebildeten Infektionsstrukturen können dabei mit hoher Auflösung sichtbar gemacht werden.

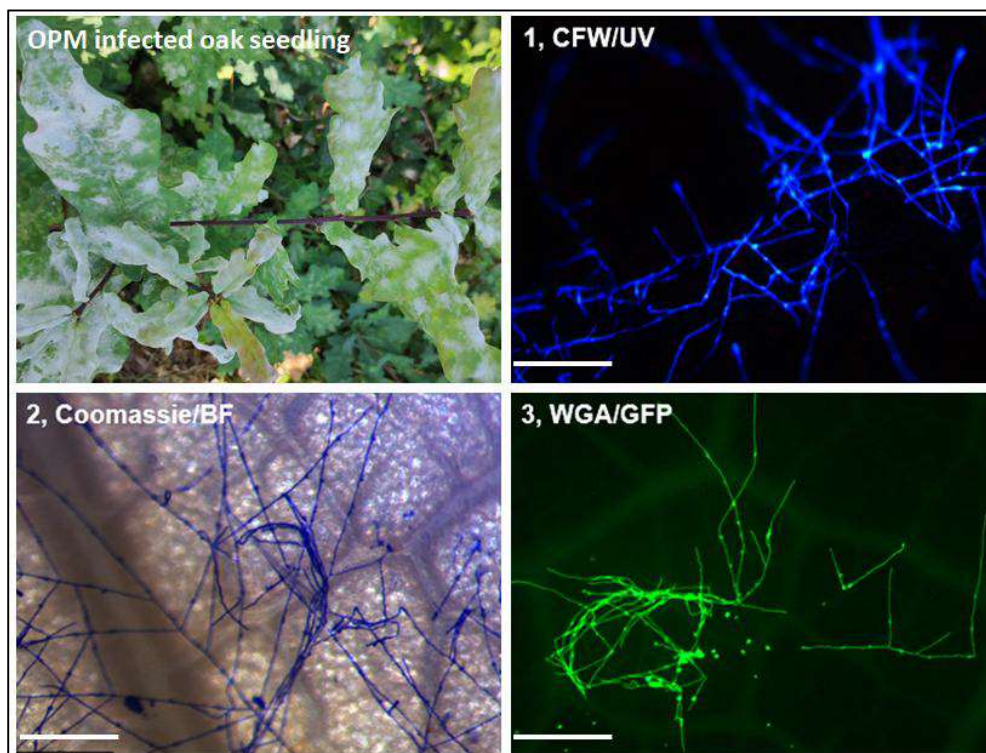


Abb. 19: Anfärbung der Zellstrukturen des Echten Mehltaus auf natürlich infizierten Blättern der Traubeneiche

1.CFW: Calcofluor White. UV: Ultraviolett-Filter (Fluoreszenz). 2.BF: Hellfeldmikroskopie. 3. WGA: Weizenkeim Agglutinin-Oregon Green®-488 Konjugat. GFP: GFP-Filter (Fluoreszenz). Die Balken entsprechen 200 µM.

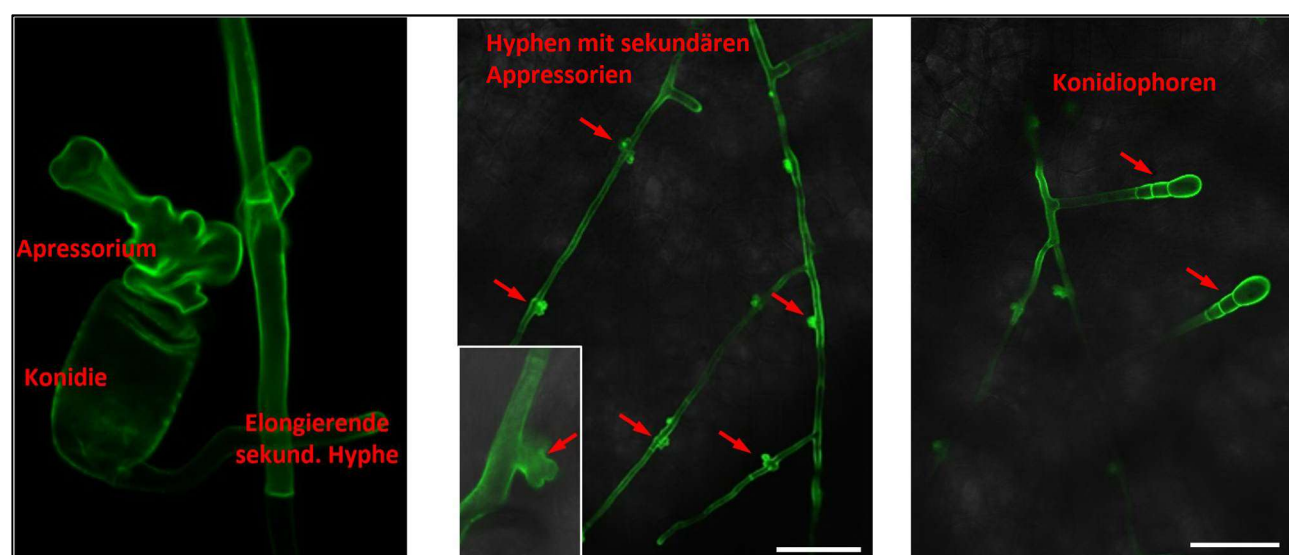


Abb. 20: Mit dem Konjugat WGA Oregon Green™ gefärbte Blattproben mit natürlicher Mehltauinfektion, betrachtet mit konfokaler Mikroskopie

II.1.2.3 Mehltau-Symptome auf Blättern aus Klimakammern und aus dem Freiland

Für die Inokulationsversuche wurden Blätter von Traubeneichen gesammelt, die unter kontrollierten Bedingungen in Klimakammern der FAWF oder unter natürlichen Bedingungen in einem Herkunftsversuch am forstlichen Genressourcenzentrum Antonihof bei Trippstadt gewachsen waren (wegen der Klimakammerexperimente vgl. Kap. II.1.1.4 und wegen des Herkunftsversuchs vgl. Kap. II.1.1.1).

Die mit Mehltausporen inokulierten Blätter wurden nach verschiedenen Zeitpunkten fotografiert. Bei Blättern von Pflanzen, die in Klimakammern gewachsen waren, waren bereits 1 Tag nach der Inokulation erste Anzeichen einer Infektion sichtbar. Ab dem dritten Tag nach der Inokulation wurden die Infektionssymptome klar sichtbar. Nach 4-10 Tagen nahmen die weißen, puderartigen Kolonien deutlich an Größe zu (Abb. 21).

Im Gegensatz zu den Blättern der Klimakammereichen zeigten die Blätter proleptischer Triebe in der zweiten Sommerhälfte aus dem Freiland trotz augenscheinlich identischer Entwicklungsstadien bei 1 dpi noch keine Anzeichen einer Infektion. Bei 3 dpi war an den meisten inokulierten Stellen zwar Mehltau-Myzel vorhanden, allerdings viel schwächer als auf den Blättern von Sämlingen aus den Klimakammern (Abb. 22 A). Anschließend stoppte die Entwicklung des Myzels weitgehend oder vollständig (Abb. 22 B). Fraglich ist ein Zusammenhang mit den Beobachtungen in Kap. II. 1.5.

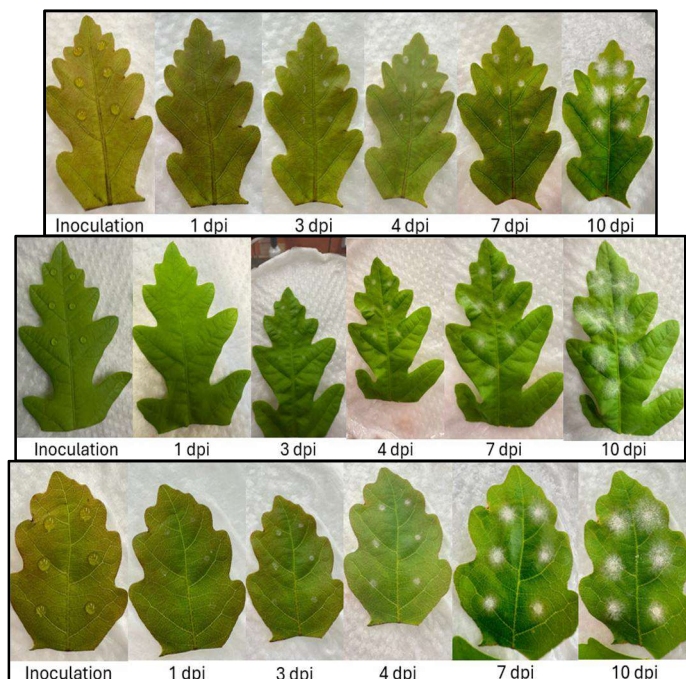


Abb. 21: Entwicklung der Mehltau-Symptome auf Blättern von unter kontrollierten Klimabedingungen in Klimakammern gewachsenen Sämlingen

In drei unabhängigen Inokulationsexperimenten wurde eine lineare Zunahme des Pilzmyzels im Laufe der Zeit beobachtet, bis hin zu voll entwickelten Kolonien.

Der quantitative Vergleich der Mehltauentwicklung zeigte auf Klimakammer-Blättern ab 3 Tagen nach Inokulation einen deutlichen und signifikanter Anstieg des Myzelwachstums. Im Gegensatz dazu blieb das Myzelwachstum auf den im Juli und August im Freiland gewachsenen Blättern während des gesamten Versuchs minimal und zeigte keine signifikante Zunahme der Infektion über 3 Tage hinaus (Abb. 23). Damit waren Blätter aus einem späteren Austrieb im Sommer nicht gut geeignet für Infektionsversuche (s.u.).

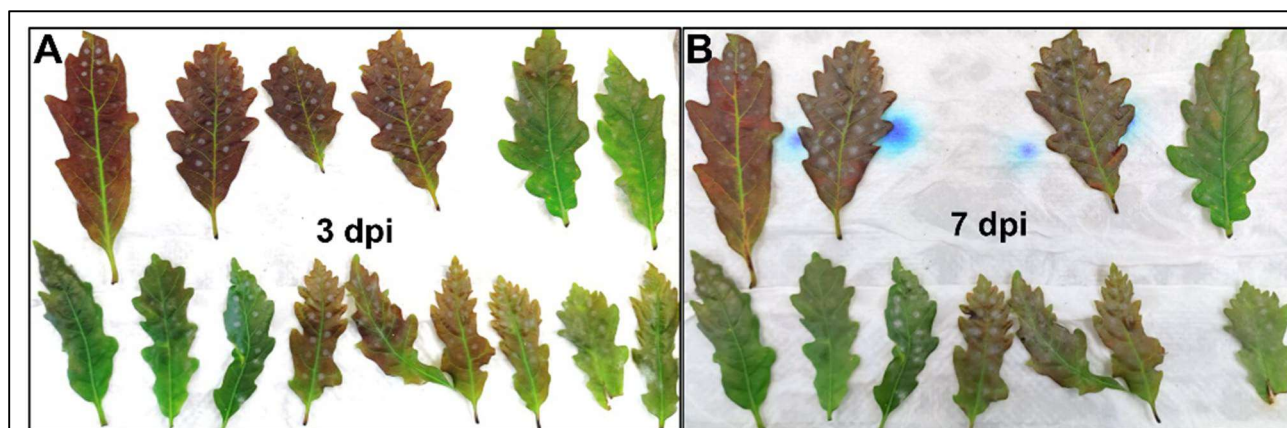
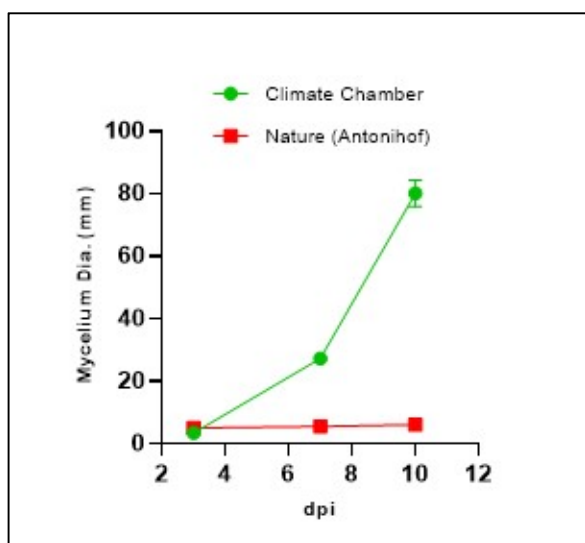


Abb. 22: Wachstum des Mehltau-Myzels auf abgetrennten Blättern von Traubeneichen, die auf dem Antonihof am 23.7.24 geerntet wurden.



Zu Abb. 22: Die Blätter wurden im Rahmen des MetaEiche-Nachfolgeprojekts EichenResist mit FAWF-Förderung untersucht. A: Bis 3 dpi wurde an den meisten Inokulationsstellen OPM-Myzel beobachtet. B: Das Bild bei 7 dpi zeigt eine minimale oder keine weitere Myzelentwicklung über 3 dpi hinaus. Zwei Blätter, die bei 3 dpi (A) evaluiert wurden, wurden für eine Färbung verwendet und sind in der Abb. 22 B nicht mehr enthalten.

Abb. 23: Myzeldurchmesser (mm) des Eichenmehltaus auf inokulierten Blättern aus einer Klimakammer (grüne Symbole; Daten aus Abb. 21) und auf Blättern, die im Juli und August aus dem Freiland am Antonihof gesammelt waren (rote Symbole, Abb. 22)

Daten aus Abb. 21, bis zu 10 Tage nach der Inokulation (dpi). Die Fehlerbalken repräsentieren den Standardfehler des Mittelwerts (SEM) aus drei unabhängigen Wiederholungen. Die Blätter aus dem Freiland wurden im Rahmen des EichenResist-Projekts entnommen und untersucht.

II.1.2.4 Mehltau-Quantifizierung mittels qPCR

Herkömmlichen Methoden zur Resistenzbewertung, wie der visuellen Bewertung und cytologischen Analysen, mangelt es oft an Empfindlichkeit und quantitativer Genauigkeit. Die qPCR-Methode erlaubt eine empfindliche und theoretisch genaue Messung der Pilzbiomasse. Zur Quantifizierung der Mehltauinfektion durch qPCR wurden Primer für die ITS-Region aller Eichenmehltauarten entwickelt (Abb. 24). Um Schwankungen bei den Probenmengen und der Effizienz der DNA-Synthese zu berücksichtigen, wurden zur Normalisierung in den qPCR-Assays GAPDH- und Aktin-Gene der Eiche als interne Referenzen verwendet.



Abb. 24: qPCR-Primer zur Sequenzierung einer ITS1-Region von Eichen infizierenden Mehltauarten.

Das Alignment zeigt die Sequenzen von *E. alphitoides*, *E. quercicola*, *E. hypophylla* und *E. epigena*. Die Positionen der Primer (OPM18S-F/ OPMITS-R2) sind gezeigt. Nicht konservierte Nukleotide zwischen den Arten sind rot hinterlegt.

Tab. 16: Sequenzen der verwendeten Primer und das Amplifikationsprotokoll gezeigt.

Gen	Primersequenzen (forward/revers)	Amplicon Länge (bp)
GAPDH	TGGTGATCAGGGTGGTGCTA/ TCAAGCGCAGGCTTGTACTC	140
Actin	TGGCTTACATTGCGCTTGAC/ CTGAACCGCTCAGCACCAAT	121
18S/ITS1	TCCGTAGGTGAACCTGCGGA/ CCGGCCCGCCAAAGCAAC	121

qPCR Protokoll: 95 °C: 3 min, (95 °C: 15 s, 60 °C: 1 min) x 40 Zyklen, Primer: 300 nM, gDNA: ~ 125 ng/ 12,5 µl Reaktion.

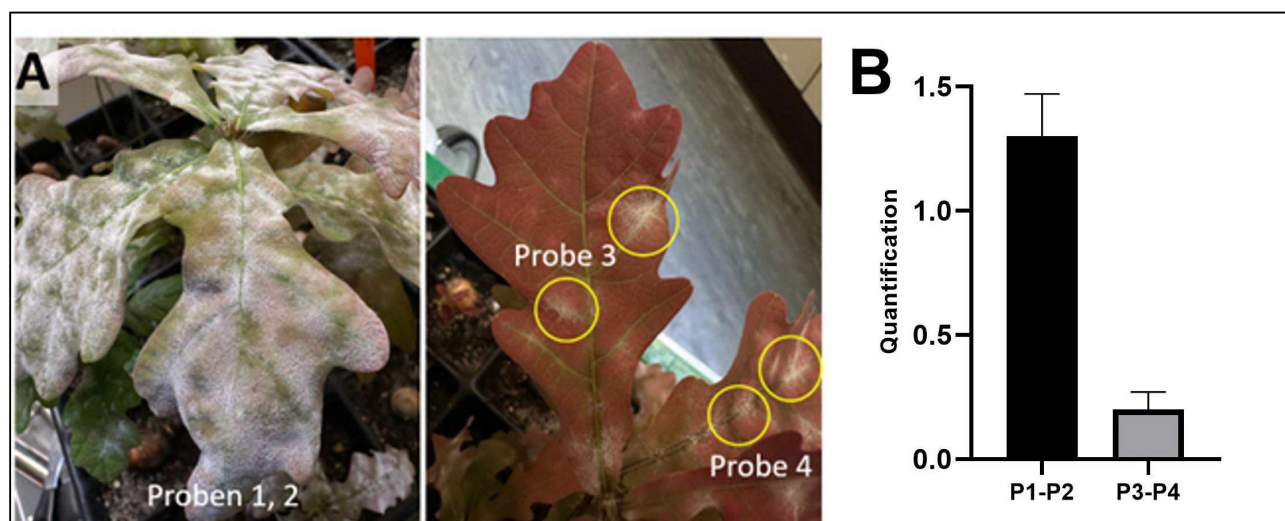


Abb. 25: Für die qPCR-basierte Quantifizierung des Eichenmehltaus verwendete, stark (Proben 1 und 2) und mäßig (Proben 3 und 4) mit Mehltau infizierte Eichenblätter (A). Mehltau-Quantifizierung von Proben infizierter Eichenblätter mit qPCR (B).

Zu A: Die für die DNA-Isolierung in den Proben 3 und 4 verwendeten Bereiche sind eingekreist.

Um die Eignung der qPCR für die Mehltau-Quantifizierung zu bewerten, wurde die genomische DNA aus mehltauinfizierten Traubeneichenblättern mit einer einfachen Mini-CTAB-Methode extrahiert (UNTERGASSER, 2008). Jeweils zwei Proben wurden von stark und von mäßig infizierten Blättern ausgewählt (Abb. 25 A). Mit den DNA-Proben dieser Mehltau-infizierten Blätter und für Mehltau spezifischen ITS-Primern (Tab. 16) wurde eine vergleichende qPCR-Analyse durchgeführt. Die Analyse ergab einen 6,4-fache Anstieg der Mehltau-DNA in stark infizierten Proben im Vergleich zu solchen mit mäßigem Infektionsgrad (Abb. 25 B). Die qPCR-Analyse ist demnach grundsätzlich für die Quantifizierung der Mehltauinfektion geeignet.

II.1.2.5 Reaktionen von Traubeneiche, Zerreiche und Roteiche auf Mehltau-Inokulation

Ein Ziel des MetaEiche-Projekts war die Untersuchung der Mechanismen genetisch determinierter Mehltauresistenz. Hierzu wurde die Entwicklung der Mehltausymptome auf abgetrennten Blättern von Traubeneiche (*Quercus petraea*), Zerreiche (*Q. cerris*) und Roteiche (*Q. rubra*) auf Mehltauinokulation verglichen (Abb. 26). Während die Traubeneiche empfindlich gegen den Mehltau ist, zeigt Zerreiche eine partielle und Roteiche eine vollständige Resistenz. Bei Traubeneiche waren bereits im frühen Stadium von 1 dpi erste Anzeichen einer Infektion sichtbar (Abb. 26 B). Die Entwicklung der Symptome schritt bis 3 dpi voran (Abb. 26 C), und nach 7-10 dpi nahmen die weißen, pulverförmigen Infektionen an Größe zu, und es waren gut abgegrenzte, voll entwickelte Pilzkolonien zu sehen (Abb. 26 D-E). Im Gegensatz dazu zeigten Blätter der Zerreiche bis nach 7 dpi und Blätter der Roteiche bis nach 10 dpi keine sichtbaren Infektionssymptome (Abb. 26 F-I, 26 K-O). Allerdings wurden auf Zerreiche in zwei von drei Experimenten nach 10 Tagen braune Flecken auf den Inokulationsstellen sichtbar (Abb. 26 J). Diese Beobachtung ähnelt dem Bericht von EDWARDS & AYRES (1981), dass mehrere Tage nach der Inokulation die Blätter der Zerreiche nur wenig Pilzmyzel auf ihrer Oberfläche entwickelten, aber zahlreiche braune, nadelstichartige Flecken aufwiesen.

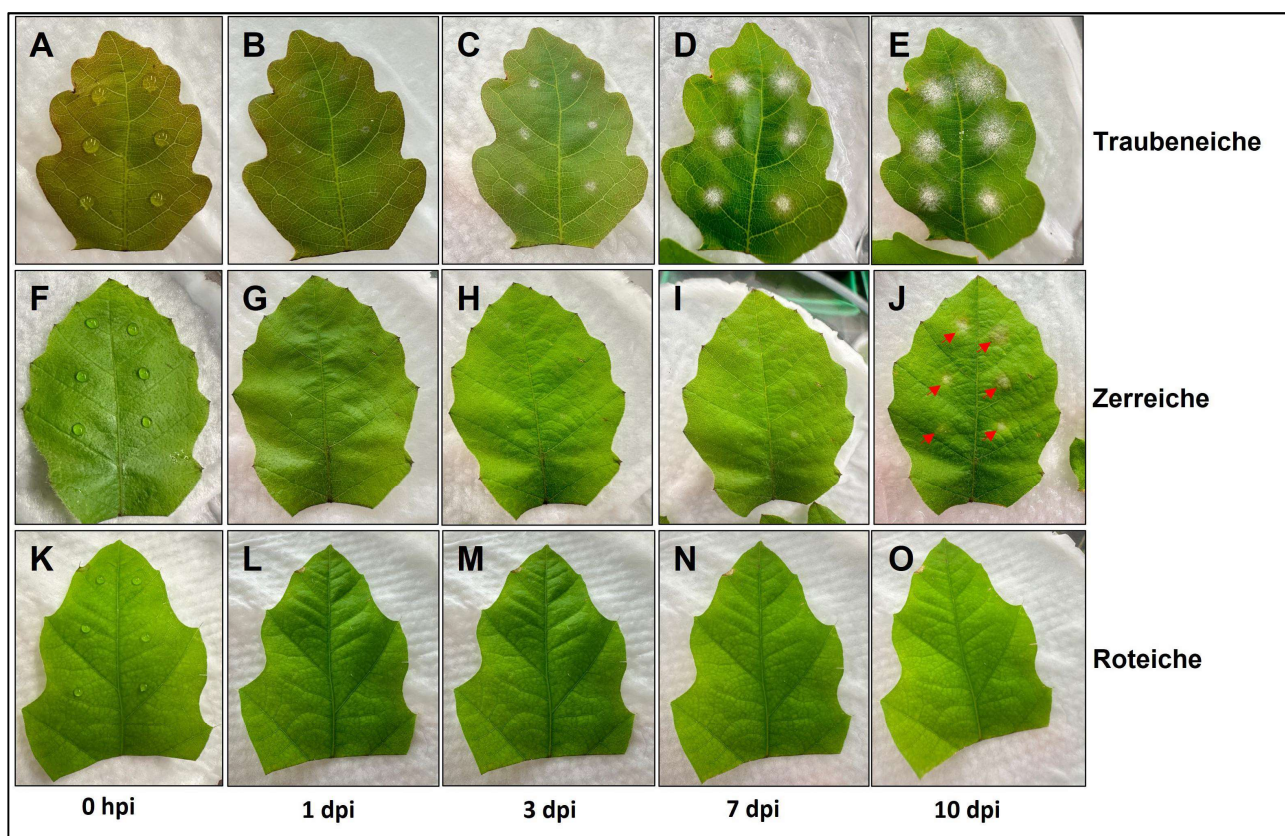
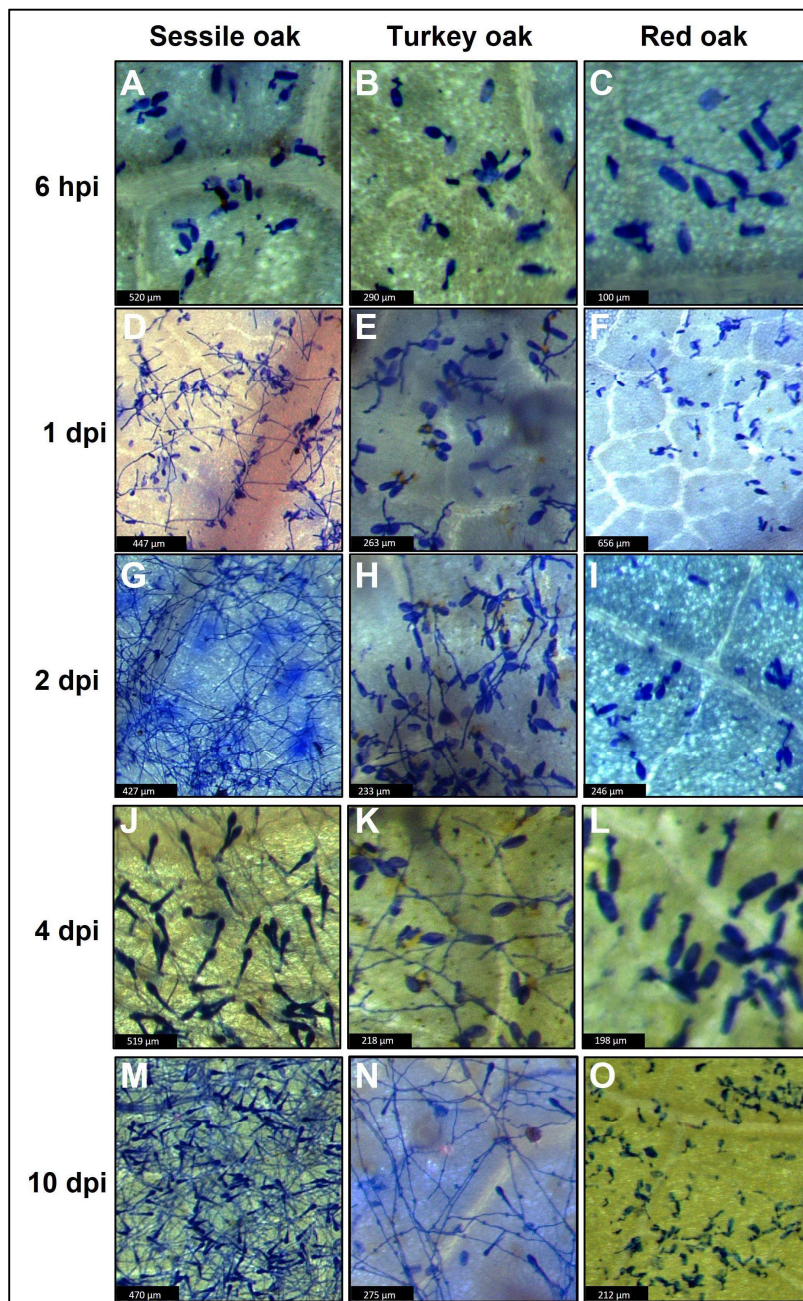


Abb. 26: Entwicklung von Mehltau-Infektionssymptomen auf abgetrennten Blättern nach Inokulation von Traubeneiche (A-E), Zerreiche (F-J) und Roteiche (K-O)

Die roten Pfeile zeigen braune Flecken an den Inokulationsstellen der Zerreiche (10 dpi), die auf eine zelluläre Abwehr hindeuten.

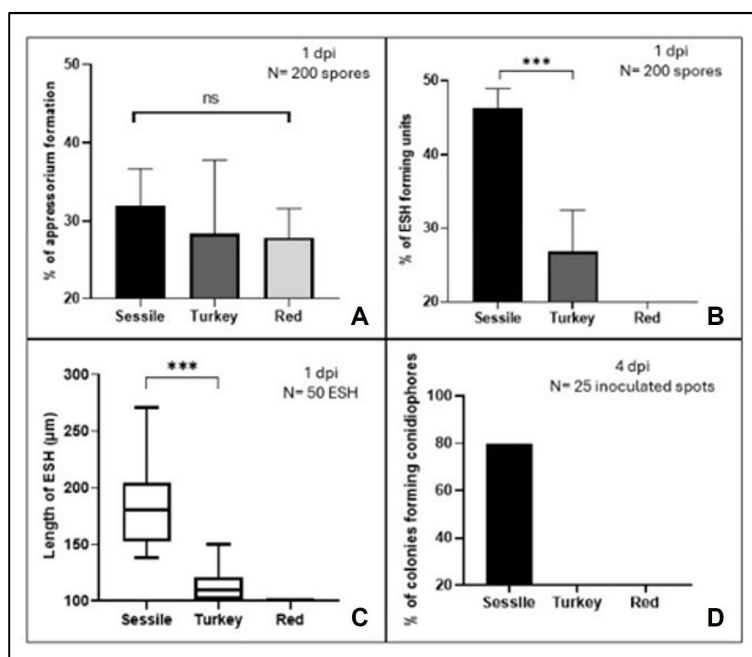
Nach 6 hpi sowie 1, 2, 4 und 10 dpi wurden die inokulierten Blätter in Streifen geschnitten, mit Coomassie Brilliant Blau gefärbt und mikroskopiert (Abb. 27). Die Bildung von Appressorien war bei allen drei Eichenarten nach 6 hpi erkennbar (Abb. 27 A-C). Bei der Traubeneiche waren elongierende Sekundärhyphen (ESH) bereits nach 1 dpi deutlich entwickelt (Abb. 27 D). Die ESH bildeten 2 dpi ein Netzwerk von Hyphen (Abb. 27 G), und 4 dpi hatten die meisten Kolonien Konidiophoren mit Konidien gebildet (Abb. 27 J). Bei der Zerreiche wurden



ebenfalls ESH gebildet, allerdings in geringerem Umfang und stark verlangsamt (Abb. 27 E, H). Die Konidiophorenbildung war verzögert und deutlich reduziert, und es wurde nur sehr wenige Konidien bei 10 dpi beobachtet (Abb. 27 N). Bei Blättern der Roteiche wurde das Pilzwachstum im Appressorienstadium vollständig gestoppt (Abb. 27 F, I, L, O), da es keine ESH-Bildung gab. Dies deutet darauf hin, dass die Bildung von Haustorien, die essenziell für die weitere Entwicklung des Pilzes ist, nicht stattgefunden hat.

Zur vollständigen vergleichenden Bewertung des Infektionsverhaltens von Mehltau auf Traubeneiche, Zerreiche und Roteiche wurde eine quantitative mikroskopische Analyse durchgeführt. Die Parameter, die für die quantitative Analyse ausgewählt wurden, waren der Anteil der Sporen, die Appressorien gebildet hatten, der Anteil der ESH mit Sporen ($n=200$ Sporen), die Länge der ESH ($n=50$ ESH) nach 1 dpi, und der Anteil der Kolonien, die nach 4 dpi Konidiophoren gebildet hatten ($n=25$ inokulierte Stellen).

Abb. 27: Mikroskopische Aufnahmen von Blättern nach kontrollierter Mehltauinokulation auf Blättern von Traubeneiche (linke Spalte), Zerreiche (Mittlere Spalte) und Roteiche (rechte Spalte).



Der Anteil an Sporen, die bei 1 dpi Appressorien gebildet hatten, war bei den drei Eichenarten nicht signifikant unterschiedlich (Abb. 28 A). Dies zeigt, dass es bis zum Stadium der Appressorienbildung noch keine Unterschiede im Infektionsverhalten des Eichenmehtaus auf empfindlichen und resistenten Eichenblättern gibt.

Abb. 28: Quantitative Analyse der Mehltauentwicklung auf verschiedenen Eichenarten (A: Appressorienbildung; B: Bildung von elongierenden sekundären Hyphen (ESH); C: Länge der ESH, und D: Anteil der Kolonien, die Konidiophoren gebildet hatten).

Die Ergebnisse zeigen Mittelwerte und Standardabweichungen aus zwei unabhängigen Versuchen. ***: Signifikante Unterschiede gemäß Tukey's HSD-Test bei $p < 0,001$.

Die Entwicklung von ESH war bei Traubeneiche bereits nach 1 dpi deutlich ausgeprägt, während bei Zerreiche die Sporen entweder im Entwicklungsstadium des Appressoriums stehen blieben oder weniger entwickelte ESH aufwiesen, und bei Roteiche die ESH-Bildung vollständig unterdrückt war (Abb. 28 B). Der Prozentsatz der ESH-bildenden Einheiten sowie die Länge der ESH bei Zerreiche waren im Vergleich zu Traubeneiche bei 1 dpi signifikant reduziert, und bei Roteiche vollständig unterdrückt war (Abb. 28 B, c). Darüber hinaus zeigte sich bei 4 dpi eine Konidiophorenbildung bei Traubeneiche mit ca. 80 % der Kolonien, die Konidiophoren gebildet hatten, während bei Zerreiche und Roteiche keine Konidiophoren gebildet wurden (Abb. 28 D). Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass sich die partielle Resistenz bei Zerreiche auf zwei Ebenen manifestiert:

- 1) Eine teilweise Hemmung und verlangsamte ESH-Bildung und
- 2) eine vollständige Hemmung der Konidiophorenbildung.

Die Immunität von Roteiche zeigte sich nach der Appressorienbildung durch die vollständige Hemmung der ESH-Bildung. Diese Art der Resistenz wird als Penetrationsresistenz bezeichnet (JOHANSSON *et al.*, 2014).

II.1.2.6 Zelluläre Resistenzreaktionen bei Eichenarten

Um die möglichen zellulären Resistenzmechanismen zu untersuchen, die speziell bei der partiellen Resistenz von Zerreiche und der Resistenz von Roteiche gegen Mehltau eine Rolle spielen könnten, wurden die inokulierten Blätter histochemischen Färbungen mit DAB (Abb. 29), Trypanblau (Abb. 30), und Anilinblau (Abb. 31), unterzogen, um die Ablagerung von der ROS-Produktion (DAB färbt H_2O_2), den Zelltod (tote Pflanzenzellen werden mit Trypanblau gefärbt) und Kallose (Anilinblau färbt Callose-Ablagerungen in der pflanzlichen Zellwand mit blauer Fluoreszenz) sichtbar zu machen. Die mikroskopische Analyse der gefärbten Blattgewebe zeigte keine eindeutigen Hinweise auf ROS-Produktion und Zelltod bei Traubeneiche, Zerreiche und Roteiche. Auf den Blättern der Zerreiche wurden Calloseablagerungen unter einigen Appressorien beobachtet, die auf

eine zelluläre Abwehrreaktion gegen den eindringenden Mehltaupilz hindeuten. Dagegen wurden weder bei der sensitiven Traubeneiche noch bei der resistenten Roteiche Hinweise auf Kallose an den Infektionsstellen gefunden.

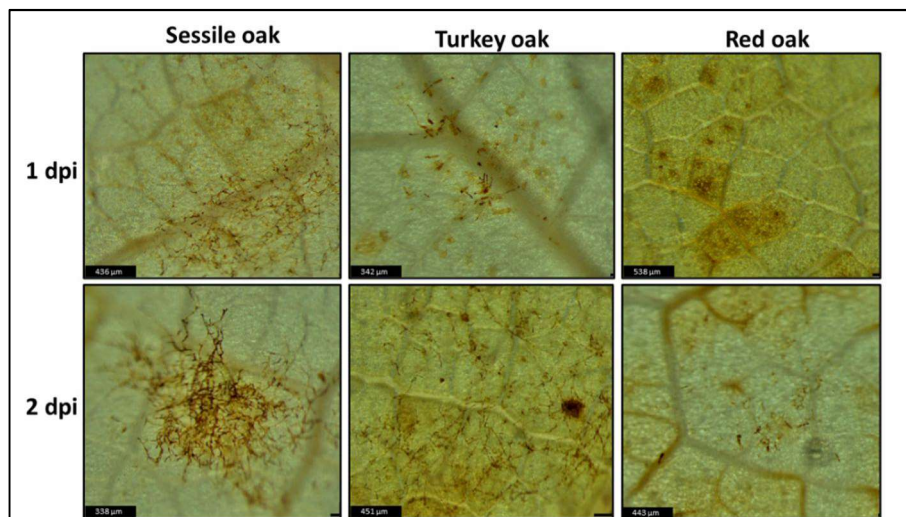


Abb. 29: Mikroskopische Aufnahmen von DAB-gefärbtem Blattgewebe der drei Eichenarten.

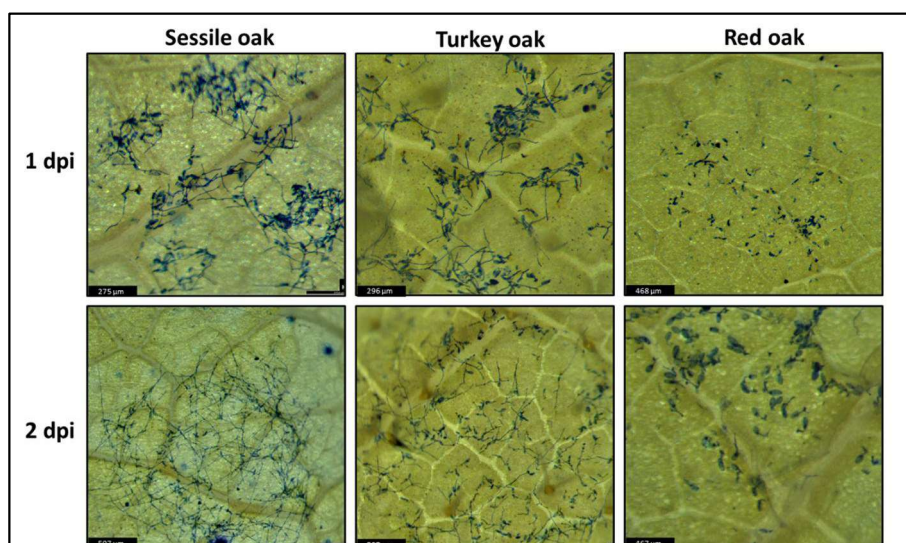


Abb. 30: Mikroskopische Aufnahmen von Trypanblau-gefärbtem Blattgewebe der drei Eichenarten.

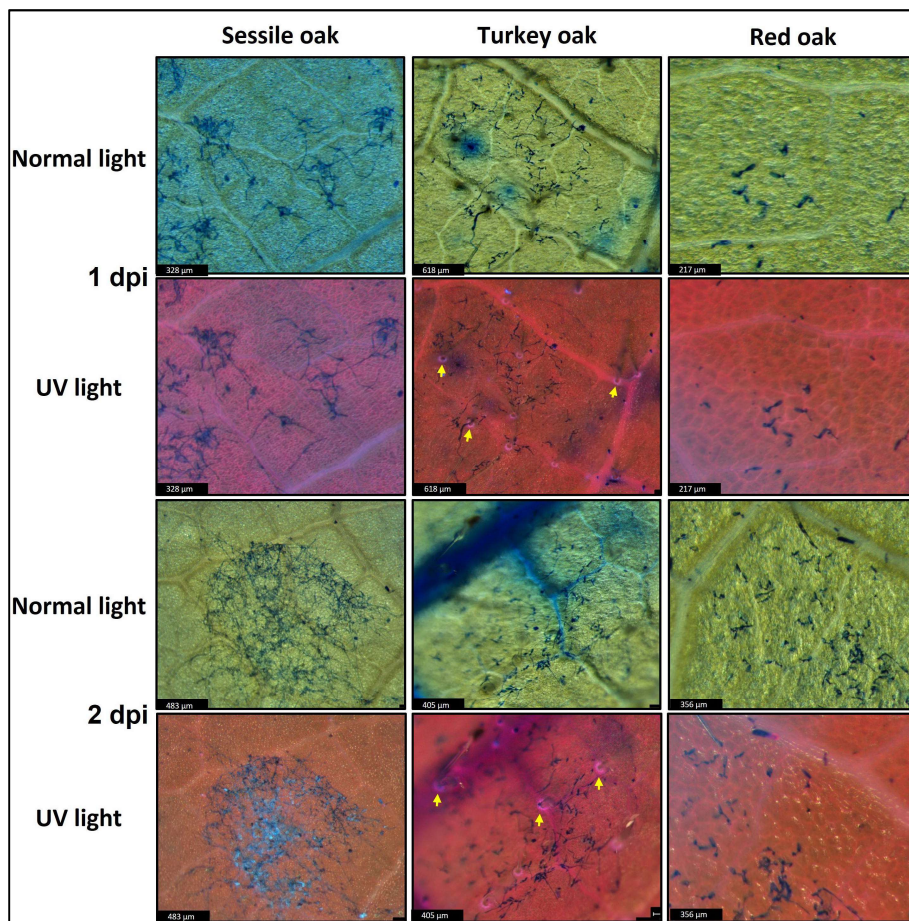


Abb. 31: Licht- und Fluoreszenzmikroskopische Aufnahmen von anilinblau gefärbtem Blattgewebe der drei Eichenarten.

Hinweise auf Calloseablagerungen sind mit gelben Pfeilen markiert.

II.1.2.7 Durch Mehltau induzierte Genexpression in Eichenblättern

Die Auswahl stabil exprimierter Referenzgene (RGs) ist notwendig zur Gewährleistung der Genauigkeit der Reversen Transkription - quantitativen PCR (RT-qPCR) zur Analyse der Genexpression. Von den bei Pflanzen (inkl. Bäumen) verwendeten RGs wurden Actin und GAPDH in Vorversuchen als am besten geeignet identifiziert. Das bei Pflanzen nach biotischem Stress stark induzierte Pathogenesis-Related Protein 1 (PR1) wurde zur Untersuchung der Reaktion von Eichen auf Mehltauinfektion verwendet. Die verwendeten Primer für diese Gene zeigten akzeptable Primereffizienzen (Tabelle 17).

Tabelle 17: Beschreibung der Kandidaten-Referenzgene und Primersequenzen für die qRT-PCR

Gen	Protein	Accession	Primersequenzen (forward/reverse)	Amplicon Länge (bp)	Referenz
GAPDH	Glyceraldehyde 3-phosphate dehydrogenase	XM_050420371.1	ACCGACTTCATTGGTGACAG/ AGATGCGATGTGGACAATCA	150	KONTRADE <i>et al.</i> (2019)
Act	Actin	XM_050394512	GCTCCACCCGAGAGGAAGTA/ CTATGCACAATTGATGGCCCCG	126	MetaEiche
PR1	Pathogenesis-related protein 1	XM_050404704	GGGTAGSAGAGAAGCCCAAG/ CAAACGCACTGAGYTGCTCC	101	MetaEiche

Abgetrennte Blätter der Traubeneiche wurden mit Mehltau inokuliert, und die Kontrollblätter mit Wasser behandelt. 24 h nach der Inokulation wurde die Gesamt-RNA aus den Blättern extrahiert, und eine RT-qPCR durchgeführt. Das Expressionsniveau von PR1 wurde mit den Genen für GAPDH und Actin normalisiert. Nach Infektion wurde eine geringe (ca. 1,6-fache), aber dennoch signifikante Induktion der PR1-Expression beobachtet (Abb. 32). Allerdings wiesen die Ergebnisse eine hohe Varianz bei den gesunden und den infizierten Proben auf, was auf eine erhebliche Variabilität zwischen den biologischen Replikaten schließen lässt.

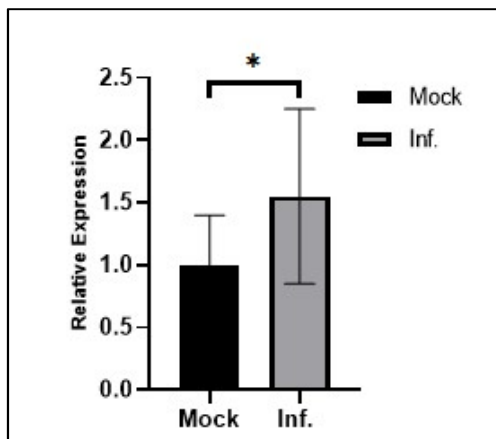


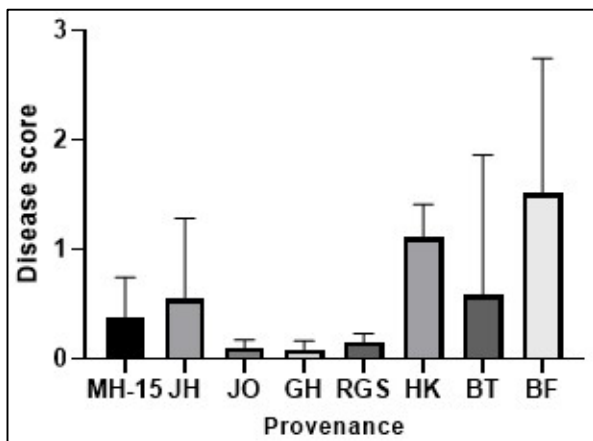
Abb. 32: Relative Expression von QrPR1 in gesunden und Mehltau-infizierten Traubeneichenblättern (24 hpi).

Die Unterschiede waren statistisch signifikant ($p < 0,05$).

II 1. 2.8 Phänotypische Bewertung des Mehltaubefalls an Sämlingen verschiedener Provenienzen

Am Antonihof in Trippstadt sind gepflanzte Sämlinge von 11 rheinland-pfälzischen Provenienzen jährlich auf Mehltautoleranz bonitiert worden, teilweise auch im Rahmen des MetaEiche-Projekts (vgl. auch Kap. II.1.1 & Kap. II.1.1.2). In den Jahren 2020 bis 2024 schon hatten sich die Pflanzen aus Rheingrafenstein (RGS) bei Bad Kreuznach als weitgehend resistent gegen Mehltau erweisen. Im Gegensatz dazu waren die Pflanzen wechselnder Herkünfte, darunter Heidenkopf (HK) überwiegend anfällig für Mehltau.

Im August 2024 wurden Sämlinge von acht Herkunftten am Antonihof im Rahmen des EichenResisT-Projekts erneut auf Mehltauinfektion bonitiert. Der Infektionsgrad wurde anhand einer sechsstufigen Skala bewertet: 0 = kein Befall, 1 = leichter Befall (0-10% der Blattoberfläche befallen), 2 = mäßiger Befall (10-50% der Blattoberfläche befallen), 3 = starker Befall (>50% der Blattoberfläche befallen), 4 = sehr starker Befall (>50% der Blattoberfläche befallen mit etwas Nekrose) und 5 = vollständig nekrotisches Blatt. Die Bewertungen wurden am zweiten und fünften Blatt von der Basis des Triebes an 2-3 Ästen pro Baum durchgeführt. Die mittleren Krankheitsbewertungen für Eichenmehltau variierten erheblich zwischen, aber z.T. auch innerhalb der Provenienzen (Abb. 33). Die Provenienzen Bräuningerfels (BF) und HK wiesen die höchste Krankheitsinzidenz auf, mit mittleren Werten nahe 3, was eine erhebliche Anfälligkeit bedeutet. Im Gegensatz dazu wiesen Herkunftte



wie Jockers (JO), Gehennes (GH) und RGS nur minimale Krankheitssymptome auf, mit mittleren Werten nahe 0, was auf eine Infektionsresistenz hindeutet. Ein mittleres Maß an Krankheitsschwere wurde bei Provenienzen wie Jägerhübel (JH) und Bäckertälchen (BT) beobachtet. Diese Daten stimmen weitgehend mit den in den Jahren zuvor von unserem Projektpartner erhobenen Boniturdaten überein (Abb. 6).

Abb. 33: Ergebnis der Mehltaubonitur von verschiedenen Herkunftten am Antonihof (August 2024).

Die x-Achse zeigt die Provenienzen, die y-Achse die Krankheitsbewertungen auf einer Skala von 0 bis 3.

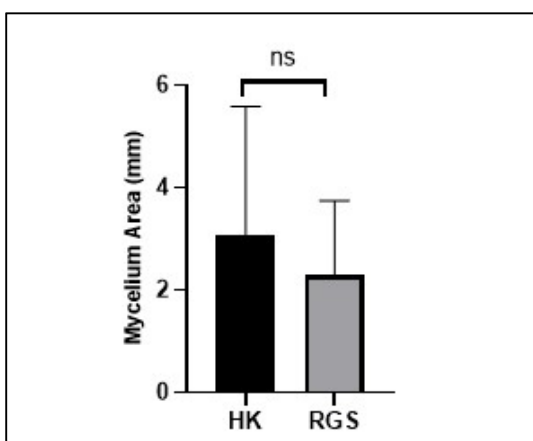


Abb. 34: Myzelentwicklung (3 dpi) auf Blättern von Eichen der Heidenkopf- (HK) und Rheingrafenstein- (RGS) Herkunftte.

Um die im vorangehenden Abschnitt beschriebenen Boniturdaten zu prüfen, wurden im Juli und August 2024 als Teil des EichenResisT-Projekts sechs Pflanzen der Herkunft HK und fünf Pflanzen der Herkunft RGS für einen ersten Infektionsversuch mit isolierten Blättern ausgewählt. Leider wurde im Frühjahr 2024 der erste Austrieb der Eichenblätter auf dem Antonihof durch einen Spätfrost stark geschädigt, sodass wir für die Resistenzstudien auf die Blätter des späteren Austriebs zurückgreifen mussten.

Insgesamt wurden 34 Inokulationsstellen von Blättern aus RGS und 26 Tropfen von Blättern aus HK bei 3 dpi ausgemessen, und die Myzelentwicklung mit ImageJ quantifiziert. Die ermittelten Myzelflächen zeigten keine signifikanten Unterschiede zwischen der Herkunft HK (Mittelwert = 3,1 mm², SD = 1,4) und der Herkunft RGS (Mittelwert = 2,3 mm², SD = 2,5; Abb. 34). Allerdings war wegen der geringen Vitalität der im Sommer geernteten Blätter die Aussagekraft dieses Experiments nur gering, und eine Untersuchung von Resistenzreaktionen, die in der mittleren oder späten Infektionsphase (nach 5-10 dpi) auftreten können, war nicht möglich.

Im kommenden Frühjahr 2025 sollen die Versuche im Rahmen des EichenResisT-Projekts mit Blättern des ersten Austriebs wiederholt werden, um zuverlässige Ergebnisse des Resistenzscreenings mit den Pflanzen der verschiedenen Provenienzen zu erhalten. Um das Problem der unsicheren Witterungsverhältnisse für zukünftige Versuche auszuschließen, hat die FAWF zwischenzeitlich Saatgut der Herkünfte RGS und HK gewonnen und die Pflanzen daraus in Klimakammern kultiviert. Die Blätter der Sämlinge sind aktuell für das Screening mit abgetrennten Blättern verfügbar. Wir erwarten, dass damit einheitliche und reproduzierbare Bedingungen bis zu 7-10 dpi gegeben sind, und ein größeres Zeitfenster zur Identifizierung von Unterschieden bei der Mehltau-Entwicklung zur Verfügung steht. Die Studie wird von uns aus eigenen Mitteln mindestens bis zum Sommer 2025 fortgesetzt.

II.1.2.9 Diversität von *Erysiphe* spp. in der Region Kaiserslautern

Um das Vorkommen verschiedener Mehltau-Arten in der Umgebung von Kaiserslautern zu bestimmen, haben wir über einen Zeitraum von drei Jahren 53 Mehltau-infizierte Blattproben gesammelt (Tabelle 18) und die Gesamt-DNA isoliert. Die Sequenzierung der ITS-Region der ribosomalen DNA erlaubt die Identifizierung von Pilzarten. Für die Amplifikation wurden mehltauspezifische Primer (PMITS1/PMITS2) verwendet (CUNNINGTON *et al.*, 2003). Die PCR-Amplifikation der DNA mehltauinfizierter Blätter ergab Fragmente von ca. 800 bp. Von 20 sequenzierten PCR-Produkten zeigten 18 eine 100%ige Identität mit der *E. alphetoides*-Referenzsequenz (EF672350, MOUGOU *et al.*, 2008), und zwei Proben eine 100%ige Identität mit der *E. quercicola*-Referenzsequenz (EF679204). Mit den übrigen 33 Proben wurde eine ITS-RFLP-Analyse durchgeführt. Von diesen zeigten 31 ein RFLP-Muster, das mit *E. alphetoides* übereinstimmte, während zwei Proben *E. quercicola* entsprachen. Unsere ITS-Sequenzen von *E. alphetoides* und *E. quercicola* wurden im NCBI unter den Accession-Nr. OR652394 bzw. OR652363 hinterlegt.

Tab. 18: Beschreibung der Proben, die für die Untersuchung des Vorkommens von Eichenmehltauarten verwendet wurden.

Proben Symbol	Datum	Wirtsart	Herkunft
KL1-KL7	Sep 2021	<i>Q. robur</i>	Kaiserslautern
KL8-KL9	Sep 2021	<i>Q. petraea</i>	Kaiserslautern
KL10-KL13	Sep 2021	<i>Q. robur</i>	Kaiserslautern
Hb-1	Okt 2021	<i>Q. petraea</i>	Hornbach
KL14-KL16	Juli 2023	<i>Q. petraea</i>	Trippstadt
TO-1	Juli 2023	<i>Q. cerris</i>	Trippstadt
HSK1-HSK7	Aug 2023	<i>Q. petraea</i>	Sommerkopf
JH1-JH13	Aug 2023	<i>Q. petraea</i>	Jägerhübel
KS1-KS2	Aug 2023	<i>Q. robur</i>	Küssel
SO1-SO13	Juni 2024	<i>Q. petraea</i>	Trippstadt
RO1	Feb 2024	<i>Q. rubra</i>	Trippstadt
RO2	Apr 2024	<i>Q. rubra</i>	RPTU Kaiserslautern
RO3	Juli 2024	<i>Q. rubra</i>	RPTU Kaiserslautern
RO4-RO5	Sep 2024	<i>Q. rubra</i>	RPTU Kaiserslautern

Ein phylogenetischer Baum der erhaltenen ITS-Sequenzen wurde mit Hilfe der Neighbour-joining-Methode erstellt. ITS-Sequenzen von 30 *Erysiphe*-Arten, die mit *Quercus* spp. assoziiert sind, und anderen eng verwandten Mehltau-Arten wurden vom NCBI entnommen. Die Sequenzen wurden mit MUSCLE in MEGA11 (TAMURA *et al.*, 2021) ausgerichtet. Der Baum der maximalen Kladenzugehörigkeit ist in Abb. 35 dargestellt. Die ITS-Sequenz von *E. quercicola* ist die erste, die aus Deutschland beschrieben wurde.

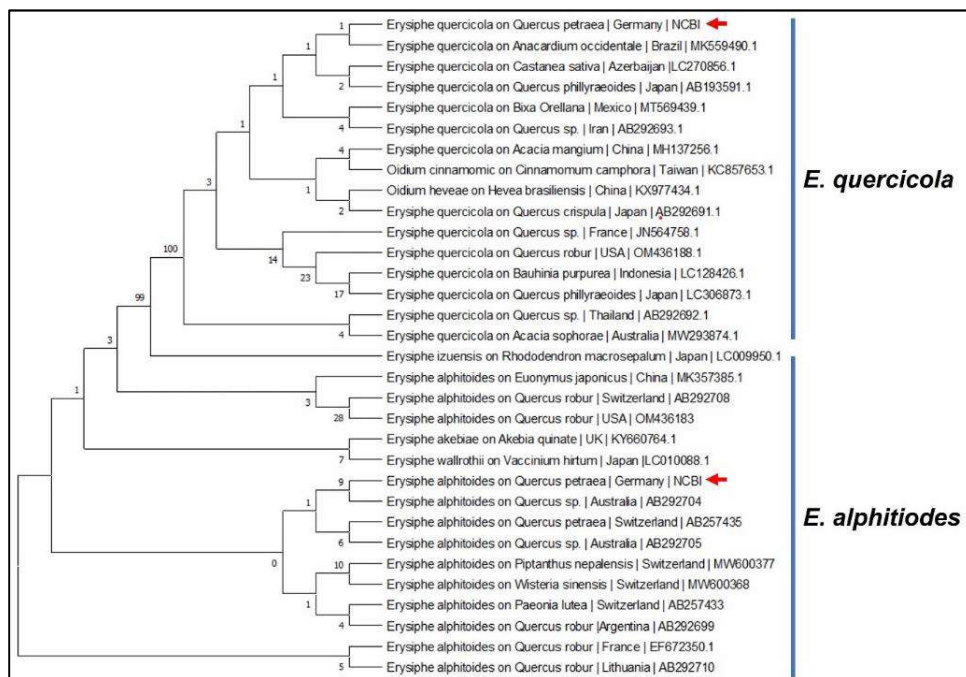


Abb. 35: Phylogenetischer Maximum-Likelihood-Baum mit ITS-Sequenzen von Eichen-assoziierten Mehltau-Arten.

Die mit Pfeilen markierten Sequenzen wurden in dieser Arbeit erhalten. *Erysiphe izuensis* wurde als Outgroup-Taxon ausgewählt.

II.1.2.10 Aktivität von Vescalagin und Castalagin gegen Eichenmehltau

Tannine sind eine vielfältige Gruppe von wasserlöslichen Polyphenolen. Diese Verbindungen sind für Pflanzen lebenswichtig und spielen eine wichtige Rolle bei der Stressreaktion und der Abwehr von pathogenen Mikroorganismen (KACZMAREK, 2020). Castalagin und Vescalagin sind Ellagtannine und kommen in hohen Konzentrationen (bis zu 10,5 mg g⁻¹) im Holz von Bäumen wie Eiche und Kastanie vor (MARINOV *et al.*, 1997). Antimikrobielle Wirkungen von Tanninextrakten wurden sowohl gegen grampositive als auch gramnegative Bakterien nachgewiesen (ARAÚJO *et al.*, 2021). In Erdbeerblättern und -früchten erhöhte die Behandlung mit Benzothiadiazol die Konzentration an phenolischen Verbindungen, insbesondere Ellagtannine, und die Resistenz gegen Mehltau (HUKKANEN *et al.*, 2007). Eine Blattvorbehandlung mit 2µM HeT (ein penta-verestertes Ellagitanin aus Erdbeerblättern) führte zu einer induzierten Resistenz von Erdbeer- und Zitronenpflanzen gegen *Colletotrichum acutatum* und *Xanthomonas citri* (MAMANI *et al.*, 2012). Gerbstofffraktionen aus Edelkastanienholz, die reich an Vescalagin und Castalagin sind, hemmten phytopathogene Pilze in vitro (ROMANI *et al.*, 2021). Auf eine möglicherweise bedeutende Rolle der Ellagtannine für die Abwehr des Mehltaus deuteten bereits unsere Messungen von gesunden und mehltauinfizierten Blättern hin (II.1.1.5).

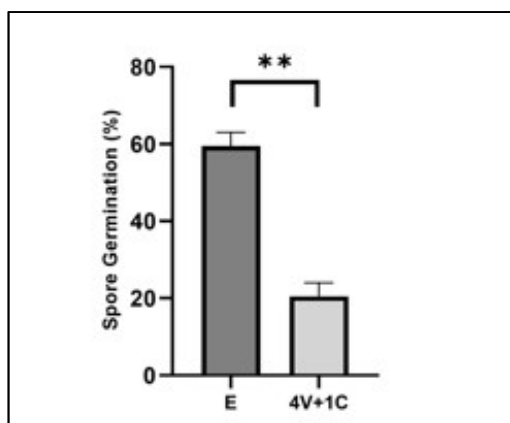


Abb. 36: Sporenkeimung in Prozent auf Objektträgern, die entweder mit 50% Ethanol (E) oder 4V+1C behandelt wurden.

** Signifikanter Unterschied bei $p < 0,01$ ($n = 200$ Sporen).

Vor diesem Hintergrund wurden im Rahmen des EichenResisT-Projekts Experimente zur Untersuchung der Auswirkung der Ellagitannine auf die Keimung von *E. alphitoides*-Sporen und die Mehltauinfektion von Blättern angestellt. Die Versuche werden hier vorgestellt, weil sie die MetaEiche-Resultate sinnvoll abrunden. Für die Experimente wurden Vescalagin und Castalagin (jeweils 1 mM) in einem Verhältnis von 4:1 in 50 % Ethanol (EtOH) gelöst, um eine 4V+1C-Mischung (0,8 mM/ 0,2 mM) zu erhalten. Sporenkeimungstests auf Glas-Objektträgern zeigten eine signifikante Hemmung der Keimung in Gegenwart der 4V+1C-Mischung im Vergleich zur Kontrolle (Abb. 36).

Zur Untersuchung der Auswirkung der Ellagitannine auf die Mehltauinfektion wurde 4V+1C auf die rechte adaxiale Seite junger Stieleichen-Blätter aufgetragen, die Kontrollstellen erhielten 50% Ethanol. Nach dem Trocknen hinterließen sowohl 50 %iges EtOH als auch 4V+1C vernachlässigbare Rückstände auf Glasobjektträgern (Daten nicht gezeigt). Auf Eichenblättern jedoch führte die Anwendung von 4V+1C, nicht aber von 50 %igem EtOH zu sichtbaren Rückständen (Abb. 37 A, B). Anschließend wurden die Konidien von *E. alphitoides* auf die behandelten und die Kontrollstellen aufgetragen (ca. 250 Konidien/Tropfen).

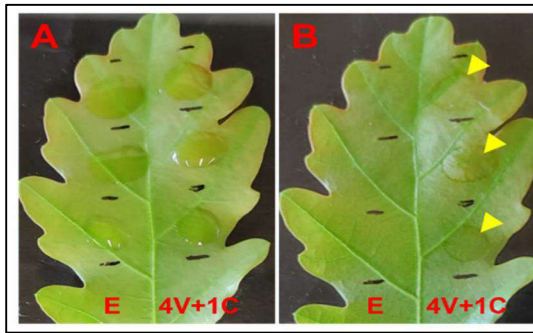


Abb. 37: A: Eichenblatt unmittelbar nach dem Auftragen von 12,5 µl Tropfen mit 50 %igem EtOH auf der linken Seite und von Tropfen von 4V+1C (in 50 %igem EtOH) auf der rechten Seite. B: Dasselbe Eichenblatt nach dem Trocknen, mit gelben Pfeilspitzen, die die Ablagerungsbereiche von 4V+1C auf den Eichenblättern anzeigen. Schwarze Linien trennen die Bereiche, in denen nur EtOH oder 4V+1C in EtOH aufgetragen wurde.

Bei 3 dpi war das Pilzmyzel auf 81 % (48/59) der Kontrollstellen sichtbar, verglichen mit nur 20 % (12/59) der mit 4V+1C behandelten Stellen. Nach 5 dpi stieg die Zahl der Stellen mit sichtbarem Myzel bei beiden Behandlungen leicht an, aber der Unterschied blieb bestehen (Abb. 38 A). In einem von zwei Versuchen wurde allerdings an 9 von 30 mit 4V+1C behandelten Stellen ab 3 dpi eine ähnliche Myzelentwicklung wie an den Kontrollstellen beobachtet. Nach 8 dpi hatte sich das Pilzmyzel an den Kontrollstellen vermehrt, während das Wachstum an den mit 4V+1C behandelten Stellen minimal blieb, außer an den 9 erwähnten Stellen (Abb. 38 B).

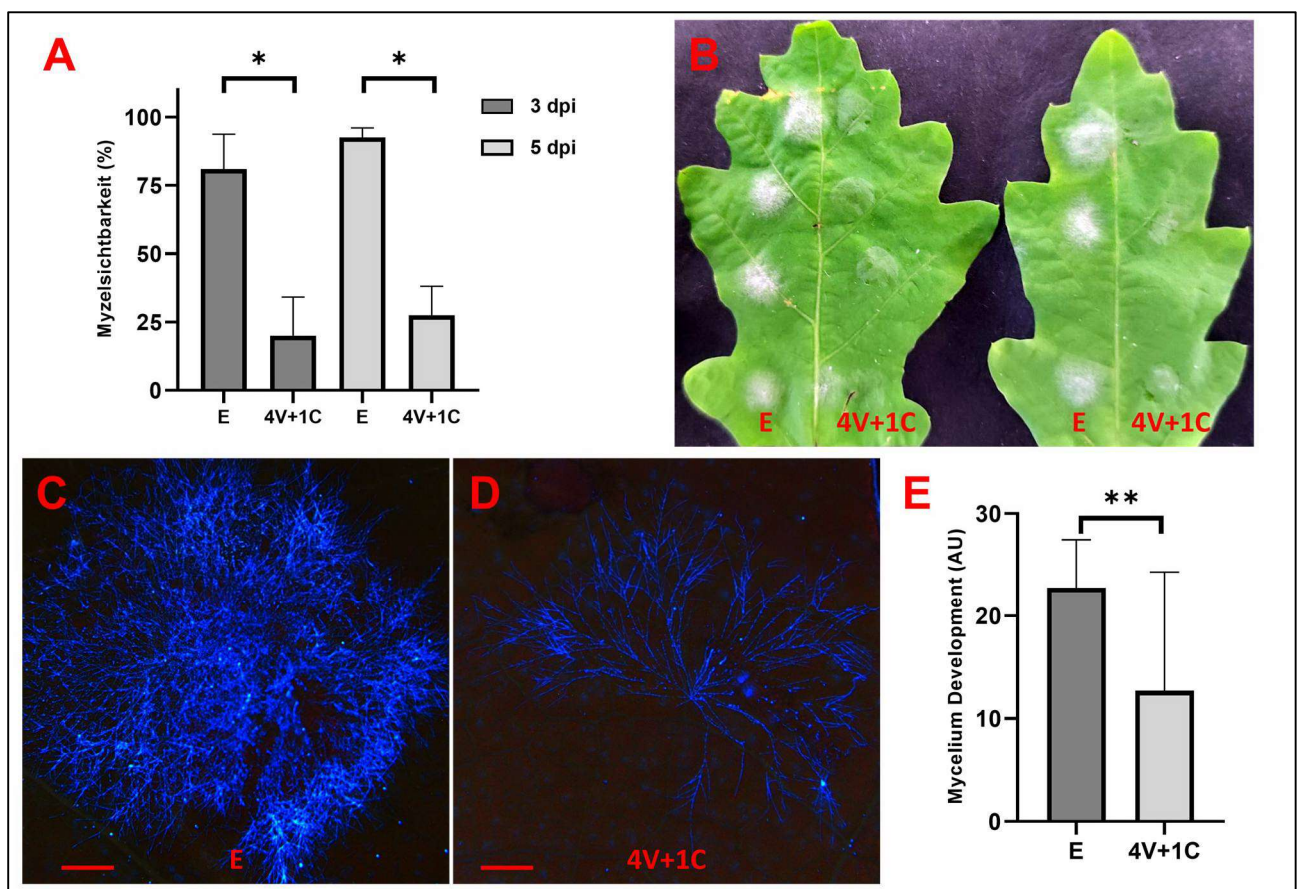


Abb. 38: Auswirkungen von 4V+1C auf die Entwicklung des OPM-Myzels auf abgetrennten Eichenblättern. A: Häufigkeit der Inokulationsstellen mit sichtbarer Myzelentwicklung auf Eichenblättern nach EtOH-Vorbehandlung ohne oder mit 4V+1C bei 3 und 5 dpi. B: Entwicklung des Pilzmyzels bei 8 dpi. C, D: CFW-Färbung zur Darstellung der Kolonieentwicklung bei 8 dpi. Die Skalenbalken entsprechen 1 mm. E: Quantifizierung der Myzelentwicklung bei 8 dpi (AU: willkürliche Einheiten, durch ImageJ-Analyse).

Statistische Signifikanz ist durch * $p < 0,01$ bei 3 dpi und * $p < 0,05$ bei 5 dpi (Tafel A, $n = 59$) und ** $p < 0,01$ bei 8 dpi (Tafel E, $n = 10$) angegeben.

Von den insgesamt 59 Infektionsstellen, die bei allen Behandlungen beobachtet wurden, wurden 10 Infektionsstellen pro Behandlung für die CFW-Färbung und die Myzelmessung zufällig ausgewählt. Nach 8 dpi bildeten die Pilzhyphen an allen zehn Kontrollstellen ein gut entwickeltes Netzwerk, während 8 von 10 mit 4V+1C behandelten Stellen ein nur schwach entwickeltes Hyphen-Netzwerk aufwiesen und die verbleibenden 2 Stellen ein ähnlich gut entwickeltes Hyphen-Netzwerk wie die Kontrollstelle zeigten (Abb. 38 C, D). Die quantitative Analyse mit ImageJ bestätigte statistisch signifikante Unterschiede zwischen der Kontrolle und den mit 4V+1C

behandelten Stellen (Abb. 38 E). Insgesamt zeigen diese Ergebnisse, dass die Anwendung von 4V+1C die Entwicklung des Pilzmyzels auf Eichenblättern reduziert.

In dieser Studie könnten Vescalagin und Castalagin *E. alphitoides* dadurch gehemmt haben, dass sie eine antifungische Wirkung besitzen, dass sie Abwehrreaktionen des Wirts auslösten oder dass sie eine physikalische Barriere auf Eichenblättern bildeten. Weitere Untersuchungen sind erforderlich, um zwischen diesen unterschiedlichen chemischen und physikalischen Mechanismen der Hemmung zu unterscheiden.

II.1.2.11 Erster Bericht über den Echten Mehltau an *Quercus cerris* (Zerreiche) in Deutschland

Die Zerreiche (*Q. cerris*) ist eine häufige Baumart in den mediterranen Klimazonen Südeuropas und Kleinasien. Während Stiel- und Traubeneichen für Mehltau anfällig sind, zeigt die Zerreiche eine teilweise Resistenz. In einer neueren Studie aus der Türkei berichteten OZTURK *et al.* (2020) erstmals über ein signifikantes Auftreten von Echtem Mehltau (*E. alphitoides*) mit erheblichen Auswirkungen auf das Wachstum junger Triebe der Zerreiche. Im Juli 2023 wiesen einige Stieleichenpflanzen auf dem Gelände der FAWF in Trippstadt leichte Mehltau-Symptome auf (Abb. 39). Einige junge Blätter zeigten schwache, aber charakteristische Symptome, bei denen weiße, pulverförmige Flecken auf der Blattoberseite sichtbar wurden (Abb. 39 A). Im Gegensatz dazu zeigte eine erhebliche Anzahl reifer Blätter ein gelbes Mosaikmuster (Abb. 39 B).

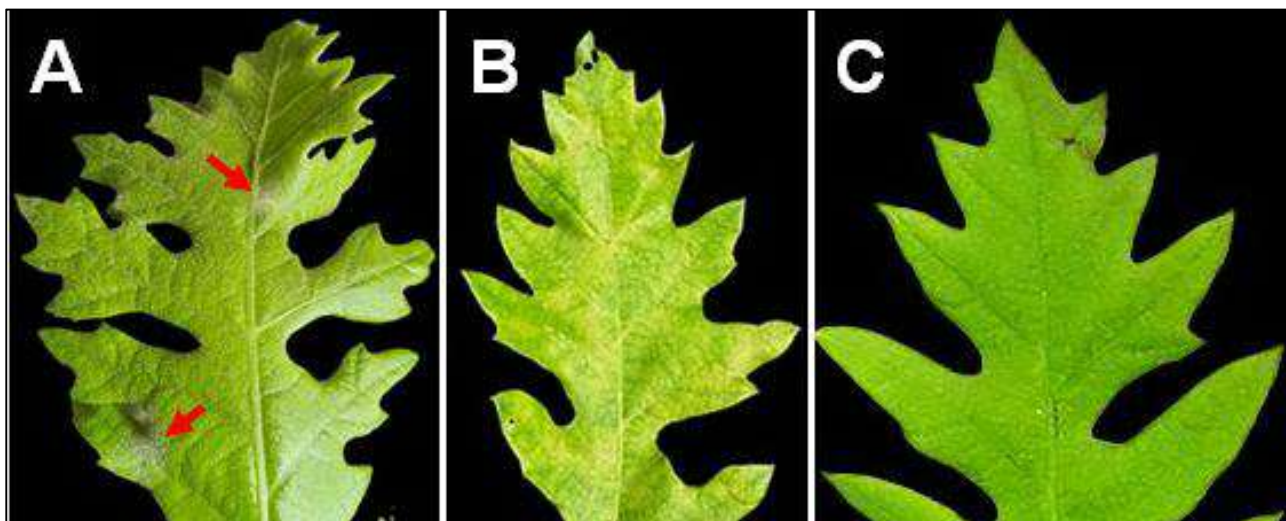


Abb. 39: Blätter der Zerreiche mit Symptomen des Echtem Mehltaus (A, B); gesundes Blatt (C). Die roten Pfeile in (A) bezeichnen Regionen mit auffälligem weißlichem Mehltau-Myzel.

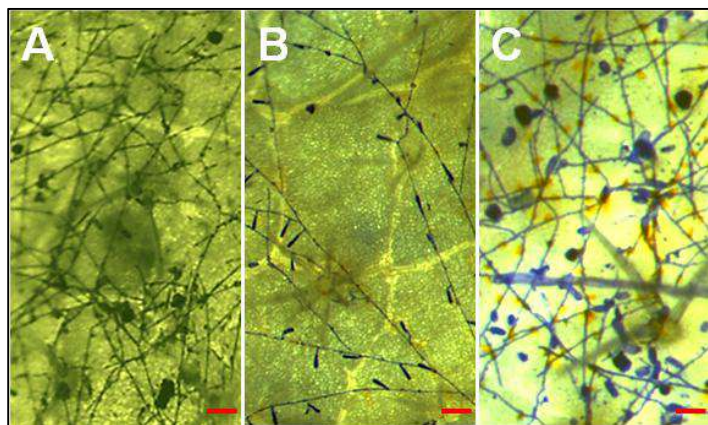


Abb. 40: Mit Coomassie-Brilliantblau gefärbte, mehltauinfizierte Zerreichen-Blätter. A: Blatt mit typischem Myzel. B: Blatt mit gelben Mosaiksymptomen. C: Künstlich mit Mehltau-Suspension infiziertes Zerreichen-Blatt.

Der Balken entspricht 100 µM.

gelben Mosaikmuster (Abb. 40 A, B). Um festzustellen, ob Zerreichen unter kontrollierten Bedingungen mit Mehltau infiziert werden können, wurden junge Zerreichenblätter mit einer Sporensuspension von *E. alphitoides* inokuliert. Auf diesen künstlich infizierten Blättern konnte auch nach 7 Tagen kein sichtbares weißes Pilzmyzel beobachtet werden. Die Mikroskopie von Coomassie-Brilliantblau-gefärbten Blättern zeigte jedoch das Vorhandensein eines dünnen Myzelnetzwerks auf diesen Blättern (Abb. 40 c), was die Möglichkeit einer schwachen Infektion der Zerreiche mit Mehltau (*E. alphitoides*) bestätigt.

Diese Studie stellt die erste Dokumentation einer natürlichen Infektion von Zerreichenblättern mit Echtem Mehltau in Deutschland dar. Die ITS-Sequenzierung der aus infizierten Blättern extrahierten DNA zeigte eine

100%ige Übereinstimmung mit *E. alphitoides*, einschließlich der Referenzsequenz (EF672350; MOUGOU *et al.*, 2008). Die Sequenz wurde im NCBI unter der Accession-Nr. OR648405 hinterlegt.

II.1.2.12 Erster Bericht über Echten Mehltau an Roteiche in Deutschland

Die Roteiche *Quercus rubra* L. ist in Nordamerika beheimatet und wird in den gemäßigten Regionen Europas angebaut. Mit einem Anteil von etwa 55.000 Hektar (0,5 %) an der Gesamtwaldfläche ist die Roteiche die am weitesten verbreitete nicht-heimische Laubbaumart in Deutschland (BMEL, 2012). Im Unterschied zu den einheimischen Eichen ist die Roteiche generell immun gegen Mehltau. Im Jahr 2022 berichteten CHOI *et al.*, jedoch, dass *E. quercicola* in einem öffentlichen Garten in Seoul, Korea, an mehreren *Q. rubra*-Bäumen Mehltau verursachte. Dies ist der einzige bisher veröffentlichte Bericht über das Auftreten von Mehltau an Roteiche.

Table 19: Mehltau-infizierte Exemplare von Roteichen in Kaiserslautern

Pflanzen Nr.	Herkunft	Mehltau-Art	Datum der Entnahme
1	Klimakammer der FAWF in Trippstadt	<i>E. quercicola</i>	Februar 2024
2		<i>E. alphitoides</i>	April 2024
3	RPTU Campus in Kaiserslautern	<i>E. alphitoides</i>	Juli, 2024
4		<i>E. alphitoides</i>	September 2024
5		<i>E. alphitoides</i> , <i>E. quercicola</i>	September 2024

Im Jahr 2024 wurden von uns erstmals Mehltauinfektionen an Roteichen beobachtet: Im Februar und April 2024 wiesen zwei in einer Klimakammer wachsende Roteichen-Sämlinge Mehltausymptome auf (Tabelle 19: Nr. 1 und 2; Abb. 41 A): Das Pilzmyzel auf den Blättern dieser Sämlinge wuchs nur auf der oberen Blattoberfläche, ein typisches Merkmal von vielen Mehltaukrankheiten (BODDY, 2016). Im Juli 2024 wurde auf dem Campus der RPTU ein Baum (Nr. 3) mit typischen Mehltausymptomen entdeckt, der reichlich weißes Myzel auf der Blattoberseite aufwies. Die meisten der neu gewachsenen Blätter eines Austriebs zeigten starke Symptome, während die älteren Blätter keine oder nur schwache Symptome aufwiesen (Abb. 41 B). Diese Blätter (Nr. 3) wurden mit Trypanblau gefärbt. Die Mikroskopie zeigte Pilzmyzel nur auf der oberen Blattoberfläche (Abb. 41 C).

Im September 2024 wiesen einige große Blätter von zwei weiteren Roteichen (Nr. 4 und 5) auf beiden Blattoberflächen eine dünne Schicht aus mehltauähnlichem Myzel auf (Abb. 41 D, Typ 1-Symptome). Andere Blätter derselben Pflanzen wiesen auf der Oberseite hellgrüne Flecken auf, was auf eine frühe Mehltauinfektion oder Chlorose hindeutet, während die entsprechende Unterseite braune Flecken ohne sichtbares Myzel aufwies (Abb. 40 E, Typ 2-Symptome). Fluoreszenzmikroskopie nach Färbung mit WGA-Oregon Green 488 der symptomatischen Blattproben des Typs 1 zeigte Pilzmyzel sowohl auf der oberen als auch auf der unteren Blattoberfläche (nicht gezeigt), während die symptomatischen Blattproben des Typs 2 Pilzmyzel ausschließlich auf der unteren Blattoberfläche zeigten (Abb. 41 F, G).

Die ITS-Sequenzierung der infizierten Blätter bestätigte das Vorhandensein von *E. alphitoides* auf drei Pflanzen, von *E. quercicola* auf einer Pflanze, sowie sowohl von *E. alphitoides* als auch *E. quercicola* auf demselben Blatt einer anderen Pflanze (Tabelle 19). Die ITS+LSU-Sequenzen der vier *E. alphitoides* und der zwei *E. quercicola* waren jeweils identisch.

Die geringe Anzahl von Konidien, die aus der Infektion mit *E. quercicola* gewonnen wurde, machte ihre Verwendung für Inokulationsversuche unmöglich; es wurden jedoch genügend Konidien von zwei mit *E. alphitoides* infizierten Roteichen gesammelt und zur Herstellung von Konidien suspensionen verwendet. Mit den Konidien suspensionen (von einem Sämling (Nr. 1) und einer infizierten Roteiche (Nr. 3)) wurden junge Blätter einer Roteiche und einer Stieleiche (als Kontrolle) inokuliert. Die Stieleichenblätter entwickelten bis 3 dpi ein sichtbares Myzel, das sich allmählich ausbreitete (Abb. 42 A). Im Gegensatz dazu wurde auf den Blättern von *Q. rubra* auch nach 12 dpi kein sichtbares Pilzmyzel festgestellt (Abb. 42 B). In dem Versuch, bei dem das Inokulum aus Pflanze Nr. 3 stammte, zeigten lediglich 2 von 18 *Q. rubra*-Blättern nach 12 dpi rudimentäre myzelähnliche Flecken (Abb. 42 C). Diese Beobachtungen zeigten, dass die kontrollierte Inokulation keine echten Mehltau-Symptome bei Roteichen verursachte.

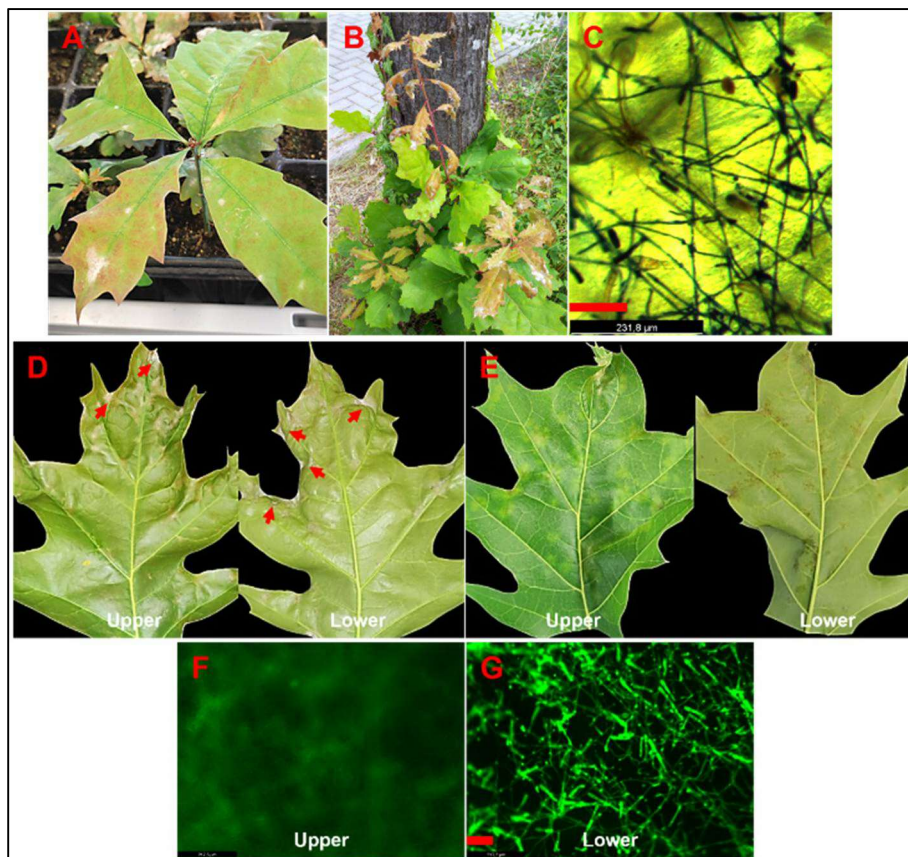


Abb. 41: A: Roteichen-Sämling aus einer Phytokammer mit Mehltausymptomen (Nr. 1). B: Roteichen-Baum auf dem RPTU-Campus mit Mehltausymptomen (Nr. 3). C: Trypanblau-Färbung zeigt ein Myzelnetz mit Konidiophoren auf der Blattoberseite (Nr. 3). D: Blätter einer Roteiche auf dem RPTU-Campus (Nr. 4), mit mehltauähnlichen Symptomen (durch Pfeile hervorgehoben). E: Blätter mit heller Verfärbung und Fleckenbildung auf der Oberseite und korrespondierenden braunen Flecken auf der Unterseite (Nr. 4). F, G: Fluoreszenzfärbung mit WGA Oregon Green 488 zeigt sporulierendes Myzel auf dem in Tafel D gezeigten Blatt (Nr. 4).

Die Balken stellen 100 µm dar.

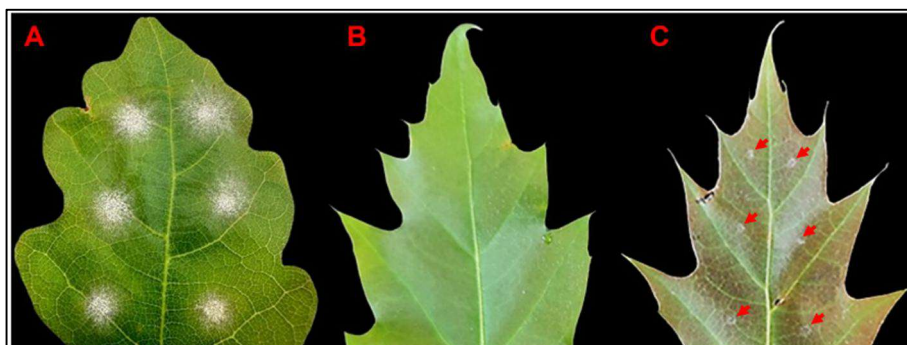


Abb. 42: Ergebnisse der Inokulation von Blättern von Stieleiche (A) und Roteiche (B, C) mit Konidien von *E. alphitoides*, isoliert von einem sporulierenden Blatt von Roteiche (Nr. 3), 12 dpi.

Die Stieleiche zeigt starke Symptome (A), während die Roteichen-Blätter keine Symptome zeigten (B), mit Ausnahme eines Blattes, das ein rudimentäres Myzel aufwies (Pfeile) (C).

Die mikroskopischen Untersuchungen der inokulierten Roteichenblätter nach 2 dpi zeigten, dass die meisten Konidien gekeimt, aber über das Stadium der Appressorienbildung nicht hinausgekommen waren. Nur etwa 9% der gekeimten Konidien ($n = 200$) hatten rudimentäre ESH gebildet (Abb. 43 A). Die mittlere Länge der ESH ($n=27$) betrug $105 \pm 34 \mu\text{m}$. Im Gegensatz dazu wurde auf den Blättern der Stieleiche ein ausgedehntes Netz von ESH beobachtet (Abb. 43 B). Bei 5 dpi wurde ein gewisses Wachstum von vereinzelt ESH auf Roteichenblättern beobachtet, die mittlere Länge der ESH ($n=10$) betrug $366 \pm 64 \mu\text{m}$; im Unterschied dazu wurde eine umfangreiche Konidiophorenbildung auf Stieleichenblättern festgestellt. Bei 12 dpi wiesen Roteichenblätter mit rudimentärem Myzel an allen 12 beobachteten Stellen ein spärliches ESH-Netzwerk auf, aber ohne Konidiophorenbildung (Abb. 43 C). Dagegen wiesen die Roteichenblätter ohne sichtbares Myzel nur an 3 von 16 untersuchten Stellen ein sehr spärliches ESH-Netzwerk auf. Diese Ergebnisse unterstreichen die stark begrenzte Entwicklung des Echten Mehltaus, und bestätigen die generelle Mehltausresistenz von Roteichen.

Obwohl CHOI *et al.*, (2022) eine starke Infektion von Roteichen durch *E. quercicola* beobachteten, umfasste deren Studie keine kontrollierten Inokulationen an Roteichen. Folglich blieben die Koch'schen Postulate, die für die endgültige Bestätigung von *E. quercicola* als kausalem Erreger von Roteichen in dieser Studie unerfüllt. Wir haben über einen Zeitraum von drei Jahren (Sept. 2021 bis Sept. 2024) in der Waldregion um Kaiserslautern 53 Proben von mehltauinfizierten Eichen gesammelt und identifizierten in den meisten (49) Fällen *E. alphitoides* und nur in 4 Fällen *E. quercicola*. In dieser Studie wurde ebenfalls eine (schwächer ausgeprägte)

Prävalenz von *E. alphitoides* gegenüber *E. quercicola* auf Roteichen festgestellt, was unterstreicht, dass beide Arten diesen Wirt sporadisch infizieren können.

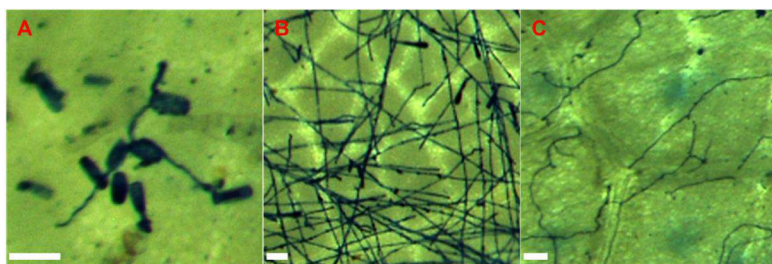


Abb. 42: Roteichen-Blatt (vgl. Abb. 41 C), zeigt gekeimte Konidien, die nur Appressorien und rudimentäre Hyphen bilden (A), im Vergleich zum ausgedehnten Hyphengeflecht auf der anfälligen Stieleiche bei 2 dpi (B). Schwache Entwicklung von Hyphen auf dem Blatt der Roteiche bei 12 dpi (C).

Die Balken entsprechen 50 µm.

Diese Beobachtung stimmt teilweise mit dem Konzept der Nichtwirts-Resistenz überein, bei der eine Pflanzenart eine generelle Resistenz gegen manche Arten von Krankheitserregern aufweist, die als die häufigste Form der Pflanzenresistenz gut dokumentiert ist (HEATH, 2000). Es bleibt zu untersuchen, warum vereinzelte Roteichen in Korea und in unserer Region gut etablierte, sporulierende Mehltaukolonien entwickelten, die auf eine Anfälligkeit dieser Roteichen-Exemplare hinweisen. In Anbetracht dieser Einzelfälle und der Unfähigkeit der davon isolierten Sporen, Roteichen erneut zu infizieren, schlagen wir vor, sie vorerst als sporadische Vorkommnisse zu betrachten. Diese Beobachtungen legen jedoch eine kontinuierliche Überwachung nahe, um diese potenzielle Bedrohung besser zu verstehen.

II.2 Verwertung

II.2.1 Voraussichtlicher Nutzen

Das Projekt trägt dazu bei, den Eichenanbau wirtschaftlich abzusichern und dadurch für den Klimawandel zu rüsten. Es hat grundlegende Einsichten in die Wechselbeziehungen zwischen Pathogen und Baum erarbeitet. Damit hat es der Forstwirtschaft einen Zugang zur experimentellen Phytopathologie geöffnet. Dieser Zugang hilft, die waldbaulichen Systeme zur Eichenverjüngung zu bewerten. Ggfs. können nun die bisherigen Formen des Waldbaus angepasst werden. Die wissenschaftlichen Ergebnisse werden der Praxis mit Hilfe der Untersuchungs- und Demonstrationsflächen nutzbar gemacht. Darüber hinaus kann die FAWF nun auch Entscheidungsträger in der Frage des Eichenmehltaus kompetent beraten.

II.2.2 Wissenschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende

Die wissenschaftlichen Erkenntnisse haben die Kompetenz der beteiligten Institutionen verbessert und die wissenschaftliche Konkurrenzfähigkeit der FAWF gestärkt. Zurzeit stehen der Transfer zu den Nutzergruppen und die Konsequenzen für die Forstpflanzenzüchtung noch aus. Die Forschung des MetaEiche-Projekts ist für die weitere systemökologische Forschung in Eichenwäldern, die funktionale (Epi-)Genetik, die Resistenzforschung, für Waldbau und Waldwachstumskunde sowie für Waldschutz und Forstpathologie anschlussfähig. Insbesondere sind einige baumphysiologische Themenkomplexe wie

- der Zusammenhang von Infektion und Gesamtphenolen am Beispiel der teilresistenten Zerreichen,
- die Bedeutung der Lignifizierung für die Mehltaresistenz unter besonderer Berücksichtigung von Coniferyl- und Sinapylalkohol und
- die weiteren Untersuchungen an der UGPase und der GTase (physiologische und funktionale (epi-) genetische Charakterisierung)

noch nicht abgeschlossen. Die Erbllichkeit der Mehltaresistenz ist ebenso erst in Ansätzen sichtbar, ebenso wie die Möglichkeit eines physiologischen oder genetischen Tests auf Mehltaresistenz für eine praxisorientierte Forstpflanzenzüchtung. Um diesen Fragestellungen näher zu kommen, wurde das MetaEiche-Projekt direkt anschließend im EichenRsisT-Projekt der FAWF fortgeführt.

II.2.3 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten

Die Ergebnisse des MetaEiche-Projekts bewegen sich im Bereich der Grundlagenforschung mit Ausrichtung zur forstwirtschaftlichen Anwendung. Die Arbeiten zielten nicht auf Bereiche der industriellen Forschung oder der experimentellen Entwicklung ab, so dass kein patentrechtlich oder anderweitig geschütztes geistiges Eigentum generiert wurde. Vielmehr sind alle Ergebnisse allgemein verfügbar und werden dauerhaft barrierefrei zur Verfügung gestellt (die Arbeiten dazu laufen derzeit).

Die Erkenntnisse dienen primär dem Forstwesen (v.a. Forstbetrieben und Forstverwaltungen). Diese Institutionen sind für die Bewirtschaftung des Staatswaldes, die Betreuung des Kommunalwaldes und die Beratung des Privatwaldes in Fragen der Waldwirtschaft, besonders des Waldbaus, zuständig. Zu diesem Zweck werden die wissenschaftlich abgesicherten Ergebnisse in geeigneten Publikationsorganen veröffentlicht und interessierten Kreisen in Seminaren, auf Exkursionen und in Vorträgen vermittelt, z.B. im Rahmen des Bildungsprogramms von Landesforsten Rheinland-Pfalz. Für die Exkursionen stehen nicht nur Anschauungsobjekte im Südtteil des Landes zur Verfügung. Darüber hinaus wurden in dem Projekt zusätzliche waldbaupraktische Anschauungsobjekte erschlossen. Die waldbaulichen Hinweise und wachstumskundlichen Analysen stehen schon heute den Forstbetrieben zur Verfügung und werden in den kommenden Jahren weiter ausgebaut. Weil die Wirtschaft mit Eichen vor dem Hintergrund des Klimawandels an Bedeutung gewinnt, beunruhigen die gegenwärtigen Probleme die angesprochenen Zielgruppen.

Dementsprechend bemisst sich der wirtschaftliche Nutzen des Projekts in betriebswirtschaftlichen Vorteilen für die Forstwirtschaft. Es trägt dazu bei, die betrieblichen Risiken des Eichenanbaus zu verringern. Vor allem jedoch steht der volkswirtschaftliche Nutzen im Vordergrund. Durch eine Verbesserung der Sicherheit des waldbaulichen Handelns helfen die Erkenntnisse aus dem MetaEiche-Projekt nun, forstbetriebliche Risiken überschaubarer zu machen. Es erleichtert, die volkswirtschaftlich gebotene Erhöhung des Eichenanteils im Klimawandel zu realisieren und den Forst-, Holz- und Papier-Cluster weiter zu stärken.

II.3 Erkenntnisse von Dritten

ANONYMUS (2024): Licht für Eichen-Nachwuchs richtig steuern. Holz-Zentralblatt **151**: S. 103.

Inhalt: Etablierung bei 20-30 % der Freilandstrahlung, wenn die jungen Eichen der Konkurrenz entwachsen sind, Licht auf 50 % hochregeln.

ARAB, L., SEEGLMÜLLER, S., KREUZWIESER, J., EIBLMEIER, M., DANNEMANN, M. & RENNENBERG, H. (2022): Significance of current weather conditions for foliar traits of old-growth sessile oak (*Quercus petraea* Liebl.) trees. *Trees* **36**: S. 777-791.

Inhalt: Unter anderem verlieren die Eichen bei Trockenstress Lignin.

BARRÈS, B., DUTECH, C., SAINT-JEAN, G., BODÉNÈS, C., BURBAN, C., FIÉVET, V., LEPOITTEVIN, C., GARNIER-GÉRÉ, P., DESPREZ-LOUSTAU, M.-L. (2023): Demographic and genetic impacts of powdery mildew in a young oak cohort. *BIORxiv* **06.22.546164**; doi: <https://doi.org/10.1101/2023.06.22.546164>. 36 S.

Inhalt: In einem Pflanzgartenexperiment korrelierte die Überlebensrate junger Stieleichen mit dem Höhenwachstum. Alle Herkünfte waren gleich schwer an Mehltau erkrankt, so dass das Höhenwachstum nicht von der Mehltaresistenz abhing.

BLEH, J. & SEEGLMÜLLER, S. (2022): Charakterisierung der sommerlichen Stressabwehr von Traubeneichen (*Quercus petraea* Liebl.). *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* **192**: S. 1-13.

Inhalt: Vor allem in der ersten Sommerhälfte reagieren VC direkt auf die Witterung und regeln die Abwehr von oxidativem Stress während der Zeit der Lignifizierung.

CLARK, K. & GOLDBERG-OPPENHEIMER, P. (2024): Vibrational spectroscopic profiling of biomolecular interactions between oak powdery mildew and oak leaves. *Soft Matter* **20**: S. 959-970.

Inhalt: In einer Untersuchung mittels Raman-Spektroskopie wurde festgestellt, dass Mehltau infizierte Eichenblätter weniger Chlorophyll, Cellulose und Pektin und stattdessen mehr Lignin haben.

DEGEN, B., YANBAEV, Y., BLANC-JOLIVET, C., IANBAEV, R., BAKHTINA, S. & MADER, M. (2021): Genetic comparison of planted and natural *Quercus robur* stands in Russia. *Silva Genetica* **70**: S. 1-8.

Inhalt: Künstliche Verjüngung bedeutet nicht notwendigerweise einen Verlust an genetischer Vielfalt.

DELB, H., BURGER, M., GRÜNER, J., KAUTZ, M., THOMAS, L., WONSACK, D. & WUSSLER, J. (2023): Waldschutzsituation 2022/2023 in Baden-Württemberg. *Allgemeine Forstzeitschrift / Der Wald* **78** Heft 9: S. 16-20.

Inhalt: In Baden-Württemberg wurde der Eichenmehltau als akute und chronische Eichenerkrankung angesprochen. Außerdem gab es 2022 in Baden-Württemberg Eichenprachtkäfer und Hallimasch. Für 2023 wurde eine Frostspannergradation erwartet.

DELB, H., BURGER, M., GRÜNER, J., KAUTZ, M., THOMAS, L., WONSACK, D. & WUSSLER, J. (2023): Waldschutzsituation 2022/2023 in Rheinland-Pfalz und Saarland. *Allgemeine Forstzeitschrift / Der Wald* **78** Heft 9: S. 25-27.

Inhalt: In Rheinland-Pfalz gab es den Eichenprozessionsspinner 2022 auf 610 ha.

DEMETER, L., MOLNÁR, A., ÖLLERER, K., CSÓKA, G., KIŠ, A., VADÁSZ, C., HORVÁTH, F. & MOLNÁR, Z. (2021): Rethinking the natural regeneration failure of pedunculate oak: The pathogen mildew hypothesis. *Biological Conservation* **253**: Beitrag Nr. 109228.

Inhalt: Eichenmehltau reduziert die Schattentoleranz und das Höhenwachstum der Stieleichenverjüngung. Dies führt zu einem Verlust an Vitalität und Konkurrenzkraft. Deshalb sollte der Einfluss des Eichenmehltaus in der Verjüngungsplanung stärker berücksichtigt werden. Die Wirtschafter sollten naturnahe Verjüngungsverfahren bevorzugen.

FATICOV, M., DESPREZ-LOUSTAU, M.-L., KISS, L., MASSOT, M., D'ARCIER, J.F., MUTZ, J., NÉMETH, M.Z., ROSLIN, T. & TACK, A.J.M. (2022): Niche differentiation within a cryptic pathogen complex: climatic drivers and hyperparasitism at multiple spatial scales. *Ecography*, <https://doi.org/10.1111/ecog.06062>.

Inhalt: Krankheitserreger sind in multitrophe Nahrungsnetze eingebettet, in denen häufig auch kryptische Arten innerhalb desselben Erregerkomplexes vorkommen. Diese Studie deutet darauf hin, dass klimatische Faktoren bei der Definition der Nischen kryptischer Arten innerhalb eines Pathogenkomplexes auf Eiche wichtiger sind als die Interaktionen zwischen den Arten.

FORT, T., PAUVERT, C., CHANCEREL, E., BURLETT, R., WINGATE, L. & VACHER, C. (2023): Leaf microbiome data for European beech (*Fagus sylvatica*) in the leaf and canopy scales collected in a gallery forest in South-West France. *Annals of Forest Science* **80**: Artikel 14. <https://doi.org/10.1186/s13595-023-01181-z>. 9 S.

Inhalt: Die Pilzbesiedelung eines Blattes insgesamt lässt sich mittel ITS-Primern quantifizieren. Das könnte eine Alternative zur Ergosterolbestimmung sein.

GAYTÁN, Á., MOREIRA, X., CASTAGNEYROL, B., VAN HALDER, I., DE FRENNE, P., MEEUSSEN, C., TIMMERMAN, B., TEN HOOPEN, J., RASMUSSEN, P., BOS, N., JAATINEN, R., PULKKINEN, P., SÖDERLUND, S., COVELO, F., GOTTHARD, K. & TACK, A. (2022): The co-existence of multiple oak leaf flushes contributes to the large within-tree variation in chemistry, insect attack and pathogen infection. *New Phytologist* **235**: S. 1615-1628.

Inhalt: Johannistriebe haben mehr Tannine und mehr Mehltau. Mehltau und VC korrelieren aber nicht.

GORB, E. & GORB, S. (2021): Powdery mildew fungus *Erysiphe alphitoides* turns Oak leaf surface to the highly hydrophobic state. In: GADOMSKI A. (Hrsg): *Water in Biomechanical and Related Systems. Biologically-Inspired Systems* **17**: S. 171-185.

Inhalt: Eichenmehltau hydrophobiert mit seiner Hyphenstruktur und seinen Oberflächensubstanzen auf den Hyphen die infizierten Blätter.

GOSLING, R., JACKSON, R., ELLIOT, M. & NICHOLS, C. (2024): Oak declines: Reviewing the evidence for causes, management implications and research gaps. *Ecological Solutions and Evidence* **5**: e12395. <https://doi.org/10.1002/2688-8319.12395>.

Inhalt: Mehltau ist die wichtigste Blattkrankheit der Eichen.

GROSS, A., PETITCOLLIN, C., DUTECH, C., LY, B., MASSOT, M., FAIVRE D'ARCIER, J., DUBOIS, L., SAINT-JEAN, G., DESPREZ-LOUSTAU, M.-L. (2021): Hidden invasion and niche contraction revealed by herbaria specimens in the fungal complex causing oak powdery mildew in Europe. *Biological Invasions* **23**: S. 885-901.

Inhalt: Die erste Mehltau-epidemie zu Beginn des 20. Jahrhunderts wurde von *E. quercicola* verursacht, der seit der Mitte des vergangenen Jahrhunderts zusehends durch *E. alphitoides* verdrängt worden ist. Grund hierfür ist, dass *E. alphitoides* während des Sprosswachstums länger infektiös ist.

KASPRZYK, W., BARANOWSKA, M., KORZENIEWICZ, R., BEHNKE-BOROWCZYK, J. & KOWALKOWSKI, W. (2022): Effect of irrigation dose on Powdery mildew incidence and root biomass of Sessile oaks (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.). *Plants* **11**: S. 1248-1264.

Inhalt: In einem Pflanzgartenexperiment war die Mehltauinfektion von TEi bei geringer zusätzlicher Bewässerung am geringsten.

KEBERT, M., KOSTIĆ, S., ZLATKOVIĆ, M., STOJNIC, S., ČAPELJA, E., ZORIĆ, M., KIPROVSKI, B., BUDAKOV, B. & ORLOVIĆ, S. (2022): Ectomycorrhizal fungi modulate biochemical response against Powdery mildew disease in *Quercus robur* L. *Forests* **13**: Artikel 1491. 28 S.

Inhalt: Mykorrhizierte Stieleichensämlinge wiesen geringere relative Wassergehalte und Nettophotosyntheseraten, sowie verringerte Gehalte an Prolin und Thiolen und erhöhte Konzentrationen an MDA, Spermidin, Spermin, Gesamt-Polyaminen und Gesamt-Phenolen auf.

KONTRADE, P., SEHR, E.M., WISCHNITZKI, E., BRÜGGEMANN, W. (2019) Comparative transcriptomics-based selection of suitable reference genes for normalization of RT-qPCR experiments in drought-stressed leaves of three European *Quercus* species. *Tree Genetics & Genomes* **15**, Article number: 3.

Inhalt: Identifizierung stabil exprimierter Referenzgene für quantitative RNA-Analysen mit Eichen.

KÜHNE, C. & KOHNLE, U. & BAUHUS, J. (2022): Lochhiebe: Verjüngungserfolg in einem Traubeneichenbestand. *Allgemeine Forstzeitschrift / Der Wald* **77** Heft 5: S.29-32.

Inhalt: Eine Fallstudie zu Traubeneichenverjüngung in kleinräumigen Kronendachöffnungen. Zu Beginn vorhandene Sämlingsdichte entscheidend für den Verjüngungserfolg. Es sollte keine etablierte Bodenvegetation existieren. Größere Lücken sind wegen besseren Lichtverhältnissen vorteilhafter. Prinzipiell ist Naturverjüngung von Traubeneichen in Lücken möglich.

LOBINGER, G., BURCKARDT, K., DELB, H., HAHN, A., HEIN, C., HURLING, R., ROHDE, M., ROMMERSKIRCHEN, A. & WONSACK, D. (2024): Eichenprachtkäfer und Eichensterben. *Allgemeine Forstzeitschrift / Der Wald* **79** Heft 7: S. 38-41.

Inhalt: Sommerdürre, gefolgt von Insektenfraß und Mehltau, terminiert durch Prachtkäfer führen zum Tod der Eichen. Prachtkäfer gibt's zunehmend auch an vital erscheinenden Eichen. Die Dynamik übersteigt die bisherigen Erfahrungen.

MARKOVIĆ, Č., KANJEVAC, B., PERIŠIĆU & DOBROSAVLJEVIĆ, J. (2024): The effect of the oak Powdery mildew, oak Laces bug, and other foliofagous insects on the growth of young Pedunculate oak trees. *Frontiers in Forests and Global Change* **6**: 1297560. doi 103389/ffgc.2023.1297560.

Inhalt: blattfressende Insekten und Mehltau reduzieren gemeinsam das Höhenwachstum junger Eichen.

NORDWESTDEUTSCHE FORSTLICHE VERSUCHSANSTALT (Hrsg.) (2022): Starke Zunahme von Schäden in Eichenbeständen. *Waldschutzinfo* **7**. 4 S.

Inhalt: Nach dem trockenen Sommer 2018 ist es vermehrt zu Trocknisschäden an Eichen gekommen, an denen unter anderem auch der Mehltau beteiligt war.

NORDWESTDEUTSCHE FORSTLICHE VERSUCHSANSTALT (Hrsg.) (2024): Eichensterben: Erstmals Beteiligung von Bakterien an betroffenen Eichen in Sachsen-Anhalt und Niedersachsen nachgewiesen. *Waldschutzinfo* **2024-04**. 3 S.

Inhalt: Akutes Eichensterben unter Beteiligung von Darmbakterien auch in D nachgewiesen.

OPPERMANN, T. & BRAUN, H.-U. (2022): Die Eiche – Chance für das Klima von morgen. *Allgemeine Forstzeitschrift / Der Wald* **77** Heft 21: S. 37-41.

Inhalt: Der Zuwachs der Eichen liegt überall in Ostwestfalen-Lippe deutlich über den Ertragsstapelwerten und kann die Forstwirtschaft in Zukunft stützen. Allerdings gibt es viel zu wenig Nachzuchtflächen. Dies lässt sich auf die kahlschlagsfreie Wirtschaft zurückführen.

OSZAKO, T., VOITKA, D., STOCKI, M., STOCKA, N., NOWAKOWSKA, J., LINKIEWICZ, A., HSIANG, T., BELBAHRI, L., BEREZOVSKA, D. & MALEWSKI, T. (2021): *Trichoderma asperellum* efficiently protects *Quercus robur* leaves against *Erysiphe alphitoides*. *European Journal of Plant Pathology* **159**: S. 295-308.

Inhalt: *Trichoderma asperellum* hat den Mehltaubefall von Eichenblättern drei Jahre lang reduziert sowie die Photosynthese und den relativen Wassergehalt angehoben. Die induzierte Resistenz könnte möglicherweise auf *T. asperellum*-Volatilen beruhen.

RAMUT, R. & PUSZ, W. (2023): Fungi complicit in oak powdery mildew infection in the Olawa Forest District. *Acta Mycologica* **58**: DOI <https://doi.org/10.5586/am/166060>. 9 S.

Inhalt: In Eichenzweigen treten neben Mehltau auch andere Pathogene wie Fusarium oder Trichoderma auf.

SAEED, M., SEEGLMÜLLER, S., SCHMIDT, P. & HAHN, M. (2023): First report of powdery mildew on Turkey oak (*Quercus cerris*) from Germany. *The Korean Journal of Mycology*. Manuskript angenommen.

Inhalt: Erster Bericht über Eichenmehltau auf Zerreiche.

SANCHEZ-LUCAS, R., MAYORAL, C., RAW, M., MOUSORAKI, M.-A. & LUNA, E. (2023): Elevated CO₂ alters photosynthesis, growth and susceptibility to powdery mildew of oak. *bioRxiv* **2023.01.07.523094**: doi: <https://doi.org/10.1101/2023.01.07.523094>. 42 S.

Inhalt: Unter erhöhtem CO₂ sind Stieleichensämlinge anfälliger für Eichenmehltau. Eine Behandlung mit β -Aminobuttersäure kann die Anfälligkeit mindern.

SCHLOSSER, F., BÖHM, S., HORDER, N. & SEEGLMÜLLER, S. (2022): Antioxidantienkapazität von Eichen – Gerbstoffe als wesentlicher Beitrag zur herkunftsspezifischen Antwort auf Trockenheit. *Centzralblatt für das Gesamte Forstwesen* **139**: S. 73-94.

Inhalt: Gerbstoffe machen den größten Teil der Antioxidantienkapazität von Eichen aus. Unter den Gerbstoffen kommt dabei den VC die entscheidende Bedeutung zu. Die Eichen von trockenen und frischen Standorten unterschieden sich genetisch bedingt sehr stark in ihrem VC-Haushalt.

SIESS, H. (2022): Oxidativer Stress, Eustress und Distress: H₂O₂ als Signalmolekül. *Biospektrum* **28**: S. 685-689.

Inhalt: Vielfältige Hinweise zur Rolle von Peroxid unter Stressbedigungen.

SKWAREK-FADECKA, M., NAWROCKA, J., SIESCYŃSKA, K., PATYKOWSKI, J. & POSMYK, M. (2024): Effect of oak Powdery mildew on ascorbate-glutathione-cycle and other antioxidants in plant-*Erysiphe alphitoides* interaction. *Cells* **13**: 1035. <https://doi.org/10.3390/cells13121035>.

Inhalt: Asc, GSH, Lignin, MDHAR, DHAR und GR korrelieren im August nicht mit dem Mehltaubefall, APX korreliert umgekehrt.

STIMM, K., HEYM, M., UHL, E., TRETTER, S. & PRETZSCH, H. (2021): Klimasensitives Höhenwachstum der Eiche. *Allgemeine Forstzeitschrift / Der Wald* **76** Heft 22: S. 20-23.

Inhalt: Angesichts der ungewissen Klimazukunft ist es notwendig, die Eichen weiterhin zu etablieren. Weil die Eichen konkurrenzschwach sind, bedarf es hierzu der waldbaulichen Förderung gegenüber der Buche.

TAMKE, D., SENHENN-REULEN, H. & PETERSEN, R. (2023): Initiale Entwicklung von Eichenkulturen nach Bodenbearbeitung in Deutschland. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* **192**: S. 219-240.

Inhalt: Die Bodenbearbeitung beeinflusst die Mortalität gepflanzter Eichen nicht, bei Saat ist sie unabdingbar. Sie hatte keinen Einfluss auf das Höhenwachstum der Pflanzen. Gepflanzte Eichen sind nach drei Jahren größer als gesäte.

TĂUT, I., MOLDOVAN, M., ȘIMONCA, V., REBREAN, F., VARGA, M. (2023): The effectiveness of phytosanitary treatments in the control of Oak mildew, in the current climate context. *Bulletin of University of Agricultural Sciences and Veterinary Medicine Cluj-Napoca* **80**: S. 82-90.

Inhalt: Eichensämlinge lassen sich in Baumschul-Pflanzbeeten effektiv mit Proquinazid vor Mehltau schützen.

TISCHER, A., KLAUS, J., KÜHNE, C., HOFFMANN, B., HARTIG, M. & SCHMIDT, R. (2023): Instabile Fichtenbestände mittels Eichel-Saat rasch umbauen. *Allgemeine Forstzeitschrift / Der Wald* **78** Heft 5: S. 17-21.

Inhalt: Eine Stieleichensaart mit 1 to / ha unter wechselfeuchter Fichte hat nach drei Jahren 85.000 Jungpflanzen ergeben. Der Saaterfolg war im Moos am besten. Die Fichtenverjüngung hat unter der Trockenheit 2018-2020 gelitten, die gesäten Eichen hatten die Fichten-Naturverjüngung überwachsen.

TSARALUNGA, V., TSARALUNGA, A., YAKOVENKO, N. & GRIDNEV, Y. (2021): The impact of the intensity of selective sanitary cutting in oak forests on the defeat of the Pedunculate oak (*Quercus robur* L.) trees by powdery mildew. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* **875**: Beitrag 012050. 15 S.

Inhalt: Bei Mehltau hilft es in Stieleichen-Baumhölzern nicht, die erkrankten Bäume zu fällen.

TURCZĄŃSKI, K., BELKA, M., SPYCHALSKI, M., KUKAWKA, R., PRASAD, R., SMIGLAK, M. (2023): Resistance inducers for the protection of Pedunculate oak (*Quercus robur* L.) seedlings against Powdery mildew *Erysiphe alphitoides*. *Plants* **12**: <https://doi.org/10.3390/plants12030635>. 12 S.

Inhalt: N-methyl-N-methoxyamide-7-carboxybenzo(1,2,3)thiadiazole (BTHWA) hat den Mehltaubefall junger Traubeneichen um fast 90 % vermindert.

VAN DIJK, L., ABDELFAH, A., EHRLÉN, J. & TACK, A. (2022): Soil microbiomes drive aboveground plant-pathogen-insect interactions. *Oikos*: Artikel e09366. 12 S.

Inhalt: Das Bodenbiom beeinflusst die Mehltau-Infektionsrate: Auf Mykorrhizaboden hatten die Sämlinge etwa ein Drittel weniger Mehltau. Der Mehltau hatte keinen signifikanten Einfluss auf das Sämlingswachstum.

VAN DIJK, L.J.A., MOREIRA, X., BARR, A.E., ABDALA-ROBERTS, L., CASTAGNEYROL, B., FATICOV, M., HARDWICK, B., TEN HOOPEN, J.P.J.G., DE LA MATA, R., PIRES, R.M., ROSLIN, T., SCHIGEL, D.S., TIMMERMANS, B.G.H. & TACK, A.J.M. (2022): Urbanization affects oak-pathogen interactions across spatial scales. *Ecography*, <https://doi.org/10.1111/ecog.06091>.

Inhalt: Auf kontinentaler Ebene war die Infektionsschwere bei Bäumen in städtischen Gebieten durchweg höher als in ländlichen Gebieten, wobei es Hinweise darauf gibt, dass die Temperatur diesen Effekt vermittelt.

WILHELM, G.-J., SCHLICKE, T. & MATTHEIS, U. (2021): 20-jährige Messreihe an Buchen-Ausleseebäumen, Teil 2. *Allgemeine Forstzeitschrift / Der Wald* **76** Heft 22: S. 17-19.

Inhalt: Einzelne Eichen in einem QD-behandelten Buchen-Grundbestand bieten eine gute Möglichkeit für die Lichtkegelverjüngung zur Anreicherung des Folgebestandes mit Eichen.

ZHANG, Y., MA, R., JANG, J., JING, Y., YIN, K., DENG, M. & DU, F. (2024): First report of Powdery mildew of *Quercus guavifolia* (Fagaceae) caused by *Erysiphe quercicola*. *Plant Disease* **108**: S. 1894.

Inhalt: Mehltau gibt's auch auf der Chinesischen Guavenblatteiche.

II.4 Veröffentlichungen

SAEED, M., SEEGLMÜLLER, S., SCHMIDT, P. & HAHN, M. (2023): First report of powdery mildew on Turkey oak (*Quercus cerris*) from Germany. *The Korean Journal of Mycology*. Manuskript angenommen.

SAEED, M., SHARMA, S., SEEGLMÜLLER, S. & HAHN, M. (2025): First report of powdery mildew on *Quercus rubra* in Germany. *Korean Journal of Mycology*. akzeptiert 03/25.

SAEED, M., HAHN, M. & SEEGLMÜLLER, S. (2025). Investigation of vesicagine and castalagine activity against oak Powdery mildew. In Vorbereitung.

SEEGMÜLLER, S., GARIBAY-HERNANDEZ, A. & HAHN, M. (2024): Universität und Forstliche Forschung: Kooperationen für klimastabile Wälder. *Heimatjahrbuch des Landkreises Kaiserslautern* **65**: S. 73-82.

SHARMA, S., SAEED, M., SEEGMÜLLER, S. & HAHN, M. (2024): *Searching Powdery Mildew-resistant Oaks*. Bonn: Deutsche Phytomedizinische Gesellschaft. 59. Jahrestagung am 07./08.04.24. Poster + 2 S. Präsentation.

III Literatur

Die Literatur berücksichtigt entsprechend der Anforderung aus Kap. I.1.1 auch die im Projekt verwendete, jedoch nicht im Abschlussbericht zitierten Veröffentlichungen.

ALBERT, G. & WOMELSDORF, G. (1987): Reinerträge der Hauptwirtschaftsbaumarten in Rheinland-Pfalz. *Mitteilungen der Landesforstverwaltung Rheinland-Pfalz* **7**: 52 S.

ARAB, L., DELB, H., EVERTZ, K., RENNENBERG, H., SCHLOSSER, F. & SEEGLMÜLLER, S. (2019): Anpassungsvermögen und Wirt-Parasit-Beziehungen der Eichen im Klimawandel (APEK), 28 WB 400 201 – Schlussbericht, Teil I & II. Trippstadt: Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz. 122 S.

ARAB, L., SEEGLMÜLLER, S., DANNEMANN, M., EIBLMEIER, M., ALBASHER, G., ALFARRAJ, S. & RENNENBERG, H. (2020): Foliar traits of Sessile oak (*Quercus petraea* Liebl.) seedlings are largely determined by site properties rather than seed origin. *Tree Physiology* **40**: S.1648-1667.

ARAB, L., SEEGLMÜLLER, S., KREUZWIESER, J., EIBLMEIER, M., DANNEMANN, M. & RENNENBERG, H. (2022): Significance of current weather conditions for foliar traits of old-growth sessile oak (*Quercus petraea* Liebl.) trees. *Trees* **36**: S. 777-791.

ARAB, L., RENNENBERG, H., SCHLOSSER, F., BONIN, M. & SEEGLMÜLLER, S. (2025): Hinweise zur Bedeutung der Glutathionreduktase für das antioxidative System der Eichen. In Vorbereitung. 26 S. + 3 Abb. und 5 Tab.

ARAUJO, A. R., ARAÚJO, A. C., REIS, R. L. & PIRES, R. A. (2021): Vescalagin and castalagin present bactericidal activity toward methicillin-resistant bacteria. *ACS Biomaterials Science & Engineering* **7**: S. 1022–1030. <https://doi.org/10.1021/acsbmaterials.0c01698>

ARIMURA, G.-I., OZAWA, R. & MAFFEI, M. (2011): Recent advances in plant early signaling in response to herbivory. *International Journal of Molecular Science* **12**: S. 3723-3739.

ASSADA, K. (1996): Radical production and scavenging in the chloroplasts. In: BAKER, N. (Hrsg.): Photosynthesis and Environment. *Advances in Photosynthesis* **5**: S: 123-150. Dordrecht: Springer.

AYRES, P. (1976): Natural resistance to oak mildew. *Arboricultural Journal* **3** Heft 1: S. 23-29.

BARNOLA, P., ALATOU, D., LACOINTE, A. & LAVARENNE, S. (1990): Étude biologique et biochimique du déterminisme de la croissance rythmique du chêne pédoncolé (*Quercus robur* L.). Effets de l'ablation des feuilles. *Annales des Sciences Forestières* **21**: S. 619-631.

BARRÈS, B., DUTECH, C., SAINT-JEAN, G., BODÉNÈS, C., BURBAN, C., FIÉVET, V., LEPOITTEVIN, C., GARNIER-GÉRÉ, P., DESPREZ-LOUSTAU, M.-L. (2023): Demographic and genetic impacts of powdery mildew in a young oak cohort. *BIORxiv* **06.22.546164**; doi: <https://doi.org/10.1101/2023.06.22.54616>. 36 S.

BARTHOMÉ, J., BACHI, B., MARÇAIS, B., MOUGOU-HAMDAME, A., BODÉNÈS, C., PLOMION, C., ROBIN, C. & DESPREZ-LOUSTAU, M.-L. (2020): The genetics of exapted resistance to two exotic pathogens in pedunculate oak. *New Phytologist* **226**(4): S. 1088–1103. <https://doi.org/10.1111/nph.16319>

BECHER, G. (2015): Clusterstatistik Forst und Holz. *Thünen Working Paper* **48**. 43 S. + Anhang. Tab. 11.

BLEH, J. und SEEGLMÜLLER, S. (2022): Charakterisierung der sommerlichen Stressabwehr von Traubeneichen (*Quercus petraea* Liebl.). *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* **192**: S. 1-13.

BMEL (2012): Dritte Bundeswaldinventur 2012. <https://www.bundeswaldinventur.de/dritte-bundeswaldinventur-2012>

BODDY, L. (2016): Pathogens of autotrophs. In: WATKINSON, S. C., BODDY, L. & MONEY, N. P. (Hrsg.): *The Fungi*, 3. Aufl. Academic Press, New York: S. 245–292. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-382034-1.00008-6>

BRÜGGEMANN, N. & SCHNITZLER, J.-P. (2001): Influence of Powdery mildew (*Microsphaera alphitoides*) on isoprene biosynthesis and emission of Pedunculate oak (*Quercus robur* L.) leaves. *Angewandte Botanik* **75**: S. 91-96.

BURSCHEL, P. & HUSS, J. (1987): *Grundriß des Waldbaus*. Hamburg und Berlin: Verlag Paul Parey. 352 S.

CHOI, Y.-J., PARK, J.-H., CHOI, I.-Y., ABASOVA, L., CHOI, J.-H. & SHIN, H.-D. (2022): Erysiphe quercicola causing powdery mildew on Quercus rubra in Korea. *Korean Journal of Mycology* **50**: S. 137–141. <https://doi.org/10.4489/KJM.20220014>

CLARK, K. & GOLDBERG-OPPENHEIMER, P. (2024): Vibrational spectroscopic profiling of biomolecular interactions between oak powdery mildew and oak leaves. *Soft Matter* **20**: S. 959-970.

COLLET, C., COLIN, F. & BERNIER, F. (1997): Height growth, shoot elongation and branch development of young *Quercus petraea* grown under different levels of resource availability. *Annales des Sciences Forestières* **54**: S. 65-81.

- CUNNINGTON, J. H., TAKAMATSU, S., LAWRIE, A. C. & PASCOE, I. G. (2003): Molecular identification of anamorphic powdery mildews (Erysiphales). *Australasian Plant Pathology* **32**: S. 421–428. <https://link.springer.com/article/10.1071/AP03045>
- DABURON, H. (1970): L'oidium du chêne. Incident léger ou déstastre? *Revue Forstière Française* **XXII**: S. 365-369.
- DELATOUR, C. (1983): Les dépérissements de chênes en Europe. *Revue Forestière Française* **XXXV**: S. 265-282.
- DERING, M. & CHYBICKI, I. (2012): Assessment of genetic diversity in two-species oak stands and their progeny populations. *Scandinavian Journal of Forest Research* **27**: S. 2-9.
- DESPREZ-LOUSTAU, M.-L., VITASSE, Y., DELSON, S., CAPDEVIELLE, X., MARÇAIS, B. & KREMER, A. (2010): Are plant pathogen populations adapted for encounter with their host? A case study of phenological synchrony between oak and an obligate fungal parasite along an altitudinal gradient. *Journal of Evolutionary Biology* **23**: S. 87-97.
- DESPREZ-LOUSTAU, M.-L., SAINT-JEAN, G., BARRÉT, B., DANTEC, C. & DUTECH, C. (2014): Oak powdery mildew changes growth patterns in its host tree: Host tolerance response and potential manipulation of host physiology by the parasite. *Annals of Forest Science* **71**: S. 563-573.
- EDWARDS, M. & AYRES, P. (1981): Cell death and cell wall papillae in the resistance of oak species to Powdery mildew disease. *New Phytologist* **89**: S. 411-418.
- EDWARDS, M. & AYRES, P. (1982): Seasonal changes in resistance of *Quercus petraea* (Sessile oak) leaves to *Microsphaera alphitoides*. *Transactions of the British Mycological Society* **78**: S. 569-571.
- ELLENBERG, H. (1986): *Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen in ökologischer Sicht*. Stuttgart: Verlag Eugen Ulmer. 989 S.
- FALCK, R. (1924): Über das Eichensterben im Regierungsbezirk Stralsund nebst Beiträgen zur Biologie des Hallimaschs und Eichenmehltaus. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* **100**: S. 298-317.
- FSC DEUTSCHLAND – VEREIN FÜR VERANTWORTUNGSVOLLE WALDWIRTSCHAFT E. V. (Hrsg.) (2018): *Deutscher FSC®-Standard 3-0*. Freiburg: www.fsc-deutschland.de. 68 S.
- GAYTÁN, Á., MOREIRA, X., CASTAGNEYROL, B., VAN HALDER, I., DE FRENNE, P., MEEUSSEN, C., TIMMERMANS, B., TEN HOOPEN, J., RASMUSSEN, P., BOS, N., JAATINEN, R., PULKKINEN, P., SÖDERLUND, S., COVELO, F., GOTTHARD, K. & TACK, A. (2022): The co-existence of multiple oak leaf flushes contributes to the large within-tree variation in chemistry, insect attack and pathogen infection. *New Phytologist* **235**: S. 1615-1628.
- GLATZER, K. & SCHRAMM, E. (2010): Klimabezogener Umbau der Eichenwälder mit mediterranen Eichen – Eine vorläufige Wirkungs- und Folgenabschätzung. *Knowledge Flow Paper* **5**. 14 S.
- GROSS, G. (1983): Synthesis of β -glucogallin from UDP-glucose and gallic acid by an enzyme preparation from oak leaves. *FEBS Letters* **148**: S. 67-70.
- GRZEBYTA, J., KAROLEWSKI, P., ŻYTKOWIAK, R., GIERTYCH, M., WERNER, A., ZADWORYN, M. & OLEKSYN, J. (2005): Effects of elevated temperature and fluorine pollution on relations between the Pedunculate oak (*Quercus robur*) and oak powdery mildew (*Microsphaera alphitoides*). *Dendrobiology* **53**: S. 27-33.
- GUÉRAUD F., ATALAY M. BRESGEN, A., CIPAK, A., ECKL, P., HU L., JOUANIN, I., SIEMS, W. & UCHIDA, K. (2010): Chemistry and biochemistry of lipid peroxidation products. *Free Radical Research* **44**: S. 1098-1124.
- HAHN, M. & MENDGEN, K. (2001): Signal and nutrient exchange at biotrophic plant-fungus interfaces. *Current Opinion in Plant Biology* **4**: S. 322-327.
- HAJJI, M., DREYER, E., & MARÇAIS, B. (2009): Impact of *Erysiphe alphitoides* on transpiration and photosynthesis in *Quercus robur* leaves. *European Journal of Plant Pathology* **125**: S. 63-72.
- HARMER, R. (1992): The incidence of recurrent flushing and its effect on branch production in *Quercus petraea* (Matt) Liebl growing in southern England. *Annales des Sciences Forestières* **49**: S. 589-597.
- HAUCH, L. & KØLPIN-RAVN, F. (1913): *Egens Meldug*. Særtryk af det forstlige Forsørgsvæsen i Danmark **IV**: S. 64-115.
- HEATH, M. C. (2000): Nonhost resistance and nonspecific plant defenses. *Current Opinion in Plant Biology* **3**: S. 315–319. [https://doi.org/10.1016/S1369-5266\(00\)00087-X](https://doi.org/10.1016/S1369-5266(00)00087-X)
- HEWITT, H. & AYRES, P. (1976): Effect of infection by *Microsphaera alphitoides* (Powdery mildew) on carbohydrate levels and translocation in seedlings of *Quercus robur*. *New Phytologist* **77**: S. 379-390.
- HOGENHOUT, S., VAN DER HOORN, R., TERAUCHI, R. & KAMOUN, S. (2009): Emerging concepts in effector biology of plant-associated organisms. *Molecular Plant-Microbe Interactions* **22**: S. 115-122.

- JARVIS, P. (1964): The adaptability to light intensity of seedlings of *Quercus petraea* (Matt.) Liebl. *The Journal of Ecology* **52**: S. 545-571.
- HUKKANEN, A. T., KOKKO, H. I., BUCHALA, A. J., MCDUGALL, G. J., STEWART, D., KÄRENLAMPI, S. O. & KARJALAINEN, R. O. (2007): Benzothiadiazole induces the accumulation of phenolics and improves resistance to powdery mildew in strawberries. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* **55**: S. 1862–1870. <https://doi.org/10.1021/jf063452p>
- JIANG, Z., WOODLAND, A. & WOLFF, S. (1990): Hydrogen peroxide production during experimental protein glycation. *FEBS Letters* **268**: S. 69-71.
- JOHANN HEINRICH VON THÜNEN-INSTITUT (Hrsg.) (2020): *Dritte Bundeswaldinventur (2012)*. <https://bwi.info/>. Recherche vom 12.03.2020.
- JOHANSSON, O. N., FANTOZZI, E., FAHLBERG, P., NILSSON, A. K., BUHOT, N., TÖR M. & ANDERSSON, M. X. (2014): Role of the penetration-resistance genes 1, 2 and 3 in the hypersensitive response and race-specific resistance. *The Plant Journal* **79**: S. 466–476. <https://doi.org/10.1111/tpj.12571>
- KACZMAREK, B. (2020): Tannic acid with antiviral and antibacterial activity as a promising component of bio-materials—a minireview. *Materials* **13**. <https://doi.org/10.3390/ma13143224>
- KAMOUN, S. (2007): Groovy times: Filamentous pathogen effectors revealed. *Current Opinion in Plant Biology* **10**: S. 358-365.
- KEBERT, M., KOSTÍČ, S., ZLATKOVIĆ, M., STOJNIC, S., ČAPELJA, E., ZORIĆ, M., KIPROVSKI, B., BUDAKOV, B. & ORLOVIĆ, S. (2022): Ectomycorrhizal fungi modulate biochemical response against Powdery mildew disease in *Quercus robur* L. *Forests* **13**: Artikel 1491. 28 S.
- KISS, L. (1998): Natural occurrence of *Ampelomyces* intracellular mycoparasites in mycelia of powdery mildew fungi, *New Phytologist* **140**: S. 709-714.
- KONTRADE, P., SEHR, E.M., WISCHNITZKI, E., GRÜGGEMANN, W. (2019): Comparative transcriptomics-based selection of suitable reference genes for normalization of RT-qPCR experiments in drought-stressed leaves of three European *Quercus* species. *Tree Genetics & Genomes* **15**: 38. <https://doi.org/10.1007/s11295-019-1347-4>
- KURTH, F., MAILÄNDER, S., BÖNN, M., FELDHAHN, L., HERRMANN, S., GROBE, I., BUSCOT, F., SCHREY, S. & TARKKA, M. (2014): *Streptomyces*-induced resistance against oak powdery mildew involves host plant responses in defense, photosynthesis, and secondary metabolism pathways. *Molecular Plant – Microbe Interactions* **27**: S. 891-900.
- LANDESFORSTEN RHEINLAND-PFALZ (Hrsg.) (2020): *Grundsatzanweisung Waldverjüngung im Klimawandel*. Mainz: Ministerium für Umwelt, Energie, Ernährung und Forsten. 39 S.
- MAMANI, A., FILLIPONE, M. P., GRELLET, C., WELIN, B., CASTANARO, A. P. & RICCI, J. C. D. (2012): Pathogen-induced accumulation of an ellagitannin elicits plant defense response. *Molecular Plant-Microbe Interactions* **25**: S. 1430–1439. <https://doi.org/10.1094/MPMI-12-11-0306>
- MARÇAIS, B. & BRÉDA, N. (2006): Role of an opportunistic pathogen in the decline of stressed oak trees. *Journal of Ecology* **94**: S. 1214-1223.
- MARÇAIS, B., KAVKOVA, M. & DESPREZ-LOUSTAU, M.-L. (2009): Phenotypic variation in the phenology of ascospore production between European populations of oak powdery mildew. *Annals of Forest Science* **66**: S. 814. <https://doi.org/10.1051/forest/2009077>
- MARÇAIS, B. & DESPREZ-LOUSTAU, M.-L. (2014): European oak powdery mildew: Impact on trees, effects of environmental factors, and potential effects of climate change. *Annals of Forest Science* **71**: S. 633-642.
- MARINOV, M. G., DIMITROVA, E. D. & PUECH, J.-L. (1997): Kinetics of ellagitannin extraction from oak wood using white wine. *Journal of Wine Research* **8**: S. 29–40. <https://doi.org/10.1080/09571269708718095>
- MAYER, W., GABLER, W., RIESTER, A. & KORGER, H. (1967): Die Isolierung von Castalagin, Vescalagin, Castalin und Vescalin. *Liebigs Annalen der Chemie* **707**: S. 177-181.
- NEGER, F. (1915): Der Eichenmehltau (*Microshaera alni* [Waln.], var. *quercina*). *Naturwissenschaftliche Zeitschrift für Land- und Forstwirtschaft* **13** Heft 1: S. 1-30.
- NEOPHYTOU, C. & MICHIELS, H.-G. (2013): Upper Rhine valley: A migration crossroads of middle European oaks. *Forest Ecology and Management* **304**: S. 89-98.
- OSTERLAMB, E. (1913): Beiträge zum Kampfe gegen den Eichenmehltau. Kurzfassung. Aus: *Erdészeti Lopok VII* (1912). *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* **89**, Jahresbericht für das Jahr 1912: S. 193.
- OZTURK, A., OZYIGIT, I. & SUMER, S. (2020): Investigation of powdery mildew disease in various oak (*Quercus*) trees; a case study from Istanbul/Turkey. *Fresenius Environmental Bulletin* **29**: S. 5029-5037.

- PAP, P., RANKOVIĆ, B. & MAŠIREVIĆ, S. (2012): Significance and need of Powdery mildew control (*Microsphaera alphitoides* Griff. et Maubl.) in the process of regeneration of the Pedunculate oak (*Quercus robur* L.) stands in the Ravni Srem area. *Periodicum Biologorum* **114**: S. 91-102.
- PAP, P., RANKOVIĆ, B. & MAŠIREVIĆ, S. (2013): Effect of temperature, relative humidity and light on conidial germination of oak powdery mildew (*Microsphaera alphitoides* Griff. et Maubl.) under controlled conditions. *Archives of Biological Sciences Belgrade* **65**: S. 1069-1077.
- PAP, P., STOJNIC, S., NIKOLIĆ, N., ORLOVIĆ, A., MARKOVIĆ, M., VASIĆ, V. & STEVANOV, M. (2014): Impact of *Erysiphe alphitoides* (Griffon & Maubl.) U. Braun & S. Takam. on leaf physiological parameters in Pedunculate oak (*Quercus robur* L.) saplings. *Baltic Forestry* **20** No. 1: S. 2-9.
- PEEVER, T. & HIGGINS, V. (1989): Electrolyte leakage, lipoxygenase, and lipid peroxidation induced in tomato leaf tissue by specific and nonspecific elicitors from *Cladosporium fulvum*. *Plant Physiology* **90**: S. 867-875.
- POLLE, A., CHAKRABARTI, K., SCHÜRRMANN, W. & RENNENBERG, H. (1990): Composition and properties of hydrogen peroxide decomposing systems in extracellular and total extracts from needles of Norway spruce (*Picea abies* L. Karst.). *Plant Physiology* **94**: S. 312-319.
- PRIEHRADNÝ, S. (1984): Die Reaktion anfälliger und resistenter Gerstensorten auf pilzliche Krankheitserreger. III. Wasserbilanz. *Phytopathologische Zeitschrift* **98**: S. 218-227.
- REIF, A. & GÄRTNER, S. (2007): Die natürliche Verjüngung der laubabwerfenden Eichenarten Stieleiche (*Quercus robur* L.) und Traubeneiche (*Quercus petraea* Liebl.) – eine Literaturstudie mit besonderer Berücksichtigung der Waldweide. *Waldoekologie online* **5**: S. 79-118.
- Rennenberg, H., Loreto, F., Polle, A., Brilli, F., Fares, S., Beniwal, R. und Gessler, A. (2006): Physiological responses of forest trees to heat and drought. *Plant Biology* **8**: S. 556-571.
- ROMANI, A., SIMONE, G., CAMPO, M., MONCINI, L. & BEFRMINI, R. (2021): Sweet chestnut standardized fractions from sustainable circular process and green tea extract: In vitro inhibitory activity against phytopathogenic fungi for innovative applications in green agriculture. *PLOS ONE* **16**: e0247298. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0247298>
- ROSLIN, T., LAINE, A.-L. & GRIPENBERG, S. (2007): Spatial population structure in an obligate plant pathogen colonizing oak *Quercus robur*. *Functional Ecology* **21**: S. 1168-1177.
- RÖßLER, J., SCHNEBLE, B. & HEIN, S. (2019): Eichennaturverjüngung – Ein altes Verfahren wiederbelebt. *Allgemeine Forstzeitschrift / Der Wald* **74** Heft 12: S. 10-13.
- SAEED, M., SEEGMÜLLER, S., SCHMIDT, P. & HAHN, M. (2023): First report of powdery mildew on Turkey oak (*Quercus cerris*) from Germany. *The Korean Journal of Mycology*. Manuskript angenommen.
- SCHLOSSER, F., BÖHM, S., HORDER, N. & SEEGMÜLLER, S. (2022): Antioxidantienkapazität von Eichen – Gerbstoffe als wesentlicher Beitrag zur herkunftsspezifischen Antwort auf Trockenheit. *Centzralblatt für das gesamte Forstwesen* **139**: S. 73-94.
- SCHRÖDER, T., SCHUMACHER, J. & BRÄSICKE, N. (2014): Schadorganismen an der Traubeneiche. *Allgemeine Forstzeitschrift / Der Wald* **69** Heft 24: S. 30-35.
- SCHWANZ, P., PICON, C., VIVIN, P., DREYER, E., GUEHL, J.-M. & POLLE, A. (1997): Responses of antioxidative systems to drought stress in Pedunculate oak and Maritime pine as modulated by elevated CO₂. *Plant Physiology* **110**: S. 393-402.
- SEEGER, M. (1930): Erfahrungen über die Eiche in der Rheinebene bei Emmendingen (Baden). *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* **106**: S. 201-219.
- SKWAREK-FADECKA, M., NAWROCKA, J., SIESCZYŃSKA, K., PATYKOWSKI, J. & POSMYK, M. (2024): Effect of oak Powdery mildew on ascorbate-glutathione-cycle and other antioxidants in plant-*Erysiphe alphitoides* interaction. *Cells* **13**: 1035. <https://doi.org/10.3390/cells13121035>.
- SOUTRENON, A. (1998): Une experimentation pluri-annuelle confirme l'impact de l'Oïdium sur des jeunes sujets. *Les Cahiers de DSF* **1-2000**: S. 93-94.
- STAATSMINISTERIUM DER FINANZEN, MINISTERIAL-FORSTABTEILUNG (Hrsg.) (1925): Waldbauliche Grundsätze und Vorschriften für den Pfälzerwald. *Mitteilungen aus der Staatsforstverwaltung Bayerns* **16**. 100 S. S. 57 ff.
- SCHWANZ, P. (1997): *Einfluss von erhöhten CO₂-Konzentrationen und oxidativem Stress auf das antioxidative System verschiedener Baumspesies*. Inauguraldissertation. Freiburg: Albert-Ludwigs-Universität. 201 S.
- TAMURA, K., STECHER, G. & KUMAR, S. (2021): MEGA11: Molecular evolutionary genetics analysis version 11. *Molecular Biology and Evolution* **38**: S. 3022–3027. <https://doi.org/10.1093/molbev/msab120>
- THOMAS, F., BLANK, R. & HARTMANN, G. (2002): Abiotic and biotic factors and their interactions as causes of oak decline in Central Europe. *Forest Pathology* **32**: S. 277-307.

TISCHER, A., KLAUS, J., KÜHNE, C., HOFFMANN, B., HARTIG, M. & SCHMIDT, R. (2023): Instabile Fichtenbestände mittels Eichel-Saat rasch umbauen. *Allgemeine Forstzeitschrift / Der Wald* **78** Heft 5: S. 17-21.

UNTERGASSER, A. (2008): DNA Miniprep using CTAB. https://www.untergasser.de/lab/protocols/mini-prep_dna_ctab_v1_0.htm

VON TEUFFEL, K. (2010): Naturnaher Waldbau im Klimawandel. *Allgemeine Forstzeitschrift / Der Wald* **65** Heft 21: S. 33-36.

VAN DIJK, L., ABDELFAHATTAH, A., EHRLÉN, J. & TACK, A. (2022): Soil microbiomes drive aboveground plant-pathogen-insect interactions. *Oikos*: Artikel e09366. 12 S.

VASCONCELOS, A., MATTHES, U. & KONOLD, W. (2013): *Klima- und Landschaftswandel in Rheinland-Pfalz (Klim-LandRP) – Methoden und Ergebnisse des Moduls Wald*. Freiburg: Albert-Ludwigs-Universität. Professur für Landespflege. 333 S.

WATANABE, M., KITAOKA, S., EGUCHI, N., WATANABE, Y., SATOMURA, T., TAKAGI, K., SATOH, F. & KOIKE, K. (2014): Photosynthetic traits and growth of *Quercus mongolica* var. *crispula* sprouts attacked by powdery mildew under free-air CO₂ enrichment. *European Journal of Forest Research* **133**: S. 725-733.

WILHELM, G.-J., HETTESHEIMER, B. & STELZER, J. (2019 A): Eichen-Ökologie für die Praxis, Teil 1: Stärken nutzen. *Allgemeine Forstzeitschrift / Der Wald* **74** Heft 3: S. 34-37.

WILHELM, G.-J., HETTESHEIMER, B. & STELZER, J. (2019 B): Eichen-Ökologie für die Praxis, Teil 3: Lichtkegel. *Allgemeine Forstzeitschrift / Der Wald* **74** Heft 5: S. 48-51.

WILHELM, G.-J., SCHLICKER, T. & MATTHEIS, U. (2021): 20-jährige Messreihe an Buchen-Ausleseebäumen, Teil 2. *Allgemeine Forstzeitschrift / Der Wald* **76** Heft 22: S. 17-19.

ZÁHOROVSKÁ, E. (1984): Die Entwicklung des Eichen-Mehltaus *Microsphaera alphotooides* Griff. Et Maubl. Im Verlaufe der Vegetationsperiode. *Acta Facultatis Rerum Naturalium Universitatis Comenianae Botanica* **XXXI**: S. 83-93.

IV ANHANG

IV.1 Teilvorhaben 2220WK16A4

IV.1.1 Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens

Ziel des Teilvorhabens 1 (2220WK16A4) ist es, mithilfe physiologischer und waldbaulicher Untersuchungen teilweise mehlttauresistente Eichen zu identifizieren. Die Resultate aus dem Projekt werden Forst-PraktikerInnen auf Exkursionen zu den waldbaulichen Demonstrationsflächen vermittelt.

IV.1.2 Bearbeitete Arbeitspakete

AP 1 Waldbauliche Untersuchungen

AP 1.1 Auswahl adulter und juveniler Eichenbestände unterschiedlicher Aridität

Aufbauend auf den Standorts-, Forsteinrichtungs- und Versuchsflächendatenbanken wurden drei 20 bis 30 ha große unterschiedlich aride Eichenalthölzer mit unterschiedlichen Mehltaubefall ausgewählt. Zwei Althölzer wurden im Femelschlag verjüngt und eines im Schirmschlag. Die Verjüngung war auf allen Flächen aufgelaufen.

AP 1.2 Wachstumskundliche und waldbauliche Bestandsaufnahmen

Die Alteichen wurden im August 2023 orientierend mittels Drohnenbefliegung auf ihren Mehltaubefall hin untersucht. In jeder Naturverjüngung wurden acht Probekreise angelegt und jeweils zehn Pflanzen ohne und mit Mehltau dauerhaft markiert. Die Pflanzen wurden jeweils im August 2021-2024 auf ihren Mehltaubefall und die Pflanzenhöhen untersucht. Jeweils im Juni des darauffolgenden Jahres wurde die Wintermortalität ermittelt. Konkurrenzvegetation hatte in den Verjüngungen keine Bedeutung. Aus den Pflanzenansprachen wurden der Anteil dauerhaft befallsfreier Pflanzen, der Höhenzuwachs ohne und mit Mehltau sowie die Mortalität ohne und mit Mehltau hergeleitet.

AP 1.3 Auswahl und Betreuung waldbaulicher Demonstrationsflächen

Aufbauend auf den Standorts-, Forsteinrichtungs- und Versuchsflächendatenbanken wurden vier Kiefern-, Buchen- und Fichten-Baumhölzer mit einzeln oder gruppen- bis horstweise eingemischten mindestens mitherrschenden Eichenanteilen identifiziert. Die Bestände befinden sich in der Reifephase und stehen zur Verjüngung an. Für alle Bestände ist ein Baumartanwechsel im Klimawandel angezeigt (Kiefer $\leq 3,0$ Ekl., Buche ≤ 4 Ekl., Fi ≤ 3 Ekl.). In allen Baumhölzern wurden für die Eichen jeweils mindestens sechs Lichtkegel entsprechend WILHELM *et al.* (2019 B) angelegt, gezäunt und gepflegt. Die Flächen sind nun für waldbauliche Bereisungen durch Praktiker*innen eingerichtet.

AP 2 Pathophysiologie

AP 2.1 Pathophysiologie der Verjüngungen

Die FAWF hat von den dauerhaft markierten Pflanzen in den Probekreisen (vgl. AP 1.2) jeweils im August 2021-2024 Blattmaterial gewonnen und auf seine oxidative Belastung, Antioxidantien, Biomembranschäden, Gesamtphenole, Ellagtannine, sowie Vescalagin und Castalagin hin untersucht. Die Aktivitäten von Glutathionreductase und Galloyltransferase wurden einmal 2022 bzw. orientierend an einzelnen Proben verschiedener Jahrgänge analysiert. Die Lignifizierung wurde einmal an den Proben aus dem Jahr 2021 gemessen. Es wurde geklärt, wie sich kranke und gesunde Eichen physiologisch voneinander unterscheiden.

AP 2.2 Freie Absaaten im Pflanzgarten

Am Genresourcenzentrum Antonihof wurde ein Anbauversuch mit elf rheinland-pfälzischen Traubeneichenherkünften angelegt. Die Pflanzen wurden jeweils im August 2021 bis 2024 auf ihren Mehltaubefall und ihr Höhenwachstum hin untersucht. Im Jahr 2023 wurde die Johannistriebbildung eingehender beobachtet. Ausgewählte Provenienzen wurden 2022 und 2023 unter Klimakammerbedingungen ohne und mit Mehltau kultiviert und beprobt. Die Proben wurden insbesondere auf den Syntheseweg der hydrolysierbaren Gerbstoffe hin analysiert (Vescalagin und Castalagin, β -Glucogallin, Galloyltransferase und UDP-Glucose). Für die Aktivitätsmessung der Galloyltransferase wurde eine neue HPLC-basierte Methode ohne radioaktiv markierte Substanzen entwickelt und ihre apparente Aktivität in vivo erstmals charakterisiert.

AP 2.3 Gepfropfte Pflanzen

Statt der gepfropften Pflanzen wurden in großem Umfang Sämlinge von Traubeneiche, Stieleiche, Zerreiche und Roteiche unter Klimakammerbedingungen ohne und mit Mehltauinfektion für die weiterführenden Untersuchungen der RPTU Kaiserslautern kultiviert.

AP 4 Koordination und Berichte

Die FAWF hat insgesamt sechs Projekttreffen der Verbundpartner durchgeführt. Die FAWF hat die Ergebnisse (neben anderen) auf den Veranstaltungen „Neue Forschungsergebnisse für die Forstliche Praxis“ (drei Termine) und auf den Waldzustandspressekonferenzen der Rheinland-Pfälzischen und Saarländischen Umweltministerien präsentiert.

IV.1.3 Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens

Derr Anteil anscheinend gesunder Individuen hat in den untersuchten Naturverjüngungen von Jahr zu Jahr abgenommen (vgl. Abb. 4 A). Unter den Eichen gibt es wohl keine vollständig resistenten Individuen (vgl. Kap. II.1.1). Gleichwohl finden sich aber einzelne Pflanzen und Herkünfte, die weniger unter der Pilzkrankheit leiden (vgl. Abb. 6, Kap. II.1.1). Außerdem unterschieden sich beispielsweise die Herkünfte aus zwei räumlich weit getrennten europäischen Regionen sowie die einzelnen Naturverjüngungen einer Region in ihrem Krankheitsgeschehen (vgl. Tab. 2; Abb. 4 B; Kap. II.1.1.; Kap. II.1.2). Darüber hinaus korrelieren Mutterbäume und Nachkommenschaften in ihrer Mehltauanfälligkeit (vgl. Abb. 9; Kap. II.1.3). Demzufolge ist die Möglichkeit von Differenzen in der Mehltauanfälligkeit aufgrund erblicher Unterschiede nicht auszuschließen.

An Mehltau erkrankte Eichen wiesen allenfalls leicht erhöhte Blattgehalte an Wasserstoffperoxid auf (vgl. Kap. II.1.1.4.; Tab. 5). Ihre Ascorbatkonzentrationen waren mitunter sogar signifikant verringert (vgl. Kap. II.1.1.4; Abb. 10). Auch die Glutathionreductase-Aktivitäten hatten sich unter dem Pathogeneinfluss ebensowenig verändert wie die Biomembranschäden (Malondialdehyd; vgl. Kap. II.1.1.4; Tab. 6). Offensichtlich leiden die Eichen mit Mehltau nicht an erhöhtem oxidativen Stress (vgl. Kap. II. 1. 4). Dementsprechend fallen erkrankte Bäume auch nicht im Wachstum zurück (vgl. Tab. 3; Kap. II.1.2). Dennoch leiden die Verjüngungen mit Mehltau unter erhöhter (Winter-)Mortalität (vgl. Abb.8; Kap. II. 1.2).

Mehltauerkkrankung und die Blattgehalte an Gesamtphenol und Ellagttanninen standen 2021 in einem quantitativen Zusammenhang (vgl. Tab. 8, Abb. 11 A, B; Kap. II.1.1.5). Dies ließ sich weniger auf Ligninreaktionen zurückführen, sondern stand vielmehr mit dem Vorkommen von Vescalagin und Castalgin (VC) in Zusammenhang (vgl. Tab. 10; Tab. 11; Abb. 12; Kap. II.1.1.5). In einem von der FAWF finanzierten Folgeprojekt wurde zwischenzeitlich geklärt, dass VC die Keimung der Mehltaukonidien signifikant behindern und die Ausbreitung des Pilzes mittels Elongationshyphen signifikant eindämmen. Offensichtlich sind VC ein Schlüssel für die Toleranz und (Teil-)Resistenz der Eichen gegen den Mehltaupilz.

Eichen mit Mehltau haben deshalb mehr VC in ihren Blättern, weil auch ihr Vorläufer, β -Glucogallin (β -GG), häufiger vorkommt (vgl. Abb. 13 A, B; Kap. II.1.1.5). Das Schlüsselenzym für die Synthese von β -GG, die Galloyltransferase I (ec 2.4.1.136), ist in den Blättern mit Mehltau jedoch allenfalls marginal aktiver (vgl. Abb. 13 C; Kap. II.1.1.5). Auf der anderen Seite kommt das Substrat für die β -GG-Synthese, die UDP-Glucose (U-Gluc) nur in Eichenblättern mit Mehltau vor und lässt sich in gesunden Blättern nur selten und nur in Spuren beobachten (vgl. Abb. 13 D; Kap. II.1.1.5). Vor diesem Hintergrund könnte das Enzym, das die Synthese von U-Gluc katalysiert, die UDP-Glucose-Phosphorylase (UGPase; ec 2.7.7.9), ausschlaggebend für die Mehltauabwehr der Eichen sein. Dementsprechend dürfte die UGPase ein aussichtsreicher Kandidat für die Entwicklung eines Schnelltests auf Mehltauresistenz darstellen (vgl. Kap. II.1.5).

Im Rahmen des MetaEiche-Projekts wurden unter spezifischen Fragestellungen vier waldbaupraktische Anschauungsobjekte für die Möglichkeiten und Grenzen der kleinflächigen Eichenverjüngung angelegt. Erste Ergebnisse der Verjüngungsaufnahmen zeigten, dass die Mastern 2022 bzw. 2025 mit 30 und 45 Eicheln / m² genug Saatgut ergeben haben, um die Naturverjüngung einzuleiten (vgl. Tab. 13; Kap. II.1.1.7). Die hangparallele Bodenverwundung hat am Steilhang nicht zu mehr Saatgut geführt (vgl. Tab. 13; Kap. II.1.1.7). Die Keimrate lag 2023 zwischen etwa 25 und 45 %, so dass je nach Demonstrationsfläche Verjüngungsdichten von 20 bis 110 Sämlingen erreicht worden sind (vgl. Tab. 14; Kap. II.1.1.7). Demzufolge kann das Auflaufen der Verjüngung als erfolgreich angesehen werden. Auf den Demonstrationsflächen hat sich zwischenzeitlich Mehltau eingefunden, der bereits über die Hälfte aller Sämlinge befallen hat und mitunter zu erheblicher Mortalität geführt hat (vgl. Tab. 15, Kap. II.1.1.7). Die Aufnahmen werden auch nach Projektende weitergeführt und für Bereisungen durch Forstpraktiker*innen in Exkursionsführern aufbereitet.

IV.2 Teilvorhaben 2220WK16B4

IV.2.1 Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens

Gegenstand des Teilvorhabens 2 (2220WK16AB) ist die Untersuchung der Cytologie, Biochemie und Molekularbiologie der Infektion des Eichenmehltaus (EMT) auf Pflanzen mit unterschiedlicher, genetisch determinierter Empfindlichkeit bzw. (Teil-)Resistenz. Ziel dieser Arbeit ist eine detaillierte Beschreibung des Infektionsvorgangs des Mehltapilzes und der durch die Infektion ausgelösten Reaktionen der Pflanzenzellen. Durch Vergleich des Infektionsvorgangs von EMT auf empfindlichen und (teil-)resistenten Pflanzen sollen die cytologischen, biochemischen und molekularen Vorgänge charakterisiert werden, die entscheidend für den Erfolg einer Infektion bzw. der Abwehrreaktionen der Pflanze sind. Aufgrund der erhaltenen Erkenntnisse soll ein Testverfahren entwickelt werden, mit dem eine große Zahl an Pflanzen auf den Grad ihrer Empfindlichkeit oder Resistenz überprüft werden kann. Die Laborergebnisse sollen mit jungen Bäumen unter kontrollierten Bedingungen und im Freiland validiert werden und dabei helfen, Mehltau-resistente Eichen zu identifizieren und zu fördern.

IV.2.2 Bearbeitete Arbeitspakete

AP 3 Cytologie, Biochemie, Molekularbiologie

AP 3.1 Isolierte Blätter

Die RPTU hat ein Verfahren zur kontrollierten Mehltau-Infektion von isolierten Eichenblättern etabliert und validiert. Die begleitenden cytologischen und mikroskopischen Untersuchungen wurden etabliert und erste molekularbiologische Analysen durchgeführt.

AP 3.2 gepfropfte Pflanzen

Die Untersuchungen wurden nicht an gepfropften Pflanzen, sondern an wurzelechten Sämlingen freier Absaat aus Klimakammeranzucht durchgeführt. An diesen Pflanzen wurden die in AP 3.1 erarbeiteten Methoden angewendet.

AP 3.4 Adulte Eichen und Jungpflanzen in situ

Adulte und juvenile Pflanzen aus dem südwestdeutschen Raum wurden auf ihre Mehltauinfektion hin untersucht (vgl. AP 1.2). Im Mittelpunkt der Untersuchungen standen i) differenzielle (Teil-)Resistenzen zwischen verschiedenen Eichenarten und ii) die Identifizierung der die Mehltauinfektion verursachenden Arten.

AP 3.5 Differentielle Resistenz, Grundlagen

Anhand der Methode aus AP 3.1. wurden Sämlinge verschiedener Eichenarten aus Klimakammeranzucht (Alternative zu AP 3.2) vergleichend auf ihre Mehltauresistenz hin untersucht sowie die Ursachen für die Differenzen analysiert.

AP 4 Berichte

Die RPTU hat die Ergebnisse auf der 63. Deutschen Pflanzenschutztagung im September 2023 in Göttingen in einem Vortrag und auf einem Poster präsentiert.

IV.2.3 Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens

Es ist gelungen, eine Methode zur reproduzierbaren kontrollierten Infizierung von Eichenblättern mit Mehltau zu etablieren (vgl. Kap. II.1.2.1). Die Infektion lässt sich visuell und mikroskopisch verfolgen (vgl. Abb. 17 A-C; Kap. II.1.2.1). Als besonders hilfreich hat sich erwiesen, drei Färbemethoden für die Sichtbarmachung von Proteinen, Chitin und Callose für die mehltauinfizierten Blätter zu optimieren (vgl. Abb. 18, 19, Kap. II.1.2.2). Auf dieser Basis wurde klar, dass der Mehltau auf jungen Blättern aus den Klimakammern auch nach 10 Tagen noch aktiv ist, auf vergleichbar jungen Blättern aus dem Freiland in der zweiten Sommerhälfte aufgrund deren reduzierter Vitalität bereits nach drei Tagen sein Wachstum eingestellt hat (vgl. Abb. 20; 21 A, B; Abb. 22; Kap. II.1.2.3). Während Traubeneichen sehr anfällig für Mehltau sind, erwiesen sich Zerreichen als teilweise und Roteichen als vollständig gegen den Blattpilz resistent (vgl. Abb. 25 A-O; Kap. II.1.2.5). Zwar können die Mehltaukonidien auf allen Blättern keimen, im Gegensatz zu den Traubeneichen kommt es aber bei den Zerreichen nur zu einem geringen Wachstum und bei Roteichen zu keiner Entwicklung von elongierenden Hyphen, die eine erfolgreiche Haustorienbildung anzeigen (vgl. Abb. 26 A-O; Abb. 27; Kap. II.1.2.5). Dennoch gibt es in der Region Kaiserslautern auch auf Zerreichen gelegentliche Mehltauinfektionen (vgl. Abb. 38 A, B; 39 A-C; Kap. II.1.2.12) und selbst die Roteichen blieben nicht immer verschont (vgl. Abb. 40 A-G).

Im EichenResist-Folgeprojekt der FAWF waren im Spätsommer 2024 drei Herkünfte in einem Vergleichsanbau im Genressourcenzentrum Antonihof nahezu gesund, insbesondere die Herkunft Rheingrafenstein, sowie zwei Herkünfte stark befallen, darunter Heidenkopf (vgl. Abb. 32, Kap. II.1.2.8). Eichensämlinge aus Rheingrafenstein erwies sich im Infektionstest mit isolierten Blättern als tendenziell resistenter als solche aus Heidenkopf (vgl. Abb. 33, Kap. II.1.2.8).

Im Rahmen des MetaEiche-Projekts wurde eine Methode zur Quantifizierung der Mehltauinfektion mittels RT-qPCR etabliert (vgl. Abb. 24; Kap. II.1.2.4). Mit Mehltau inokulierte Eichenblätter haben das eine Pflanzenabwehr anzeigende Gen PR1 signifikant mehr transkribiert als die gesunden Bäume (vgl. Abb. 31, Kap. II.1.2.7). Auf der Pilzseite zeigte sich in der Region Kaiserslautern eine erhebliche Diversität des Mehltaus. Insbesondere kam neben dem dominierenden *Erysiphe alphitoides* auch *E. quercicola* häufig vor (vgl. Tab. 18; Abb. 34; Kap. II.1.2.9).

Trauben-, Zerr- und Roteichen zeigen auf cytologischer Ebene keine sichtbaren Abwehrreaktionen (Anhäufung von reaktiven Sauerstoffspezies [ROS, H₂O₂] oder Zelltod) auf die Infektion. Eine Ausnahme war die Bildung von Callose bei Zerreichen unter den Appressorien des Pilzes (vgl. Abb. 28-30; Kap. II.1.2.6). Einen wirksamen Schutz gegen die Mehltauinfektion bildeten jedoch vor allem Vescalagin und Castalagin (VC), die beiden wichtigsten hydrolysierbaren Eichen-Ellagtannine. VC behindern die Sporenkeimung ebenso signifikant wie sie die Elongationshyphen bremsen (vgl. Abb. 35, 36 A-E; Kap. II.1.2.11).

**Evidenz mehltaresistenter Eichen für die Waldverjüngung im Klimawandel
(MetaEiche)**

Erfolgskontrollberichte

Erfolgskontrollbericht

Zuwendungsempfänger: Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz

Förderkennzeichen: 2220WK16A4

Vorhabenbezeichnung: Evidenz mehltaresistenter Eichen für die Waldverjüngung im Klimawandel.

Teilvorhaben 1: Waldbau und Physiologie in kleinflächigen Eichen-Naturverjüngungen unter Berücksichtigung der Mehltauinfektion

Laufzeit des Vorhabens:

01.07.2021-31.01.2025

1. Beitrag zu den förderpolitischen Zielen

Eichen erhöhen nicht nur die Anpassungsfähigkeit der Wälder an den Klimawandel, weil sie wärme- und trockenresistent sowie bodenschonend sind, sie bilden auch die reichsten und vielfältigsten Lebensgemeinschaften aller unserer Waldlebensraumtypen. Deshalb ist es wünschenswert, ihren Anteil am Wald zu erhöhen. Allerdings behindert der Mehltaubefall ihren Etablierungserfolg. Zu dem Ziel, dieses Hindernis zu überwinden, hat das MetaEiche-Projekt einen substanziellen Beitrag geleistet. Nun sind die natürlichen Resistenzmechanismen gegen Mehltau besser verständlich. Auf Grundlage des Wissens über die Krankheitsursachen und deren Auswirkungen können nun die gängigen waldbaulichen Betriebsformen (Femelhieb und Schirmschlag) auf ihre Eignung zur Sicherung der Stabilität, Vitalität sowie Resilienz und Resistenz der Eichenbeteiligung in Waldökosystemen hin geprüft werden. Jetzt gibt es die Möglichkeit, die Betriebsformen so zu modifizieren, dass das Ziel, den Eichenanteil in den Wäldern zu erhöhen, näher gerückt ist.

2. Erzielte Ergebnisse

Der Anteil anscheinend gesunder Individuen hat in den untersuchten Naturverjüngungen von Jahr zu Jahr abgenommen (vgl. Abschlussbericht Teil 1 (AB1), Kap. II.1.1.1, Abb. 4 A). Unter den Eichen gibt es wohl keine vollständig resistenten Individuen (vgl. AB1, Kap. II.1.1). Gleichwohl finden sich aber einzelne Pflanzen und Herkünfte, die weniger unter der Pilzkrankheit leiden (vgl. AB1, Kap. II.1.1, Abb. 6). Außerdem unterschieden sich beispielsweise die Herkünfte aus zwei räumlich weit getrennten europäischen Regionen sowie die einzelnen Naturverjüngungen einer Region in ihrem Krankheitsgeschehen (vgl. AB1, Kap. II.1.1., Kap. II.1.2, Tab. 2; Abb. 4 B;). Darüber hinaus korrelieren Mutterbäume und Nachkommenschaften in ihrer Mehltauanfälligkeit (vgl. AB1, Kap. II.1.3, Abb. 9;). Demzufolge ist die Möglichkeit von Differenzen in der Mehltauanfälligkeit aufgrund erblicher Unterschiede nicht auszuschließen.

An Mehltau erkrankte Eichen wiesen allenfalls leicht erhöhten Blattgehalte an Wasserstoffperoxid auf (vgl. AB1, Kap. II.1.1.4., Tab. 5). Ihre Ascorbatkonzentrationen waren mitunter sogar signifikant verringert (vgl. AB1, Kap. II.1.1.4, Abb. 10). Auch die Glutathionreductase-Aktivitäten hatten sich unter dem Pathogeneinfluss ebenso wenig verändert wie die Biomembranschäden (Malondialdehyd; vgl. AB1, Kap. II.1.1.4, Tab. 6). Offensichtlich leiden die Eichen mit Mehltau nicht an erhöhtem oxidativen Stress (vgl. AB1, Kap. II. 1. 4). Dementsprechend fallen erkrankte Bäume auch nicht im Wachstum zurück (vgl. AB1, Kap. II.1.2, Tab. 3). Dennoch leiden die Verjüngungen mit Mehltau unter mehr (Winter-)Mortalität (vgl. AB1, Kap. II. 1.2, Abb.8).

Die Mehltauerkrankung und die Blattgehalte an Gesamtphenol und Ellagantanninen korrelierten 2021 signifikant (vgl. AB1, Kap. II.1.1.5, Tab. 8, Abb. 11 A, B). Dies ließ sich weniger auf Ligninreaktionen zurückführen (vgl. AB1, Kap. II.1.1.5, Tab. 10). Vielmehr hatten die Eichenblätter ihre wichtigsten Tannine, Vescalagin und Castalagin (VC), umso mehr angereichert, je höher die Infektionsrate war (vgl. AB1, Kap. II.1.1.5, Tab. 11, Abb. 12, Abb. 13 A). In einem von der FAWF finanzierten Folgeprojekt wurde zwischenzeitlich geklärt, dass VC die Keimung der Mehltaukonidien signifikant behindern und die Ausbreitung des Pilzes mittels Elongationshyphen signifikant eindämmen. Offensichtlich sind VC der Schlüssel für die Toleranz und (Teil-)Resistenz der Eichen gegen den Mehltaupilz.

Mit der VC-Anreicherung einhergehend häuften die Eichen den entscheidenden VC-Vorläufer β -Glucogallin (β -GG), an, aktivierten jedoch nicht substanziell das Schlüsselenzym Galloyltransferase I (ec 2.4.1.136; vgl.

AB1, Kap. II.1.1.5, Abb. 13 B, C). Vielmehr kommt die UDP-Glucose (UG) als entscheidendes Substrat für die β -GG-Synthese nur in Eichenblättern mit Mehltau merklich vor (vgl. AB1, Kap. II.1.1.5, Abb. 13 D). Vor diesem Hintergrund könnte das Enzym für die UG-Synthese, die UDP-Glucose-Phosphorylase (UGPase; ec 2.7.7.9) ausschlaggebend für die Mehltauabwehr der Eichen sein. Dementsprechend dürfte die UGPase ein aussichtsreicher Kandidat für die Entwicklung eines Schnelltests auf Mehltauresistenz darstellen (vgl. Kap. II.1.5).

Zur Veranschaulichung der Ergebnisse wurden vier Lichtkegelverjüngungen mit je sechs Probeflächen angelegt. Im Durchschnitt waren die Flächen zu 50 bis 70 % überschirmt (vgl. AB1, Kap. II.1.1.7, Tab. 13). Die Masten 2022 bzw. 2024 haben mit 30 und 45 Eicheln / m² genug Saatgut für eine Naturverjüngung ergeben (vgl. AB1, Kap. II.1.1.7, Tab. 13). Die hangparallele Bodenverwundung hat am Steilhang nicht zu mehr Saatgutrückhalt geführt (vgl. AB1, Kap. II.1.1.7, Tab. 13). Die Keimrate 2023 von 25 bis 45 % sicherte ein erfolgreiches Auflaufen der Verjüngung bei dem je nach Demonstrationsfläche Verjüngungsdichten von 20 bis 110 Sämlingen je m² erreicht worden sind (vgl. AB1, Kap. II.1.1.7, Tab. 14). Auf den Demonstrationsflächen hat sich zwischenzeitlich Mehltau eingefunden, der bereits über die Hälfte aller Sämlinge befallen hat und mitunter zu erheblicher Mortalität geführt hat (vgl. AB1, Kap. II.1.1.7, Tab. 15). Die Aufnahmen werden auch nach Projektende weitergeführt und für Bereisungen durch Forstpraktiker*innen in Exkursionsführern aufbereitet.

3. Fortschreibung des Verwertungsplans

3.1. Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen und erteilte Schutzrechte

Die Ergebnisse des MetaEiche-Projekts bewegen sich im Bereich der Grundlagenforschung mit Ausrichtung zur forstwirtschaftlichen Anwendung. Die Arbeiten zielten nicht auf Bereiche der industriellen Forschung oder der experimentellen Entwicklung ab. Dementsprechend waren Erfindungen oder eine anderweitige Generation patentrechtlich geschützten geistigen Eigentums nicht Ziel des Vorhabens. Vielmehr werden sämtliche Erkenntnisse dauerhaft barrierefrei zur Verfügung stehen (Exkursionen, Schulungen, Veröffentlichungen, Daten-repositorien; s. u.).

3.2. Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende (mit Zeithorizont)

Die Erkenntnisse wurden schon während der aktiven Projektphase dem Forstwesen (v.a. Forstbetrieben und Forstverwaltungen) zur Verfügung gestellt. Dazu dienten bisher hauptsächlich Besprechungen mit den Wirtschaftler*innen und mit Vertretern von Landesforsten Rheinland-Pfalz vor Ort sowie Vorträge im Rahmen von Aus- und Fortbildungsveranstaltungen. Landesforsten Rheinland-Pfalz ist für die Bewirtschaftung des Staatswaldes, die Betreuung des Kommunalwaldes und die Beratung des Privatwaldes in Fragen der Waldwirtschaft, besonders des Waldbaus, zuständig. Vor diesem Hintergrund stand das Projektteam besonders mit dem Waldbaureferenten von Landesforsten Rheinland-Pfalz in ständigem Austausch. Dies umfasste auch eine Bereisung der Demonstrationsflächen. Hervorzuheben ist auch, dass der Mehltau Thema der Landesforsten-Veranstaltungsreihe „Aktuelle Versuchs- und Forschungsergebnisse für die forstliche Praxis“ war (drei Seminare).

Für die allgemeine Öffentlichkeit wurden die Projektergebnisse (zusammen mit den Erkenntnissen aus anderen Waldklimafonds-Projekten) gesondert aufbereitet. So bildeten sie ein Sonderkapitel zu den Waldzustandsberichten Rheinland-Pfalz, Saarland und Baden-Württemberg 2023 und wurden auf den Pressekonferenzen in Mainz und im Saarland besonders dargestellt. Ein längeres Interview fand 2024 Eingang in einen Artikel der *Rheinzeitung*. Die Ergebnisse des MetaEiche-Projektes bildeten schließlich auch einen Teil des *Heimatjahrbuchs des Landkreises Kaiserslautern* 2025. Auch in Zukunft werden die Ergebnisse weiterhin Teil der allgemeinen FAWF-Pressearbeit sein.

Die Aufnahmen auf den Demonstrationsflächen werden fortgeführt und werden weiterhin in die einschlägigen Exkursionsführern Eingang finden. Die Exkursionsführer bilden die Grundlage für die Aus- und Fortbildung von Wirtschaftler*innen, wenn die Demonstrationsflächen entsprechend aussagekräftige waldbaupraktischen Anschauungsobjekte geworden sind. Besonderes Augenmerk gilt auf diesen Flächen dem Ziel, die Eignung der waldbaulichen Systeme herauszuarbeiten. Beispielsweise haben die MetaEiche-Untersuchungen neue Grenzwerte für die Mindestkeimlingsdichte unter dem Mehltaeinfluss ergeben (vgl. AB1, Kap. II.1.1.2). Andererseits haben die MetaEiche-Ergebnisse nicht auf unterschiedliche Krankheitsverläufe bei unterschiedlichen Betriebsformen hingewiesen, so dass ein Wechsel des Waldbauverfahrens wegen des Mehltaus derzeit nicht angezeigt erscheint.

Schon heute ist die Rückkopplung auf Beratungen, Schulungen und Veröffentlichungen aus dem Projekt in der Fachöffentlichkeit regelmäßig sehr positiv und bestärkt die Waldbaupraktiker*innen im Land, auf die kleinflächige Naturverjüngung der vorhandenen Alteichen zu setzen. So hat sich die Verwertung der MetaEiche-Ergebnisse als günstig erwiesen und wird in der Zukunft mittel- bis langfristig in der gleichen Weise weiterverfolgt.

Auf diese Weise verschaffen die Ergebnisse des MetaEiche-Projekts der Forstwirtschaft betriebswirtschaftliche Vorteile. Der direkte Nutzen besteht darin, dass sie die Betriebe ermutigen, auf die Naturverjüngung zurückzugreifen. Die Naturverjüngung spart etwa zwei Drittel bis drei Viertel der Kosten einer Pflanzung ein (GÜRTH & VÖHRINGER, 1993; HESSE, schriftliche Mitteilung, 2020). Dies ergibt einen Kostenvorteil von ca. 210 Mio € / a auf Bundesebene¹. Diese Zahl dürfte um die Inflation bereinigt langfristig für die nächsten 50 Jahre gelten. Demgegenüber belastet die Pflanzung die Eichenwirtschaft mit den höchsten Kulturkosten überhaupt (ALBERT & WOMELSDORF, 1989).

Indirekt nutzen die Ergebnisse des MetaEiche-Projekts den Forstbetrieben, indem sie den Eichenanbau voranbringen. Die Eichenbetriebsklassen sind betriebswirtschaftlich schon heute besonders erfolgreich. Beispielsweise erwirtschaftet sie im Pfälzerwald mit 7,5 % des Gesamteinschlags 12 % aller Holzeinnahmen. Im Forstamt Johanniskreuz werden auf ihrer Basis mit lediglich 1 % des Holzaufkommens 15 % aller Einnahmen generiert (EGIDI, 2007). Insbesondere bei Furnier- und Schneideholzproduktion ergeben sich für gute Ertragsklassen die höchsten Reinerträge aller Baumarten überhaupt (ALBERT & WOMELSDORF, 1989). Dem stehen auf der Ebene der Betriebsklasse wegen der langen Umtriebszeiten nur 50 % der Kulturkosten einer Fichtenbetriebsklasse gegenüber, sofern auf Naturverjüngung oder Saat zurückgegriffen werden kann (ALBERT & WOMELSDORF, 1989; HESSE, schriftl. Mitt., 2020). Diese Vorteile fließen den Forstbetrieben langfristig in den nächsten 200 Jahren zu.

Schon früher war die Betriebssicherheit ein Kennzeichen der Eichenwirtschaft (ALBERT & WOMELSDORF, 1989). Heute gelten die Eichen darüber hinaus als Rückgrat für den Aufbau klimastabiler Mischwälder. Mischwälder „erweisen sich im Klimawandel als besonders anpassungsfähig und bieten Gewähr für die Erhaltung der Wälder und ihrer vielfältigen Funktionen (...)“ (LANDESREGIERUNG RHEINLAND-PFALZ & VERTRETUNGEN DER WALDBESITZENDEN; 2019). Die MetaEiche-Ergebnisse leisten direkt und indirekt einen Beitrag zum Aufbau solcher Wälder. Deren Anpassungsfähigkeit verringert die Risikokosten für die Forstbetriebe. Die Risikokosten können sich in echten Ausgaben oder in Wertminderungen äußern (SPEIDEL, 1984). Echte Ausgaben entstehen beispielsweise, wenn ein Bestand durch einen Klimawandeleinfluss vernichtet wird und wiederhergestellt werden muss. In dieser Situation befinden sich derzeit viele Fichtenbetriebe. Allein in Rheinland-Pfalz verursachte die Wiederherstellung abgängiger Fichtenbestände 2022 in etwa 22 Mio. € Kosten². Solche Kosten bleiben den Forstbetrieben in jährlich wechselnder Höhe erspart, wenn sie auf Eiche umsteigen³.

Wertminderungen sind beispielsweise in schüttelebenden Douglasienbeständen zu konstatieren, in denen der Holzzuwachs unter dem Krankheitseinfluss um bis zu 50 % schwindet. Dies bedeutet einen Wertverlust von bis zu 16 Mio. € im Jahr allein für Rheinland-Pfalz⁴. Solche Risiken sind bei den Eichen bisher untergeordnet. Die Vorteile im Risikomanagement kommen den Forstbetrieben langfristig und dauerhaft zugute.

Vor allem jedoch steht der volkswirtschaftliche Nutzen der MetaEiche-Ergebnisse im Vordergrund. Durch eine Verbesserung der Sicherheit des waldbaulichen Handelns trägt das Projekt dazu bei, die volkswirtschaftlich gebotene Erhöhung des Eichenanteils im Klimawandel zu realisieren und den Forst-, Holz- und Papier-Cluster weiter zu stärken. Schon heute initiiert das Eichenholzaufkommen von jährlich ca. 3,1 Mio. m³ in Deutschland rein rechnerisch Umsätze von wohl über 9 Mrd. €. In Zukunft wird das Aufkommen um fast 90 % und die Umsätze möglicherweise auf über 18 Mrd. € anwachsen (OEHMICHEN *et al.*, 2017; FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE E. V., 2020; SEEGMÜLLER, 2005). Dies hilft nicht zuletzt, wie in der jüngeren Vergangenheit in Rheinland-Pfalz schon geschehen, Beschäftigung im ländlichen Raum weiter zu entwickeln (JOCHUM & SEEGMÜLLER, 2016).

Fazit:

- 1) Die Praxis nimmt die Ergebnisse des MetaEiche-Projekts mit Interesse auf.
- 2) Die Erkenntnisse tragen direkt dazu bei, den Forstbetrieben bundesweit einen Kostenvorteil von bis zu 210 Mio. € im Jahr durch die Naturverjüngung zu sichern.
- 3) Die Erkenntnisse tragen indirekt dazu bei, den Eichenanbau als Betriebsklasse mit den höchsten Reinerträgen überhaupt voranzubringen.
- 4) Die Ergebnisse tragen dazu bei, die Betriebssicherheit zu erhöhen und die Risikokosten zu verringern.

¹ Berechnungsgrundlage: Eichenfläche rezent: 1,13 Mio ha (BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG UND LANDWIRTSCHAFT, 2014). Umtriebszeit 200 a => 282 tsd. ha Verjüngungsfläche in 50 a => 5.700 ha / a. Arealerweiterung: klimawandelbedingte Verdopplung in 50 a (HANE-WINKEL *et al.*, 2013) = 22.600 ha / a. => Verjüngungsfläche insgesamt 28.300 ha / a. Annahme: Prinzipiell ist es möglich, 50 % der Fläche natürlich zu verjüngen. Kosten für Naturverjüngung 5.000,- € / ha. Kosten für Pflanzung 20.000,- € / ha (rheinland-pfälzische Waldbewertungspraxis, HESSE, schriftl. Mitt., 2020).

² Berechnungsgrundlage: Bestandesbedrohende Schäden auf 4.400 ha (DELB *et al.*, 2023); 5.000,- € Kulturkosten für die Begründung eines LH-NH-Mischbestandes (rheinland-pfälzische Waldbewertungspraxis, HESSE, schriftl. Mitt., 2020).

³ Anmerkung: Selbst die Prachtkäferproblematik tritt nur gelegentlich auf und ist aus Mischwäldern unbekannt. Im Forstwirtschaftsjahr 2022/23 fand sie noch keinen Eingang in die Abhandlung zur Waldschutzsituation (DELB *et al.*, 2023).

⁴ Berechnungsgrundlage: 47.000 ha Dou in Rheinland-Pfalz, Durchschnittsalter 40 Jahre, durchschnittliche Ertragsklasse 1,8, durchschnittlicher Bestockungsgrad 0,9 (Quelle: Forsteinrichtungsdatenbank Rheinland-Pfalz). Berechnung mit Hilfe der *Hilfstafeln für die Forsteinrichtung* (MINISTERIUM FÜR LANDWIRTSCHAFT, WEINBAU UND FORSTEN, 1980). Durchschnittspreis Dou: 80 € / fm.

- 5) Im Vergleich zum Fichtenanbau vermied die Eichenwirtschaft 2022 allein in Rheinland-Pfalz Wiederherstellungskosten von bis zu 22 Mio. €. Im Vergleich zum Douglasienanbau vermeidet die Eichenwirtschaft allein in Rheinland-Pfalz Wertminderungen durch Zuwachseinbußen von bis zu 16 Mio. € im Jahr.
- 6) Volkswirtschaftlich tragen die Projektergebnisse dazu bei, Umsätze von zusätzlich ca. 9 Mrd. € im Jahr in der Forst-, Holz- und Papierwirtschaft zu generieren.
- 7) Alle wirtschaftlichen Vorteile machen sich langfristig, also mit einem Zeithorizont über vier Jahre hinaus, bemerkbar.

3.3. Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende (mit Zeithorizont)

Der Zeithorizont der wissenschaftlichen Erfolgsaussichten fällt kürzer aus als der für die wirtschaftlichen, da sich die relevanten Erkenntnisse unmittelbar bereits im Laufe des Projekts eingestellt haben. Diese dienten dadurch schon bisher der Stärkung forstwirtschaftlichen Agierens im Klimawandel. So wurden die MetaEiche-Ergebnisse von den Forstpraktiker*innen positiv aufgenommen und haben sie in der Überzeugung bestärkt, vermehrt auf die kleinflächige Naturverjüngung (reliktischer) Eichen zu setzen, um die klimastabilen Mischwälder der Zukunft voranzubringen (s. o.). Darüber hinaus haben sie bereits die Kompetenz behördlichen Handelns in waldbaulichen Fragen (Bewirtschaftung des Staatswaldes, Betreuung des Kommunalwaldes und Beratung des Privatwaldes) gestärkt, indem sie die Machbarkeit der Lichtkegelverjüngung über wachstumskundliche Erkenntnisse hinaus (BALTRUSCHAT *et al.*, 2021/2022) nun auch unter Waldschutzaspekten für das Waldbaureferat des rheinland-pfälzischen Ministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Energie und Mobilität unterstrichen haben (s. o.). Nun können andere Arbeitsgruppen die Methoden zur differenziellen Ansprache der Mehлтаuresistenz als Maßstab für die Forstpflanzenzüchtung nutzen. Dies wird vor allem die Bereitstellung von forstlichem Vermehrungsgut weiter verbessern. Bestrebungen hierzu gibt es im rheinland-pfälzischen forstlichen Genressourcenzentrum Antonihof.

Das Projekt hat die interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen der forstlichen Forschung an der FAWF und der universitären biologischen Forschung an der RPTU in Kaiserslautern gefördert. Dadurch hat es die beteiligten Institutionen auch wissenschaftlich konkurrenzfähiger gemacht. Als Verbundprojekt hilft es, in der Forschung und Entwicklung die Synergierendite zu heben. So wurde an der RPTU eine Methode zur molekulargenetischen Quantifizierung des Mehлтаubefalls erarbeitet, die an der FAWF erfolgreich etabliert und angewendet wurde. Zwischenzeitlich konnte auf Basis dieser Methode an der FAWF eine vergleichbare Methode für eine andere Baumkrankheit entwickelt werden. Auf der anderen Seite hat das Projekt der RPTU Einblicke in Aspekte des Waldbaus, der Waldwachstumskunde und Anzucht von Forstpflanzen eröffnet.

Dies war umso vorteilhafter, als die beteiligten Einrichtungen nun nicht nur untereinander eng verbunden sind, sondern auch enge Kontakte zu Forstbetrieben und Verwaltungen pflegen. Aus der Verbundenheit untereinander sind in der Folge des MetaEiche-Projekts bereits zwei neue Verbundprojekte hervorgegangen (Eichen-ResisT und ProBuche). Für die Forstbetriebe hat die Kooperation mit der RPTU die Ergebnisse universitärer Forschung nun auch für die tägliche Praxis verfügbar gemacht. Das gilt besonders für das Forstamt Boppard, in dessen Zuständigkeit die meisten waldbaupraktischen Anschauungsobjekte liegen.

Darüber hinaus haben die Stellen des MetaEiche-Projekts maßgeblich zur Qualifizierung von Nachwuchskräften in Forstwissenschaft und Biologie beigetragen. So wurden die MetaEiche-Ergebnisse bereits für die Ausbildung der Referendare im vierten Einstiegsamt verwendet. Auf der anderen Seite wurden im Rahmen des MetaEiche-Projekts zwei Masterarbeiten an der RPTU in Kaiserslautern abgefertigt und mehrere studentische Hilfskräfte ausgebildet.

3.4. Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Viele Arbeitspakete des MetaEiche-Projekts, Teilvorhaben 1, konnten wegen der projekträgerseitigen Kürzung der wissenschaftlichen Arbeitskapazität um 50 % sowie des daraus folgenden Verlustes an technischer Arbeitskapazität in Höhe von 20 % nur orientierend bearbeitet oder nicht abgeschlossen werden. Einige Fragestellungen mussten im MetaEiche-Projekt ganz gestrichen werden (vgl. Kap. 4). Solche Arbeitspakete und Fragestellungen sind direkt anschlussfähig an das MetaEiche-Projekt. Dazu gehören insbesondere:

- Systematische Drohnenbefliegungen von Althölzern und Naturverjüngungen zur konsistenten Mehлтаubonitur mit dem Ziel, erbliche Befallsmuster zu erfassen,
- Wiederholungsmessungen von Metaboliten und Enzymen der oxidativen Belastung und des antioxidativen Systems in den Proben aus den Naturverjüngungen, um die vorliegenden Erkenntnisse veröffentlichungsfähig abzusichern,
- Wiederholungsmessungen von phenolhaltigen Metaboliten, um die Hypothese des Zusammenhangs von Tanninen und Mehлтаutoleranz veröffentlichungsfähig abzusichern,
- Klärung des Mehлтаueinflusses auf die Tanninsynthese auf physiologischer und molekulargenetischer Basis für einen Resistenzschnelltest,

- Anwendung des cytologischen Mehltautests auf ausgewählte Eichenherkünfte zur Untersuchung einer differentiellen Mehltautoleranz bzw. –resistenz und
- pathophysiologische Untersuchung des Herkunftsversuchs im forstlichen Genressourcenzentrum Antonihof.

Die Anwendung des cytologischen Mehltautests ist bereits Gegenstand des MetaEiche-Folgeprojekts „Eichen-ResisT“, das die FAWF für eine Kooperation mit der RPTU Kaiserslautern fördert. Die Entwicklung des molekulargenetischen Resistenz-Schnelltests wird dieses Jahr an der FAWF aus Hausmitteln vorangetrieben. Die Untersuchung des Herkunftsversuchs am Antonihof ist im Rahmen eines kroatisch-deutschen Verbundprojekts ab dem kommenden Sommer bis 2027 geplant (CROPAL-PRO). Die anderen Fragestellungen und Folgeprojekte werden ggfs. fallweise von der FAWF ins Auge gefasst.

4. Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben

Aufgrund der projektträgerseitigen Kürzung der wissenschaftlichen Arbeitskapazität um 50 % sowie des daraus folgenden Verlustes an technischer Arbeitskapazität in Höhe von 20 % konnten viele Arbeitspakete des MetaEiche-Projekts trotz einer umfangreichen Kompensation mit Stammpersonal nur orientierend bearbeitet werden:

- Die Höhenmessungen und die Wintermortalität in den Naturverjüngungen ohne und mit Mehltau in den Jahren 2023 und 2024,
- eine systematische Drohnenbefliegung mit konsistenter Mehltaubonitur im Altholz und in der Verjüngung aller Untersuchungsbestände im Jahr 2024,
- die Quantifizierung von Wasserstoffperoxid, Ascorbat und Malondialdehyd in den Naturverjüngungsproben des Jahres 2024,
- die Aktivitätsmessungen der Glutathionreductase in den Naturverjüngungsproben der Jahre 2023 und 2024,
- die Glutathionmessungen in den Naturverjüngungsproben der Jahre 2021 bis 2024,
- die Gesamtphenol- und Ellagatanninbestimmungen in den Jahren 2023 und 2024,
- die Ligninmessungen in den Naturverjüngungsproben der Jahre 2022 bis 2024 sowie in den Proben aus den Klimakammern,
- begleitende Quantifizierungen von Coniferyl- und Sinapylalkohol zu den Ligninmessungen,
- die Vescalagin- und Castalaginbestimmungen in den Naturverjüngungsproben 2024,
- die Charakterisierung sowie Aktivitätsmessungen ohne und mit Mehltau der UDP-Glucose-Phosphorylase (GPase),
- die dPCR-Messung der Galloyltransferase- und GPase-Aktivitäten in DNA und RNA zur Darstellung des Regulationsortes für differenzierte Aktivitätsmuster ohne und mit Mehltau,
- die Wiederholung aller genetischen Bestimmungen für belastbare Schlussfolgerungen und einen anwendbaren genetischen Schnelltest,
- die pathophysiologische Untersuchung des Herkunftsversuchs am Antonihof,
- die systematische Organisation der Bereisung der waldbaupraktischen Anschauungsobjekte und
- die Anwendung des Tests zur kontrollierten Mehltauinfektion im Herkunftsversuchs beim forstlichen Genressourcenzentrum Antonihof.

Dies hat zur Folge gehabt, dass viele Arbeiten bisher nicht zu veröffentlichungsreifen Ergebnissen geführt haben und nachgearbeitet werden müssten. Andere Arbeiten sind ganz unterblieben und müssten nun in Folgeprojekten angegangen werden.

5. Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer

Bereits 2024 wurde der Bericht zur ersten Mehltauinfektionen auf Zerreiche in Deutschland veröffentlicht und kürzlich wurde ein weiterer Bericht zur ersten Mehltauinfektion auf Roteiche in Europa zur Publikation angenommen. In Vorbereitung befindet sich ein weiterer Beitrag, der sich mit der Aktivität von Vescalagin und Castalagin gegen den Mehltau auseinandersetzt. Des Weiteren wurde kürzlich ein Vortrag mit einigen MetaEiche-Ergebnissen auf der diesjährigen Tagung der Deutschen Pflanzenschutz Gesellschaft präsentiert. Während seiner Laufzeit wurde das Projekt mit unterschiedlicher Schwerpunktbildung auf Postern im Rahmen der Tagungen der Deutschen Pflanzenschutz Gesellschaft und der Vereinigung für Allgemeine und Angewandte Mikrobiologie wiederholt vorgestellt. Jenseits der wissenschaftlichen Gemeinde fanden die Projektergebnisse Eingang in Beratungen, Schulungen und Veröffentlichungen für die Fach- und allgemeine Öffentlichkeit (vgl. Kap. 3.2). Weitere Präsentationsmöglichkeiten werden sich ergeben, wenn die waldbaupraktischen Anschauungsobjekte ein aussagekräftiges Stadium erreicht haben (vgl. Kap. 3.2).

6. Ausgaben- und Zeitplanung

Der Finanzierungsplan sah in der Fassung des Kürzungsbescheids vom 27.08.24 für die Projektlaufzeit vom 01.07.2021 bis 31.01.2025 Bundesmittel in Höhe von insgesamt 298.728,10 € vor. In der Belegliste wurde im Vergleich dazu etwa 0,6 % mehr an Ausgaben nachgewiesen. Die Diskrepanz beruht zum einen auf Personalmehrausgaben im Bereich des Beschäftigten E 9a (Pos. 0817) im Umfang von knapp 6 % gegenüber der Planung, die durch Minderausgaben bei den sonstigen Verwaltungsausgaben (Pos. 0843) im Umfang von 16 % ausgeglichen wurden.

Die Arbeiten am MetaEiche-Projekt wurden entsprechend dem Förderbescheid vom 07.06.2021 am 01.07.2021 aufgenommen. Geplant waren zu Projektbeginn die Identifikation geeigneter Traubeneichenbestände mit Naturverjüngung im Bereich der Pfälzer Nordvogesen. Diese Aufgaben wurden fristgerecht erledigt, so dass der Meilenstein 1 pünktlich erreicht wurde (Tab. 2; AP 1.1). Darüber hinaus wurden in allen Naturverjüngungen die Probekreise noch 2021 angelegt und die erste Mehлтаubonitur einschließlich der dauerhaften Markierung der Probepflanzen vorgenommen. In den Frühsommern der darauffolgenden Jahre wurde jeweils außerplanmäßig die Mortalität in der Verjüngung erhoben und im Spätsommer planmäßig der Mehлтаubefall beurteilt (Tab. 2, AP 1.2). Die Baumhöhen wurden in den Naturverjüngungen aus Gründen des Verlusts an Arbeitskapazität (vgl. Kap. 4) nur in den Jahren 2022 und 2023 gemessen (Tab. 2; AP 1.2). Im Jahr 2024 wurden die Erhebungen zur Mortalität und zum Mehлтаubefall in den Naturverjüngungen außerplanmäßig fortgesetzt (Tab. 2; AP 1.2).

Tab. 1: Gegenüberstellung von Finanzierungsplan und Ausgaben des MetaEiche-Teilprojekts A

Position	Bezeichnung	Finanzierungsplan	nachgewiesene Ausgaben (Belegliste)	Differenz
0812	Beschäftigte E12-E15	118.583,15 €	118.583,15 €	0,00 €
0817	Beschäftigte E1-E11	121.985,53 €	128.088,73 €	6.103,20 €
0822	Beschäftigungsentgelte	2.770,80 €	2.689,21 €	-81,59 €
0843	sonstige allgemeine Verwaltungsausgaben	28.001,15 €	23.436,76 €	-4.564,39 €
0846	Dienstreisen	1.382,40 €	1.384,50 €	2,10 €
0850	Gegenstände über 800 €	26.005,07 €	26.005,07 €	0,00 €
0864	Bundesmittel	298.728,10 €	300.187,42 €	1.459,32 €

Der Gesamtfinanzierungsplan für die Zeit vom 01.07.2021 bis 31.01.2025 wurde dem Kürzungsbescheid vom 27.08.24 entnommen. Die tatsächlichen Ausgaben entsprechen der Belegliste in der Form vom 13.03.25.

Auch die waldbaupraktischen Anschauungsobjekte wurden planmäßig im Jahr 2021 ausgewählt (Tab. 2; AP 1.1). Auf allen Flächen außer einer wurden die Lichtkegelverjüngungen vollumfänglich eingeleitet, auf der Demonstrationsfläche Klausenberg konnten nur drei Kleinzäune gestellt werden, weil es dort 2021 lediglich eine Streumast gegeben hatte. Die Fläche wurde im Jahr 2024 außerplanmäßig vervollständigt (Tab. 2; AP 1.3). Im Herbst 2021 wurde das Saatgut aufkommen erhoben und im zweiten und dritten Quartal 2022 die Keimlingsdichte und Überschildung bestimmt. Im Jahr 2023 erfolgte auch auf den Demonstrationsflächen planmäßig die Bestimmung der Wintermortalität, außerdem setzte die Mehлтаubonitur ein, die 2024 außerplanmäßig weitergeführt wurde (Tab. 2; AP 1.3). In den ersten Quartalen der Jahre 2022 und 2023 gab es entgegen der Planung keine Aufnahmen auszuführen.

Ab dem zweiten Quartal 2022 legte der technische Angestellte den Drohnenflugschein ab und begann das Flugtraining. Ab dem dritten Quartal wurden die Grundlagen zur Methodenentwicklung für die Bestandesaufnahmen mittels Drohne gelegt. Im dritten Quartal 2023 wurden in zwei Untersuchungsflächen orientierende Befliegungen durchgeführt (Tab. 2; AP 2.1). Zur systematischen Aufnahme aller Flächen im Jahr 2024 ist es entgegen der Planung wegen der Kürzung der wissenschaftlichen Arbeitskapazität und des damit verbundenen Verlustes an technischer Arbeitskapazität nicht mehr gekommen (vgl. Kap. 4).

Die physiologischen Analysen begannen planmäßig im dritten Quartal 2021 mit den entsprechenden Probenahmen in den Naturverjüngungen und ab dem ersten Quartal 2022 mit dem Methodentraining des neu eingestellten Projektpersonals (Tab. 2; AP 2.1). Parallel zum fortschreitenden Methodentraining wurden ab dem zweiten Quartal 2022 die Analyseergebnisse erarbeitet. Im vierten Quartal 2022 setzten die Arbeiten zur Etablierung bzw. Neuentwicklung von Methoden zur Bestimmung von β -Glucogallin und UDP-Glucose sowie zur Charakterisierung der Galloyltransferaseaktivität ein, ab dem zweiten Quartal diejenigen zur Etablierung der Ligninmessung (Tab. 2; AP 2.1). Die physiologischen Analysen dauerten planmäßig bis ins zweite Quartal

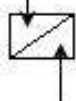
2024 an und wurden außerplanmäßig bis zum Ende des vierten Quartals 2024 fortgeführt (Tab. 2; AP. 2.1). Sie konnten jedoch wegen der Kürzungen nicht vollumfänglich abgeschlossen werden.

Tab. 2: Arbeitsplanung und –ausführung im Vergleich

Arbeitspakete		2021		2022				2023				2024				2025
		III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I
1	Waldbauliche Untersuchungen															
1.1	Bestandesauswahl															
1.2	Wachstumskunde und Waldbau															
1.3	Waldbaupraktische Anschauungsobjekte															
2	Pathophysiologie															
2.1	Adulte Eichen und Verjüngungen															
2.2	Freie Absaaten im Pflanzgarten															
2.3	Gepfropfte Pflanzen+															
4	Koordination* und Berichte															
Meilensteine*		1,2	3													

+, statt gepfropfter Pflanzen wurden freie Absaaten kultiviert.

Arbeiten geplant



Arbeiten ausgeführt

Die Aufnahmen im Herkunftsversuch wurden außerplanmäßig bereits im dritten Quartal 2021 aufgenommen und danach planmäßig jeweils im dritten Quartal der Jahre 2022 und 2023 durchgeführt. Im dritten Quartal 2024 wurden die Arbeiten außerplanmäßig wiederholt (Tab. 2; AP 2.2). Im vierten Quartal 2021 und 2023 sowie im ersten Quartal 2022 gab es entgegen der Planung keine besonderen Arbeiten zu verrichten (Tab. 2; AP 2.2). Allerdings fielen über die Vegetationszeiten der Projektjahre hin regelmäßig Pflegearbeiten im Herkunftsversuch an, die im vorliegenden Bericht nicht einzeln aufgeführt sind.

Die Arbeit mit gepfropften Pflanzen hat sich bereits zu Projektbeginn für ein Dreijahresvorhaben als zu langwierig erwiesen. Deshalb wurde auf die Anzucht freier Absaaten umgestellt. Das benötigte Saatgut wurde jeweils im dritten Quartal der Jahre 2021 bis 2023 planmäßig gewonnen oder anderweitig beschafft (Tab. 2; AP 2.3). Die Kultivierung der Pflanzen in den Klimakammern wurde außerplanmäßig jeweils bereits im vierten Quartal der Jahre 2021 bis 2023 aufgenommen und planmäßig in den Quartalen eins und zwei der Jahre 2022 und 2023 fortgesetzt. Außerplanmäßig wurde die Pflanzenanzucht im Jahr 2024 weitergeführt (Tab. 2; AP 2.3). Für physiologische Untersuchungen wurden Pflanzen jeweils im zweiten Quartal 2022 und 2023 in Klimakammern ohne bzw. mit Mehltau kultiviert und entsprechende Proben gewonnen (Tab. 2; AP 2.3).

In den ersten Quartalen der Jahre 2022 bis 2024 wurden planmäßig Zwischenberichte angefertigt (Tab. 2; AP 4). In den Quartalen zwei, drei und vier des Jahres 2022 und im Quartal drei 2023 gab es jeweils Projekttreffen, ohne dass dies im Einzelnen in der Projektskizze vorausgeplant war (Tab. 2; AP 4). Wegen der Projektverlängerung bis Januar 2025 wurde entgegen der Planung der Abschlussbericht nicht bereits ab dem vierten Quartal 2023 in Angriff genommen, sondern wird derzeit außerplanmäßig angefertigt (Tab. 2; AP 4).

7. Literatur

ALBERT, G. & WOMELSDORF, G. (1989): Reinerträge der Hauptwirtschaftsbaumarten in Rheinland-Pfalz. *Mitteilungen der Landesforstverwaltung Rheinland-Pfalz* 7. 52 S.

BALTRUSCHAT, J., GREVE, M., MUTH, M. & SEEGLMÜLLER, S. (2021/2022): Kleinflächige Verjüngung der Traubeneiche im Lichtkegelverfahren – Beobachtungen zehn Jahre nach Versuchsanlage. *Wissenschaftliches*

Jahrbuch des grenzüberschreitenden Biosphärenreservates Pfälzerwald – Vosges du Nord **21**: S. 16-27.

- BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG UND LANDWIRTSCHAFT (HRSG.) (2014): *Der Wald in Deutschland*. Berlin: Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft. 52 S.
- DELB, H., BURGER, M., GRÜNER, J., KAUTZ, M., THOMAS, L., WONSACK, D. & WUSSLER, J. (2023): Waldschutzsituation 2022/23 in Rheinland-Pfalz und Saarland. *Allgemeine Forstzeitschrift / Der Wald* **78** Heft 9: S. 25-28.
- EGIDI, H. (2007): Vorwort. In: DONG, P. (Hrsg.): Eiche im Pfälzerwald. *Mitteilungen aus der Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz* **63**: S. 1-3.
- FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE E. V. (Hrsg.) (2020): *Laubholz-Produktmärkte aus technisch-wirtschaftlicher und marktstruktureller Sicht*. Gülzow: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V..40 S.
- GÜRTH, P. & VÖHRINGER, F. (1993): Eichennaturverjüngung und Eichenpflanzung im Forstbezirk Müllheim. *Forst und Holz* **48**: S. 672-676.
- JOCHUM, M. & SEEGLMÜLLER, S. (2016): *Die Forst-, Holz- und Papierwirtschaft in Rheinland-Pfalz – aktuelle Ergebnisse*. Trippstadt: Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft. 26 S.
- LANDESREGIERUNG RHEINLAND-PFALZ & VERTRETUNGEN DER WALDBESITZENDEN (2019): *Klimaschutz für den Wald – unser Wald für den Klimaschutz*. Mainz: Staatskanzlei und Ministerium für Umwelt und Forsten. 7 S.
- MINISTERIUM FÜR LANDWIRTSCHAFT, WEINBAU UND FORSTEN (Hrsg.) (1980): *Hilfstafeln für die Forsteinrichtung*. Grünstadt: Druck und Verlag Emil Sommer. o. P.
- OEHMICHEN, K., GERBER, K. & KLATT, S. (2016): *WEHAM im Spannungsfeld zwischen Naturschutz und Holzverwendung*. Freiburg im Breisgau: Forstwissenschaftliche Tagung.
- SEEGLMÜLLER, S. (2005): DIE FORST-, HOLZ- UND PAPIERWIRTSCHAFT IN RHEINLAND-PFALZ. *Mitteilungen aus der Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz* **57**. 67 S.
- SPEIDEL, G. (1984): *Forstliche Betriebswirtschaftslehre*. Hamburg und Berlin: Verlag Paul Parey. 226 S. S. 85.

Erfolgskontrollbericht

Zuwendungsempfänger: Rheinland-Pfälzische Technische Universität Kaiserslautern – Fachbereich Biologie – Abt. Phytopathologie

Förderkennzeichen: 2220WK16B4

Vorhabenbezeichnung: Evidenz mehltaresistenter Eichen für die Waldverjüngung im Klimawandel.

Teilvorhaben 2: Cytologische und molekulare Evidenzen für genetisch determinierte Resistenz bei Eichen gegen den Mehltaupilz

Laufzeit des Vorhabens:

01.07.2021-30.06.2024

1. Beitrag zu den förderpolitischen Zielen

Eichen erhöhen nicht nur die Anpassungsfähigkeit der Wälder an den Klimawandel, weil sie wärme- und trockenresistent sowie bodenschonend sind, sie bilden auch die reichsten und vielfältigsten Lebensgemeinschaften aller unserer Waldlebensraumtypen. Deshalb ist es wünschenswert, ihren Anteil am Wald zu erhöhen. Allerdings behindert der Mehltaubefall ihren Etablierungserfolg. Zu dem Ziel, dieses Hindernis zu überwinden, hat das MetaEiche-Projekt einen substanziellen Beitrag geleistet. Nun sind die natürlichen Resistenzmechanismen gegen Mehltau besser verständlich. Auf Grundlage des Wissens über die Krankheitsursachen und deren Auswirkungen können nun die gängigen waldbaulichen Betriebsformen (Femelhieb und Schirmschlag) auf ihre Eignung zur Sicherung der Stabilität, Vitalität sowie Resilienz und Resistenz der Eichenbeteiligung in Waldökosystemen hin geprüft werden. Jetzt gibt es die Möglichkeit, die Betriebsformen so zu modifizieren, dass das Ziel, den Eichenanteil in den Wäldern zu erhöhen, näher gerückt ist.

2. Erzielte Ergebnisse

Es ist gelungen, einen Schnelltest zur reproduzierbaren kontrollierten Infizierung von abgetrennten Eichenblättern mit Mehltau zu etablieren (vgl. Abschlussbericht Teil 1 (AB 1); Kap. II.1.2.1). Der Infektionsverlauf lässt sich dabei sowohl visuell und mikroskopisch verfolgen als auch quantitativ auswerten (vgl. AB 1; Kap. II.1.2.1; Abb. 17 A-C;). Als besonders hilfreich hat sich erwiesen, drei Färbemethoden für die Sichtbarmachung des Pilzes (via Chitin) und von pflanzlichen Abwehrreaktionen (via Callose) für die mehltauinfizierten Blätter zu optimieren (vgl. AB 1; Kap. II.1.2.2; Abb. 18, 19). Auf dieser Basis wurde klar, dass der Mehltau auf jungen Blättern aus den Klimakammern auch nach 10 Tagen noch aktiv ist, aber auf vergleichbar jungen Blättern aus dem Freiland in der zweiten Sommerhälfte aufgrund deren reduzierter Vitalität bereits nach drei Tagen sein Wachstum eingestellt hat (vgl. AB 1; Kap. II.1.2.3; Abb. 20; 21 A, B; Abb. 22;). Für die Durchführung reproduzierbarer Infektionstests aus dem Freiland müssen demnach vitale Blätter vom ersten Austrieb im Frühjahr verwendet werden. Während Traubeneichen sehr anfällig für Mehltau sind, erwiesen sich Zerreichen in unserem Schnelltest als teilweise und Roteichen als geradezu vollständig gegen den Blattpilz resistent, in Übereinstimmung mit deren Reaktion im Freiland (vgl. AB 1; Kap. II.1.2.5; Abb. 25 A-O;). Zwar können die Mehltaukonidien auf allen Blättern keimen, im Gegensatz zu den Traubeneichen kommt es aber bei Zerreichen nur zu einem geringen Wachstum und bei Roteichen zu fast keiner Entwicklung von elongierenden Hyphen, die eine erfolgreiche Haustorienbildung und den Übergang in die biotrophe Wachstumsphase anzeigen (vgl. AB 1; Kap. II.1.2.5; Abb. 26 A-O; Abb. 27;). Dennoch gibt es in der MetaEiche-Untersuchungsregion auch auf Zerreichen gelegentliche Mehltauinfektionen (vgl. AB 1; Kap. II.1.2.12; Abb. 38 A, B; 39 A-C;.) und selbst die Roteichen blieben nicht immer verschont (vgl. AB 1; Abb. 40 A-G).

Im EichenResisT-Folgeprojekt der FAWF waren im Spätsommer 2024 drei Herkünfte in einem Vergleichsanbau im Genressourcenzentrum Antonhof nahezu gesund, insbesondere die Herkunft Rheingrafenstein, und umgekehrt zwei Herkünfte stark befallen, darunter Heidenkopf (vgl. AB 1 Abb. 32, Kap. II.1.2.8). Eichensämlinge aus Rheingrafenstein erwiesen sich bei ersten Infektionstests mit im Spätsommer 2024 geernteten Blättern als tendenziell resistenter als solche aus Heidenkopf (vgl. AB 1; Kap. II.1.2.8; Abb. 33;).

Im Rahmen des MetaEiche-Projekts wurde eine Methode zur Quantifizierung der Mehltauinfektion mittels RT-qPCR etabliert (vgl. AB 1; Kap. II.1.2.4; Abb. 24;). Mit Mehltau inokulierte Eichenblätter haben das eine Pflanzenabwehr anzeigende Gen PR1 signifikant mehr transkribiert als die gesunden Bäume (vgl. AB 1; Kap. II.1.2.7; Abb. 31). Auf der Pilzseite zeigte sich in der MetaEiche-Untersuchungsregion eine Diversität des Mehltaus. Neben dem dominierenden *Erysiphe alphitoides* wurde auch *E. quercicola* an manchen Standorten gefunden (vgl. AB 1; Kap. II.1.2.9; Tab. 18; Abb. 34).

Trauben-, Zerr- und Roteichen zeigen bei Mehltauinfektion auf cytologischer Ebene keine sichtbaren Abwehrreaktionen wie die Anhäufung von reaktiven Sauerstoffspezies (ROS, H₂O₂) oder den programmierten Zelltod. Eine Ausnahme war die Bildung von Callose bei Zerreichen unter den Appressorien des Pilzes (vgl. AB 1; Kap. II.1.2.6; Abb. 28-30). Einen gewissen Schutz gegen die Mehltauinfektion bieten jedoch vor allem Vescalagin und Castalagin (VC), die beiden wichtigsten hydrolysierbaren Eichen-Ellagtannine. VC behindern die Sporenkeimung ebenso signifikant wie sie die Elongationshyphen bremsen (vgl. AB 1; Kap. II.1.2.11; Abb. 35, 36 A-E;). Da VC auch während der Infektion in Blättern vermehrt gebildet werden, liegt eine Rolle der Ellagtannine bei der Abwehr gegen den Mehltau nahe und wird weiter überprüft werden.

3. Fortschreibung des Verwertungsplans

3.1. Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen und erteilte Schutzrechte

Die Ergebnisse des MetaEiche-Projekts bewegen sich im Bereich der Grundlagenforschung mit Ausrichtung zur forstwirtschaftlichen Anwendung. Die Arbeiten zielten nicht auf Bereiche der industriellen Forschung oder der experimentellen Entwicklung ab. Dementsprechend waren Erfindungen oder eine anderweitige Generation patentrechtlich geschützten geistigen Eigentums nicht Ziel des Vorhabens. Vielmehr werden sämtliche Erkenntnisse dauerhaft barrierefrei zur Verfügung stehen (Exkursionen, Schulungen, Veröffentlichungen, Daten-repositorien; s. u.).

3.2. Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende (mit Zeithorizont)

Die erhaltenen Ergebnisse werden es zukünftig erlauben, eine mögliche Teilresistenz von einheimischen Eichen mit dem von uns etablierten Schnelltest rasch und zuverlässig zu erfassen. Wenn sich die Existenz von resistenten Individuen bestätigen lässt, würden die Naturverjüngungen durch ein neues diagnostisches Kriterium erweitert und es wäre möglich, solche Individuen zu fördern und einen insgesamt gegenüber Mehltauinfektionen robusteren Eichennachwuchs zu erhalten. Dies hätte mittel- und langfristig eine erhebliche Bedeutung für den Aufbau eines stabilen Baumbestandes sowohl in ökologischer als auch forst- und volkswirtschaftlicher Hinsicht (vgl. Erfolgskontrollbericht der FAWF). Die Durchführung des Schnelltests ist bei Verfügbarkeit von ausreichend vitalem Pilzinokulum und jungen infizierbaren Blättern im Frühjahr (oder alternativ in Klimakammern über das gesamte Jahr) ohne großen Geräteaufwand erlern- und durchführbar.

Auf dem Weg dahin wurden die Erkenntnisse schon während der aktiven Projektphase dem Forstwesen (v.a. Forstbetrieben und Forstverwaltungen) zur Verfügung gestellt. Dazu dienten bisher hauptsächlich Besprechungen mit den Wirtschaftler*innen und mit Vertretern von Landesforsten Rheinland-Pfalz vor Ort sowie Vorträge im Rahmen von Aus- und Fortbildungsveranstaltungen. Hervorzuheben ist auch, dass der Mehltau Thema der Landesforsten- Veranstaltungsreihe „Aktuelle Versuchs- und Forschungsergebnisse für die forstliche Praxis“ war (drei Seminare). Die Ergebnisse des MetaEiche-Projektes bildeten schließlich auch einen Teil des *Heimatjahrbuchs des Landkreises Kaiserslautern* 2025. Auch in Zukunft werden die Ergebnisse weiterhin Teil der allgemeinen FAWF-Pressearbeit sein.

3.3. Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende (mit Zeithorizont)

Erste Erkenntnisse und Ergebnisse des Gesamtprojekts wurden bereits an Forstpraktiker*innen weitergegeben und können nun in ihre Planungen für den Einsatz kleinflächiger Naturverjüngungen zur Steigerung des Eichenanteils in unseren Wäldern eingehen (vgl. Erfolgskontrollbericht der FAWF). Wissenschaftlich wurden eine Reihe von Erkenntnissen bzgl. der Cytologie der Mehltauinfektion, der unterschiedlichen Reaktionen von Mehltau-anfälligen, -teilresistenten und -resistenten Eichenarten, sowie der biochemischen und molekularen Reaktionen auf die Mehltauinfektionen erzielt. Damit sind nun vertiefte Untersuchungen der genetischen Grundlagen und der molekularen, physiologischen und biochemischen Mechanismen der pflanzlichen Abwehr gegen den Eichenmehltau möglich. Diese Erkenntnisse tragen dazu bei, neue und präzisere diagnostische Verfahren zur Mehltauresistenz zu entwickeln, und damit zukünftig die Vorhersage und auch die Kontrolle von Mehltauerkrankungen zu ermöglichen.

Das Projekt hat die interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen der forstlichen Forschung an der FAWF und der universitären biologischen Forschung an der RPTU in Kaiserslautern gefördert. Dadurch hat es die Kompetenzen der beteiligten Institutionen erhöht und beide wissenschaftlich konkurrenzfähiger gemacht. So wurde

an der RPTU eine Methode zur molekulargenetischen Quantifizierung des Mehltaubefalls erarbeitet, die an der FAWF erfolgreich etabliert und angewendet wurde. Zwischenzeitlich konnte an der FAWF auf dieser Basis eine vergleichbare Methode für eine andere Baumkrankheit etabliert werden. Auf der anderen Seite hat die FAWF ihre Erfahrungen bei der Kultivierung von gesunden und Mehltau-infizierten Eichensämlingen an die RPTU weitergegeben, die eine Voraussetzung für die Etablierung des Schnelltests waren. Überdies hat das Projekt der RPTU Einblicke in Aspekte des Waldbaus und der Waldwachstumkunde eröffnet.

Dies war umso vorteilhafter, als die beteiligten Einrichtungen nun nicht nur untereinander eng verbunden sind, sondern auch enge Kontakte zu Forstbetrieben und Verwaltungen pflegen. Aus der Verbundenheit sind in der Folge des MetaEiche-Projekts mittlerweile zwei neue Verbundprojekte hervorgegangen (EichenResisT und ProBuche). Für die Forstbetriebe hat die Kooperation mit der RPTU die Ergebnisse universitärer Forschung nun auch für die tägliche Praxis verfügbar gemacht.

Darüber hinaus trugen die Projektstellen maßgeblich zur Qualifizierung von Nachwuchskräften in Forstwissenschaft und Biologie bei. So wurden die MetaEiche-Ergebnisse bereits für die Ausbildung der Referendare im vierten Einstiegsamt verwendet. Auf der anderen Seite wurden im Rahmen des MetaEiche-Projekts eine Bachelorarbeit sowie drei Masterarbeiten erfolgreich an der RPTU abgeschlossen.

3.4. Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Da der Echte Mehltau eine bleibende Gefährdung für die Etablierung von Wäldern mit hohem Eichenbestand darstellt, wäre eine umweltschonende Bekämpfungsmethode äußerst erstrebenswert. Hierzu würde sich das sog. Spray-induced Gene Silencing (SIGS) anbieten, eine neuartige Strategie, an deren Etablierung deutsche Wissenschaftler maßgeblich beteiligt sind, und deren Wirksamkeit für die Bekämpfung von Pflanzenkrankheiten weltweit intensiv untersucht wird (Rank, AP, Koch A: Lab-to-field transition of RNA spray applications - how far are we? Front Plant Sci. 2021 12:755203. doi: 10.3389/fpls.2021.755203). Die Methode beruht darauf, dass mit Hilfe kurzer synthetischer RNA-Moleküle die Expression von essenziellen Genen eines Pathogens durch einen gezielten Abbau der mRNA blockiert und damit dessen Wachstum gestoppt wird. Der Vorteil dieser Methode ist ihre hohe Spezifität der inhibitorischen RNA (sog. siRNA) und die Tatsache, dass bei dieser Methode keine gentechnisch veränderten Pflanzen erzeugt werden müssen. Auch wenn noch viel Forschungsarbeit geleistet werden muss, um die Wirksamkeit von SIGS in der Praxis sicherzustellen, können hierfür bereits jetzt wertvolle Vorarbeiten durchgeführt werden. Unsere Arbeitsgruppe und der RPTU hat bereits Erfahrungen mit dieser Methode zur Bekämpfung des Graufäule-Erregers *Botrytis cinerea*, und im Rahmen des auf MetaEiche anschließenden Eichen-ResisT-Projekts wurden umfangreiche RNA-Sequenzierungen mit Mehltau-infizierten Eichenblättern durchgeführt, die für die Entwicklung geeigneter siRNAs gegen den Eichenmehltau verfügbar sind.

4. Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben

Bisher konnte mit Hilfe des Schnelltests noch nicht zweifelsfrei bestätigt werden, dass Eichen der Herkunft Rheingrafenstein tatsächlich eine genetisch basierte (Teil-)Resistenz besitzen. Ein Grund dafür war der unerwartete Kälteeinbruch Ende April 2024, der zu einem Absterben der jungen Triebe an den Bäumen führte. Im Spätsommer geerntete Blätter erlaubten wegen ihrer reduzierten Vitalität keine präzisen Untersuchungen mehr, die nun im Frühjahr 2025 nachgeholt werden. Überraschenderweise haben die cytologischen Untersuchungen zwar eine gute Auflösung der verschiedenen Stadien der Mehltauentwicklung gezeigt, die auf empfindlichen und (teil-)resistenten Blättern gebildet werden, aber es wurden mit Ausnahme der Callosebildung bei Zerreißen keine deutlichen Abwehrreaktionen beobachtet, die man sonst bei resistenten Pflanzen nach Pathogeninfektion beobachtet, und die mit dem Resistenzgrad der Pflanzen korrelieren. Außerdem erwies sich die Untersuchung der Expression von abwehrrelevanten Genen (z.B. PR1) als wenig aussagekräftig, da beim Vergleich zwischen gesunden und Mehltau-infizierten Blättern nur eine geringe Induktion von PR1 beobachtet wurde. Dies lag auch an der begrenzten Zahl an Gensequenzen, die uns von Dr. Birgit Kersten vom Thünen-Institut zur Verfügung gestellt worden war. Mit den kürzlich selbst erzeugten RNA-Sequenzen kann die molekulare Untersuchung der Mehltauabwehr, inklusive die Identifizierung von Genen, die an der Resistenz gegen Eichenmehltau beteiligt sind, neu angegangen werden.

5. Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer

Bereits 2024 wurde ein Bericht zur erstmaligen Beobachtung einer Mehltauinfektion auf Roteiche in Europa zur Publikation angenommen. In Vorbereitung befindet sich eine weitere Veröffentlichung, die sich mit der Aktivität von Vescalagin und Castalagin gegen den Mehltau auseinandersetzt. Des Weiteren wurde auf der Jahrestagung des Arbeitskreises Pflanzen-Mikroben-Interaktionen ein Vortrag über wesentliche Ergebnisse des MetaEiche-Projekts präsentiert. Während seiner Laufzeit wurde das Projekt mit unterschiedlicher Schwerpunktsetzung mit Vorträgen und Postern im Rahmen der Tagungen der Deutschen Phytomedizinischen Gesellschaft und der Vereinigung für Allgemeine und Angewandte Mikrobiologie vorgestellt.

6. Ausgaben- und Zeitplanung

Die nachgewiesenen Ausgaben entsprechen weitgehend dem Finanzierungsplan (laut Änderungsbescheid vom 18.6.2024) und sind in Tab.1 dargestellt. Die erhöhten Ausgaben in Pos. 843 im Vergleich zu dem ursprünglichen Finanzierungsplan ergaben sich aus den erhöhten Materialkosten nach der Anschaffung des Fluoreszenz-Binokulars.

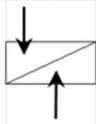
Tabelle 1: Gegenüberstellung von Finanzierungsplan und Ausgaben des MetaEiche-Teilprojekts B

Position	Bezeichnung	Finanz.plan	nachgewies. Ausgaben (Belegliste)	Differenz
812	Beschäftigte E12-E15	211284.00	203176.63	-8107.37
843	Sonst. allg. Verwaltungsaufgaben	15000.00	20150.37	5150.37
846	Dienstreisen	3848.16	673.15	-3175.01
850	Gegenstände >800 €	23669.24	28403.09	4733.85
864	Bundesmittel	253801.40	252403.24	-1398.16

Der Gesamtfinanzierungsplan für die Zeit vom 01.07.2021 bis 31.01.2025 wurde dem Änderungsbescheid vom 18.06.2024 entnommen. Die tatsächlichen Ausgaben entsprechen der Belegliste in der Form vom 03.02.25.

In Tabelle 2 ist ein Vergleich der geplanten und tatsächlich bisher durchgeführten Arbeiten dargestellt. Die meisten Arbeiten wurden planmäßig durchgeführt, abgesehen vom Ersatz gepfropfter Pflanzen (dies erwies sich als nicht durchführbar) durch Absaaten, sowie die durchgehende Verwendung isolierter Blätter für die Inokulationstests.

Tabelle 2: Arbeitsplanung und -ausführung im Vergleich

Arbeitspakete		2021		2022				2023				2024	
		III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II
2	Pathophysiologie												
2.1	Adulte Eichen und Verjüngungen												
2.2	Freie Absaaten im Pflanzgarten												
2.3	Gepfropfte Pflanzen+												
3	Cytologie, Biochemie, Molekularbiologie												
3.1	Isolierte Blätter												
3.2	Gepfropfte Pflanzen												
3.3	Freie Absaaten im Pflanzgarten												
3.4	Adulte Eichen und Verjüngungen												
3.5	Differentielle Resistenz für die Praxis												
4	Koordination+ und Berichte												
+, statt gepfropfter Pflanzen wurden freie Absaaten kultiviert.													
Arbeiten geplant													
													
Arbeiten ausgeführt													

7. Literatur

Rank, AP., Koch, A. (2021): Lab-to-field transition of RNA spray applications - how far are we? *Frontiers in Plant Science* **12**: 755203.

SAEED, M, SCHLOSSER, F. HAHN, M. & SEEGMÜLLER, S.

Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz &
Rheinland-Pfälzische Technische Universität Kaiserslautern – Fachbereich Biologie –
Abt. Phytopathologie

2025



Impressum

Herausgeber:

Zentralstelle der Forstverwaltung

Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz

Hauptstraße 16

D-67705 Trippstadt

Telefon: 0049-6306-911-0, Telefax: 0049-6306-911-200

E-Mail: zdf.fawf@wald-rlp.de

Internet: www.fawf.wald-rlp.de

Verantwortlich:

Der Leiter der Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz