TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN

Fachrichtung Forstwissenschaften | Institut für Waldbau und Waldschutz | Professur für Waldschutz

Schlussbericht zum Vorhaben

Thema:

Entwicklung leistungsfähiger und naturnaher Regulations- und Bekämpfungsverfahren als Voraussetzung für eine nachhaltige und zukunftsfähige Waldbewirtschaftung (ReBek):

Teilvorhaben 1: Fallen- und Lockstoffentwicklung und -erprobung für Rüssel- und Borkenkäfer sowie Volatilerprobung in Borkenkäferfallen

Zuwendungsempfänger: Technische Universität Dresden
Fakultät Umweltwissenschaften
Professur für Waldschutz

Förderkennzeichen: 22019917

Laufzeit: 01.01.2020-31.12.2023

Monat der Erstellung: 04/2024

Datum der Veröffentlichung: 09.01.2025

Autoren: Christiane Helbig, Tobias Heber,
Sören Osmers, Michael Müller

Gefördert durch:

Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft

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) über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR) als Projektträger des BMEL für das Förderprogramm Nachwachsende Rohstoffe unterstützt. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der Autorenschaft.

Inhaltsverzeichnis

I. Kurzbericht ... 1

1. Aufgabenstellung ... 1

2. Planung und Ablauf des Vorhabens ... 2

3. Resümee der wesentlichen Ergebnisse ... 5

a) Arbeitspakete und Meilensteine ... 5

b) Zusammenfassung ... 7

II. Ausführliche Darstellung der Ergebnisse ... 9

1. Versuchsübersicht ... 9

2. Erzielte Ergebnisse – Teilprojekt 1, Arbeitspaket 1.2 ... 12

2.1. Einleitung ... 12

2.2. Methodik ... 12

2.3. Ergebnisse ... 13

2.3.1. Zielart *Ips typographus* ... 13

2.3.1.1. Versuchsjahr 2020 ... 13

2.3.1.1.1. Fallenvergleich ... 13

2.3.1.1.2. Dispenservergleich I ... 15

2.3.1.1.3. Dispenservergleich II ... 17

2.3.1.2. Versuchsjahr 2021 ... 20

2.3.1.2.1. Additivversuch ... 20

2.3.1.2.2. Abgaberatenversuch ... 22

2.3.1.2.3. Siebversuch ... 26

2.3.1.2.4. Push-Pull-Versuch ... 27

2.3.1.3. Versuchsjahr 2022 ... 30

2.3.1.3.1. Additivversuch ... 30

2.3.1.4. Fazit zur Zielart *Ips typographus* ... 32

2.3.2. Zielart *Hylobius abietis* ... 32
2.3.2.1. Versuchsjahr 2020 ... 32
2.3.2.1.1. Fallenvergleich Weißhaus ... 32
2.3.2.1.2. Fallenvergleich Naundorf ... 35
2.3.2.1.3. Fraßversuch zur Prägung mit heimischen Baumarten ... 36
2.3.2.2. Versuchsjahr 2021 ... 37
2.3.2.2.1. Lockstoffversuch Schellerhau ... 37
2.3.2.2.2. Lockstoffversuch Weißhaus ... 40
2.3.2.2.3. Fraßversuch mit alternativen Baumarten ... 41
2.3.2.2.4. Massenfangversuch Pfeffenhausen ... 43
2.3.2.2.5. Fangzahlenentwicklung 2021 ... 46
2.3.2.3. Versuchsjahr 2022 ... 47
2.3.2.3.1. Weiterentwicklung des Fangbehälters ... 47
2.3.2.3.2. Entwicklung einer Auflagefalle ... 48
2.3.2.3.3. Lockstoffversuch Weißhaus ... 49
2.3.2.3.4. Wiederfangversuch ... 50
2.3.2.3.5. Massenfangversuch Rosenthal ... 51
2.3.2.3.6. Massenfangversuch Schellerhau ... 55
2.3.2.4. Versuchsjahr 2023 ... 57
2.3.2.5. Fazit zur Zielart *Hylobius abietis* ... 59
3. Erzielte Ergebnisse - Teilprojekt 2, Arbeitspaket 2.2 ... 60
3.1. Einleitung ... 60
3.2. Freilandfallenversuche ... 60
3.2.1. Einleitung ... 60
3.2.2. Material und Methodik ... 60
3.2.2.1. Versuchsdesign ... 60

3.2.2.2. Semiochemikalien 62

3.2.2.3. Datenauswertung und Statistik 65

3.2.3. Ergebnisse 66

3.2.3.1. Borkenkäfer und deren Antagonisten an Gemeiner Fichte 66

3.2.3.2. Borkenkäfer und deren Antagonisten an Gemeiner Kiefer 76

3.2.3.3. Borkenkäfer und deren Antagonisten an Rotbuche 82

3.2.3.4. Fazit 88

3.3. Verhaltensversuche 94

3.3.1. Material und Methodik 94

3.3.2. Ergebnisse 95

3.3.3. Fazit 97

4. Verwertung 98

a) Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen 98

b) Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende 98

c) Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende. 100

d) Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit 102

5. Erkenntnisse von Dritten 103

6. Veröffentlichungen 106

7. Literaturverzeichnis 108

I. Kurzbericht

1. Aufgabenstellung

Aufgrund der direkten und indirekten Folgen der weltweiten Klimaveränderungen steigt gegenwärtig die Bedeutung vieler Waldschadorganismen und das durch sie verursachte Schadausmaß, z. B. durch kürzere Entwicklungszeiten, erhöhte Ausbreitungsgeschwindigkeiten und verringerte Wirtsabwehrkräfte. Dies gilt u. a. insbesondere für Borkenkäfer, von denen viele Arten für eine erfolgreiche Besiedlung auf eine Schwächung ihrer Wirte angewiesen sind. Die Bereitstellung innovativer und aufgrund rechtlicher und sozialer Aspekte vorzugsweise pflanzenschutzmittelarmer bzw. –freier Regulations- und Bekämpfungsverfahren stellt daher eine der wesentlichen Herausforderungen in der aktuellen Waldschutzforschung da, um den Erhalt und die Vitalität von Wäldern zu sichern.

In diesem Rahmen hat sich das Projekt ReBek zum Ziel gesetzt, leistungsfähige, naturnahe und pflanzenschutzmittelarme oder -freie Verfahren zur Abwehr von Schadorganismen und der durch diese verursachten Schäden in Wäldern zu entwickeln und damit zum Schutz der ökonomisch, ökologisch und gesellschaftlich wichtigen Ressource Wald mit ihren vielfältigen Funktionen und Ökosystemleistungen beizutragen. Der Fokus im Teilprojekt 1 lag dabei auf der Neuentwicklung und Qualifizierung von Bekämpfungsverfahren (Attract-and-Kill-Verfahren) für waldschädigende Borken- und Rüsselkäferarten an den Beispielen *Ips typographus* (Buchdrucker/Großer Achtzähniger Fichtenborkenkäfer) und *Hylobius abietis* (Großer Brauner Rüsselkäfer) mit Hilfe von Fallensystemen und Lockstoffen, die einerseits eine wirksame Schadinsektenregulation gewähren, andererseits aber auch die Pflanzenschutzmittelanwendung konzentrieren und minimieren.

Das Teilprojekt 2 konzentrierte sich auf die Ausnutzung der Prinzipien der chemischen Kommunikation von Borkenkäfern zur Entwicklung naturnaher Regulationsfahren für die Beispielarten *Ips typograpus*, *Ips sexdentatus* (Zwölfzähniger Kiefernborkenkäfer), *Xylosandrus germanus* (Schwarzer Nutzholzborkenkäfer) und *Trypodendron lineatum* (Gestreifter Nutzholzborkenkäfer), bei denen mittels Einsatzes bekannter und weiter zu qualifizierender oder neu zu identifizierender Non-Host- bzw. Non-Habitat-Volatile (Nichtwirtsbaum-/Nichtwirtshabitatvolatile) und Antiaggregationsstoffe ungeeignete Habitate bzw. ungeeignetes Brutmaterial vorgetäuscht bzw. eine generelle Repellenz verursacht wird, die der olfaktorischen Tarnung von schützenswerten Objekten wie z. B. Rohholz dient.

Beide Teilprojekte zielten damit auf eine Reduktion des Befalls von Waldbäumen und Rohholz durch Borken- und Rüsselkäfer unter gleichzeitiger Reduktion oder Vermeidung von Nebenwirkungen auf Antagonisten und weitere im Ökosystem vorkommende Nichtzielarten im Vergleich zu bisherigen insektizidhaltigen Verfahren.

2. Planung und Ablauf des Vorhabens

Im Projekt ReBek wirkten drei Projektpartner als Verbund zusammen: die Technische Universität Dresden (**TUD**) (Projektlaufzeit: 01.01.2020-31.12.2023), die Georg-August-Universität Göttingen (**UGÖ**) (01.07.2019-30.06.2022) und die Ostdeutsche Gesellschaft für Forstplanung mbH (**OGF**) (01.01.2020-31.12.2023. Eine Übersicht der Verbundstruktur und dessen Gliederung sowie die Zuordnung zu den drei Teilvorhaben gibt Tabelle 1.

Tabelle 1: Übersicht der Teilprojekte (TP), Arbeitspakete (AP) und Arbeitsschritte im Projektverbund

Teilprojekte	Arbeitspakete	Arbeitsschritte	Verantwortlicher Projektpartner
TP 1	AP 1.1	Literaturrecherche Probenahme und GC/MS-EAD Substanzidentifikation Volatilabgabeanalyse Auswertung	UGÖ (Teilvorhaben 2)
	AP 1.2	Literaturrecherche Fallenkonstruktion Lockstoffentwicklung Fallen- und Lockstofferprobung Auswertung	TUD (Teilvorhaben 1)
TP 2	AP 2.1	Literaturrecherche Probenahme und GC/MS-EAD Substanzidentifikation Auswertung	UGÖ (Teilvorhaben 2)
	AP 2.2	Literaturrecherche Freilandfallenerprobung Verhaltensexperimente Auswertung	TUD (Teilvorhaben 1)
	AP 2.3	Literaturrecherche Freilandfangholzerprobung Besiedlungsanalyse Auswertung	OGF (Teilvorhaben 3)

Da insbesondere im Teilprojekt 2 die Versuche von TUD und OGF in Teilen auf Ergebnisse der Arbeitsgruppe an der UGÖ aufbauten, erfolgte der Projektstart an der UGÖ früher als an den anderen beiden Institutionen. Ziel war es, aus den Volatilabsaugungen, GC/MS-EAD-Analysen und laborbasierten Verhaltensexperimente der UGÖ Verdachtssubstanzen abzuleiten, die anschließend im Freiland durch die TUD am Modell Falle und durch die OGF am Modell Fangholz bzw. Fangholzpolter getestet wurden. Eine ähnliche Zusammenarbeit erfolgte jedoch in bestimmten Bereichen auch im Teilprojekt 1.

Als Zielarten für Teilprojekt 1 wurden *Ips typographus* und *Hylobius abietis* definiert. Beide sind weit verbreitete Waldschadorganismen in Deutschland, die derzeit in hohen Populationsdichten bzw. Massenvermehrung vorkommen und substanzielle Schäden verursachen. Hinsichtlich *Ips typographus* ist als wesentliche Grundlage für die Versuche im Teilprojekt 1 die Identifikation des Aggregationspheromons durch Bakke (1970) zu nennen. Weiterhin existieren umfassende Erkenntnisse zu verschiedenen Fallentypen (Galko et al. 2010, Galko et al. 2016, Lindgren 1983, Martín et al. 2013, Niemeyer 1985, Zahradník und Zahradníková 2015) und auch der Aspekt des Massenfangs, der im Vergleich zu einer Pflanzenmittelanwendung nicht nur konkurrenzfähig, sondern sogar überlegen sein könnte, wurde bereits thematisiert (Müller et al. 2008, Wehnert und Müller 2012). Bedingt durch seine Rolle als einer der bedeutendsten Schaderreger in Nadelbaumverjüngungen ist auch *Hylobius abietis* bereits seit Jahrzehnten Gegenstand intensiver Forschung (Altenkirch und Bogenschütz 2002, Schwerdtfeger 1957). Ab den 1950er Jahren war die Behandlung gefährdeter Pflanzen mit Insektiziden das standardmäßige Managementverfahren (Schwerdtfeger 1950) bis zunehmende Restriktionen z. B. durch die Europäische Union und Zertifizierungsprogramme die Methoden des Integrierten Pflanzenschutzes, die die Anwendung von Pflanzenschutzmitteln als Ultima Ratio ansehen, an Bedeutung gewannen (Långström und Day 2004, Matyjaszczyk et al. 2019, Örlander et al. 2000) . Dazu gehören auch die im Rahmen des Projekts anvisierte Entwicklung massenfangtauglicher Fallen und Lockstoffe, bei der insbesondere auf die Erkenntnisse von Nordlander (1987) und eines eigenen Versuchs (Kühlhorn 2017) zu möglichen Fallenkonstruktionen sowie auf verschiedene Studien zu Lockstoffen zurückgegriffen werden konnte (Lindelöw et al. 1993, Müller 1993, Nordlander 1990, Olenici et al. 2016). Darauf aufbauend erfolgte im Teilprojekt 1 zunächst die Erprobung verschiedener Fallenkonstruktionen für *Ips typographus* und *Hylobius abietis* hinsichtlich ihrer Effektivität und Selektivität sowie die Erprobung verschiedener Lockstoffe für *Ips typographus* im ersten Projektjahr. Im zweiten und dritten Projektjahr stand dann für *Ips typographus* die Qualifizierung des vielversprechendsten Fallentyps sowie der Lockstoffe im Vordergrund. Für *Hylobius abietis* wurden im zweiten Projektjahr diverse Lockstoffe hinsichtlich ihrer Effektivität getestet und ein erster Massenfangversuch durchgeführt, der dann im dritten Projektjahr in zwei Versuchsgebieten wiederholt wurde. Parallel dazu wurde für *Hylobius abietis* im zweiten und dritten Projektjahr der neue Fallentyp der Auflagefalle entwickelt und im vierten Projektjahr mit der bereits optimierten modifizierten Nordlander-Falle und einer kommerziell erhältlichen Falle verglichen.

Für das Teilprojekt 2 wurden als Zielarten basierend auf den drei häufigsten Baumarten in Deutschland, Gemeine Fichte (*Picea abies*), Gemeine Kiefer (*Pinus sylvestris*) und Rotbuche (*Fagus sylvatica*), die drei Borkenkäferarten *Ips typographus*, *Ips sexdentatus* und *Xylosandrus germanus* gewählt. Letzterer ist nicht heimisch in Deutschland, sondern stammt aus Ostasien (Kirkendall und Faccoli 2010), von wo aus er ab 1932 in Nordamerika und

1951 in Europa einwanderte bzw. eingeschleppt wurde und sich insbesondere in den letzten zwanzig Jahren rasant ausbreitete (Galko et al. 2018, Groschke 1953, Ranger et al. 2016). Im Rahmen der Projektverlängerung wurde im Jahr 2023 außerdem noch *Trypodendron lineatum* in das Portfolio der Zielarten aufgenommen, da aus der Praxis von zunehmenden und erheblichen Schäden durch diese Art an Holzpoltern berichtet wurde. So lagen z. B. die Schadholzmengen im Staatswaldgebiet des Freistaats Sachsen in den letzten fünf Jahren mit nur einer Ausnahme im fünfstelligen Bereich mit einem Maximum von 77.000 m³ im Jahr 2018. Während die laborbasierten Versuche der UGÖ im Teilprojekt 2 ausschließlich auf diese Hauptzielarten fokussierten, wurden im Rahmen der Freilandversuche der TUD und OGF in den jeweiligen Habitaten auch Nebenzielarten aus der Unterfamilie der Borkenkäfer sowie Borkenkäferantagonisten wie z. B. die beiden wichtigen Arten *Thanasimus formicarius* (Gemeiner Ameisenbuntkäfer) und *Thanasimus femoralis* (Rotbeiniger Ameisenbuntkäfer) erfasst und ausgewertet. Die Versuche im Rahmen des Teilprojekts 2 konnten dabei insbesondere auf bestehende Erkenntnisse zur Nutzung olfaktorischer Signale durch Borkenkäfer zur Kommunikation, Orientierung und Wirtsfindung aufbauen (Bakke 1976, Borden 1989, Byers 2004, Pureswaran et al. 2004, Wood 1982). Dass diese Signale bzw. die Aktivität und Reaktion von Borkenkäfern durch den Einsatz von Non-Host-Volatilen und Antiaggregationsstoffen beeinflusst bzw. manipuliert und dies im Rahmen eines Management von Borkenkäfern gezielt ausgenutzt werde kann, ist ebenfalls bekannt und belegt worden (Andersson 2007, Bakke 1981, Dickens et al. 1992, Etxebeste und Pajares 2011, Gillette und Munson 2007, Perkins et al. 2015, Pureswaran und Borden 2004, Wilson et al. 1996). Die Integration solcher Stoffe in eine Push-Pull-Strategie ist bereits erfolgreich getestet wurden (Cook et al. 2007, Jakuš et al. 2011b). Ziel im Teilprojekt 2 war es, bekannte Substanzen für mitteleuropäische Verhältnisse und Arten zu testen sowie die Palette um weitere Substanzen zu erweitern. Dazu wurden im ersten und im zweiten Projektjahr einerseits auf Literaturrecherchen und andererseits auf den Erkenntnissen der Arbeitsgruppe an der UGÖ basierende Substanzen verwendet. Im dritten Projektjahr erfolgte zusätzlich die Erprobung von Mischungen aus den jeweils zwei besten Substanzen der vorangegangenen Jahre. Im Rahmen der Projektverlängerung wurden dann im vierten Projektjahr die bisher vielversprechendsten Substanzen bezüglich der neuen Zielart *Trypodendron lineatum* getestet. In Ergänzung dazu wurden zwei praxisnahe Besiedlungsversuche durchgeführt, bei denen Stammabschnitte der Gemeinen Fichte mit einem auf Basis der Fallenversuche vielversprechenden Repellent behandelt und deren Besiedlung durch *Ips typographus* im Vergleich zu unbehandelten Stämmen protokolliert wurde. Die Versuchsform entsprach einem Ökoversuch, bei dem im Freiland, aber unter bestimmten kontrollierten Bedingungen gearbeitet wird.

3. Resümee der wesentlichen Ergebnisse

a) Arbeitspakete und Meilensteine

Im Folgenden geben Tabelle 2 und Tabelle 3 eine Übersicht zur Erfüllung der im Projektantrag beschriebenen Arbeitspakete, Arbeitsschritte und Meilensteine.

Tabelle 2: Übersicht zur Erfüllung der Arbeitspakete und Arbeitsschritte (Q = Quartal) im Teilvorhaben 1 des Projekts ReBek

Arbeitspakete/ Arbeitsschritte	**Bearbeitungszeitraum**	**Zielerreichung**
AP 1.2	01/2020–12/2023	Die Ziele wurden erreicht.
Vertiefende Literaturrecherche zu Fallen und Lockstoffen	Q1-4, 2020-2023	Die Arbeitsschritte wurden erfolgreich abgeschlossen.
Fallenkonstruktion	Q1-2, 2020-2023	
Lockstoffentwicklung	Q2-3, 2020-2021	
Fallen- und Lockstofferprobungen	Q2-3, 2020-2022 Q2, 2023	
Datenauswertungen und Berichte	Q1, 2021-2023 Q3-4, 2020-2023	
AP 2.2	01/2020–12/2023	Die Ziele wurden erreicht.
Literaturrecherche Semiochemikalien, Versuchsvorbereitung, Flächenakquise	Q1, 2020-2023 Q4, 2020-2022	Die Arbeitsschritte wurden erfolgreich abgeschlossen.
Erprobung von Semiochemikalien mittels Fallen im Freiland	Q1-3, 2020-2022 Q1-2, 2023	
Verhaltensexperimente	Q2-3, 2020-2022	
Datenauswertungen und Berichte	Q1, 2021-2023 Q3-4, 2020-2023	

Tabelle 3: Übersicht zur Erfüllung der Meilensteine (M) im Teilvorhaben 1 des Projekts ReBek

Arbeitspakete/ Meilensteine	**Fällig-keit**	**Zielerreichung**
AP 1.2 TU Dresden		
M 1: Fertigstellung der Fallen zu Beginn der Fangsaison	04/2020	Modifizierte WitaTrap®-Segmenttrichterfallen und Theysohn®-Schlitzfalle für *I. typographus* sowie Boden-, Kragen- und Nordlander-Falle für *H. abietis* fertiggestellt
	04/2021	Modifizierte WitaTrap®-Segmenttrichterfallen mit Selektionssieb für *I. typographus* und Nordlander-Fallen für *H. abietis* fertiggestellt
	04/2022	Nordlander-Fallen für Massenfang von *H. abietis* und Auflagefallen für ersten Test fertiggestellt
	04/2023	WitaTrap®-Fangrohre, Auflage- und Nordlander-Fallen in ausreichender Anzahl vorhanden
M2: Abschluss der Lockstoffanalyse zum Ende der Fangsaison	09/2020	Auswertung der Fangzahlen abgeschlossen
	09/2021	Auswertung der Fangzahlen abgeschlossen
	09/2022	Auswertung der Fangzahlen abgeschlossen
	09/2023	Auswertung der Fangzahlen abgeschlossen
M3: Schlussbericht	03/2024	Abschluss zum 31.03.2024 vorgesehen
AP 2.2 TU Dresden		
M 1: Abschluss der Erprobung der Semiochemikalien im Freiland	09/2020	Erprobung in Beständen der Gemeinen Fichte, Gemeinen Kiefer und Rotbuche abgeschlossen
	09/2021	Erprobung in Beständen der Gemeinen Fichte, Gemeinen Kiefer und Rotbuche abgeschlossen
	09/2022	Erprobung in Beständen der Gemeinen Fichte, Gemeinen Kiefer und Rotbuche abgeschlossen
	09/2023	Erprobung in einem Bestand der Gemeinen Fichte abgeschlossen
M 2: Abschluss der Verhaltensexperimente	09/2020	Praktischer Start aufgrund der COVID-Pandemie verschoben und durch umfassende Literaturrecherche im Rahmen einer Bachelorarbeit ersetzt
	09/2021	Verhaltensexperiment abgeschlossen
	09/2022	Verhaltensexperiment abgeschlossen
M 3: Schlussbericht	03/2024	Abschluss zum 31.03.2024 vorgesehen

b) Zusammenfassung

Im Teilprojekt 1 konnten verschiedene Optimierungsmöglichkeiten zur Verbesserung der Effektivität und Selektivität von Monitoringfallen für *Ips typographus* erarbeitet werden. Die 12-Trichter-WitaTrap®-Falle erwies sich als am besten geeignet im Hinblick auf die Fangzahlen. Durch den zusätzlichen Einbau eines Siebes konnte außerdem eine effektive Reduktion der Beifänge erzielt und dadurch der negative Einfluss der Fallen auf Nichtzielorganismen, insbesondere Nützlinge, minimiert werden. Als am besten fangender Dispenser wurde Typosan® identifiziert, wobei dessen Attraktivität vor allem während des Schwarmflugs der überwinterten Altkäfer am höchsten ist. Die Chancen einer Reduktion der Borkenkäferpopulation sind zu diesem Zeitpunkt aufgrund der vorausgegangenen Wintermortalität am besten. Die Ergebnisse hierzu wurden im internationalen Open-Access-Fachjournal Forests veröffentlicht (Heber et al. 2021).

Für *Hylobius abietis* konnte im Teilprojekt 1 eine effektiv und selektiv fangende Bodenfalle für einen zukünftigen Massenfang entwickelt werden, die auf einem Modell von Nordlander (1987) basiert. Zusätzlich wurde ein neuartiger Fangbehälter entwickelt, der dem Anspruch einer schnellen und praktischen Handhabung gerecht wird. Als Alternative für Wälder mit flachgründigen Böden, bei denen eine Einbringung von Fallen in den Boden nicht möglich ist, wurde außerdem eine Auflagefalle entwickelt. Hinsichtlich der Lockstoffentwicklung bzw. -qualifizierung erwies sich die Kombination aus Ethanol und (-)-α-Pinen als am effektivsten. Von den getesteten Zusätzen verschiedener Substanzen konnte keine die Fangleistung signifikant steigern. Die Ergebnisse der Lockstoffversuche und des Fallenvergleichs mit der Zielart *Hylobius abietis* wurden im internationalen Open-Access-Fach-Journal Agricultural and Forest Entomology veröffentlicht (Heber et al. 2024). Die durchgeführten Massenfangversuche zeigten in Ansätzen, dass eine lokale Absenkung der Population von *Hylobius abietis* möglich sein kann, jedoch sind weitere methodische Anpassungen notwendig, um die Zuverlässigkeit dieser Methode zu validieren. Außerdem konnten weitere Erkenntnisse hinsichtlich der Präferenz von *Hylobius abietis* für verschiedene Baumarten gewonnen werden.

Im Teilprojekt 2 wurden in Beständen der drei Hauptbaumarten in Deutschland, der Gemeinen Fichte, der Gemeinen Kiefer und der Rotbuche, für die vier Hauptzielarten *Ips typographus*, *Ips sexdentatus*, *Xylosandrus germanus* und *Trypodendron lineatum* insgesamt 19 Substanzen in 24 Varianten getestet, für die zu vermuten war, dass es sich um für Borkenkäfer repellente Substanzen handelt. Dabei konnten für alle drei untersuchten Waldhabitate und alle vier Hauptzielarten mehrere Substanzen identifiziert werden, die die gewünschte ablenkende bzw. repellente Wirkung besitzen und damit als Push-Komponente in Managementstrategien für waldschädigende Borkenkäfer, z. B. für den Schutz von Holzpoltern und anderen schützenswerten Objekten, eingesetzt werden können. In wenigen Fällen wurde das Gegenteil, d. h. eine fangsteigernde Wirkung bei den getesteten

Substanzen festgestellt. Diese würden sich damit als Pull-Komponente in Managementstrategien, z. B. für einen Massenfang, eignen, entsprachen aber nicht der Zielsetzung des Teilprojekts. Neben der Reaktion der Hauptzielarten der Borkenkäfer auf die getesteten Substanzen wurde ebenfalls die Reaktion zahlreicher weiterer Borkenkäferarten, aber auch die der auftretenden Borkenkäferantagonisten und potenziellen Borkenkäferantagonisten erfasst und ausgewertet, welche in allen drei Habitaten eine hohe Artendiversität in Verbindung mit teilweise hohen Individuenzahlen aufwiesen. Im Gegensatz zu den Borkenkäfern besteht die Zielsetzung bei den Borkenkäferantagonisten bzw. potenziellen Antagonisten darin, deren Fang durch die getesteten Substanzen nicht bzw. nicht negativ zu beeinflussen. Diese Zielsetzung wurde nicht mit allen Testvarianten für alle Antagonistentaxa, aber für die Mehrzahl der Varianten für die relevantesten Taxa erfüllt. In einigen Fällen zeigte sich sogar eine positive, d. h. eine fangsteigernde Wirkung der getesteten Substanzen auf einige Borkenkäferantagonisten und potenzielle Antagonisten. Substanzen, die die beiden Eigenschaften einer Borkenkäferrepellenz und Antagonistenattraktanz in sich vereinen, können prinzipiell als Idealsubstanz für ein Borkenkäfermanagement betrachtet werden.

Aufbauend auf den Ergebnissen der Fallenversuche wurde im Teilprojekt 2 außerdem in einem Schritt in Richtung einer Anwendung von Borkenkäferrepellentien in der Praxis in einem Ökoversuch in zweifacher Ausführung die Besiedlung von behandelten und unbehandelten Stammabschnitten der Gemeinen Fichte durch *Ips typographus* getestet werden. Dabei konnte nicht nur die Anwendung und Ausbringung einer vielversprechenden Substanz praxisnah erprobt, sondern auch die angewandte Methodik optimiert werden. Das Verfahren könnte in Zukunft genutzt werden, um Vortests mit neuen potenziellen Repellentien für ein Borkenkäfermanagement durchzuführen, welche unter naturnahen Bedingungen stattfinden, gleichzeitig aber auch weniger Aufwand und Zeit als Freilandfallen- oder -fangholzversuche in Anspruch nehmen würden.

II. Ausführliche Darstellung der Ergebnisse

1. Versuchsübersicht

Eine Auflistung der in den vier Projektjahren durchgeführten 34 Versuche in den beiden Teilprojekten findet sich in Tabelle 4 und Tabelle 5. Die Freilandversuche fanden in den Bundesländern Sachsen, Brandenburg und Bayern statt (Abbildung 1).

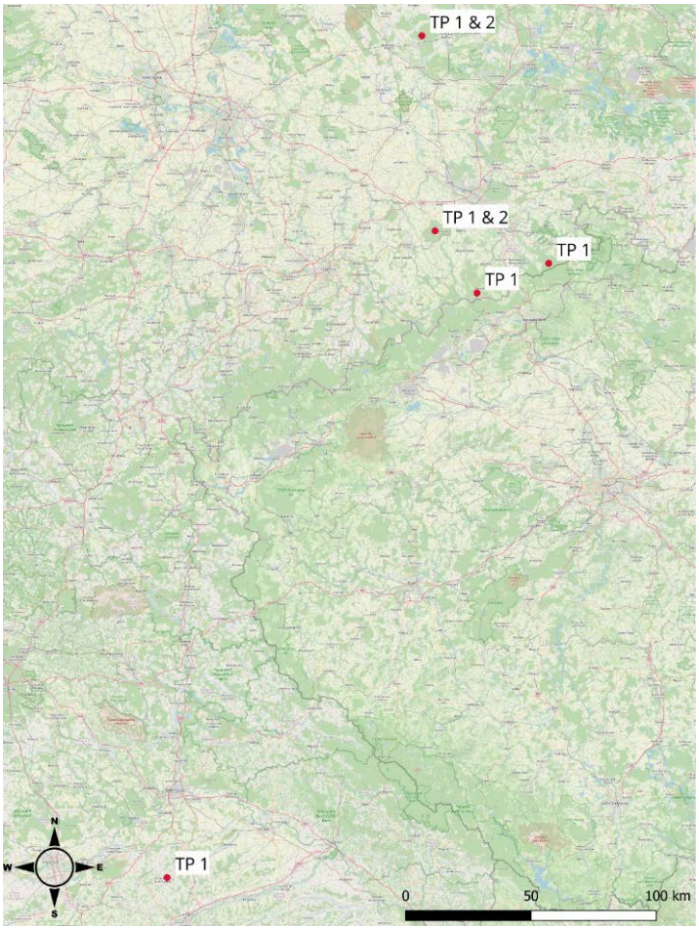

Abbildung 1: Darstellung der fünf Versuchsgebiete von Norden nach Süden: Revier Weißhaus (Brandenburg), Reviere Hetzdorf und Naundorf im Tharandter Wald, Revier Rosenthal, Revier Schellerhau (alle Sachsen) und Landkreis Pfeffenhausen (Bayern)

Tabelle 4: Übersicht der durchgeführten Versuche im Teilprojekt 1

Jahr	Zielart	Zielstellung
2020	*Ips typographus*	Vergleich verschiedener kommerzieller Dispenser
		Auswirkung unterschiedlicher Abgaberaten
		Vergleich verschiedener WitaTrap®-Segmenttrichter-fallen mit der Theysohn®-Schlitzfalle
		Vergleich verschiedener Pheromondispenser hinsichtlich ihrer Fangwirkung im Spätsommer
	Hylobius abietis	Vergleich der Fangwirkung verschiedener Fallentypen in Brandenburg
		Vergleich der Fangwirkung verschiedener Fallentypen im Tharandter Wald
		Versuch zur Prägung von Individuen aus zwei unterschiedlichen Habitaten hinsichtlich ihrer Fraß-präferenz an heimischen Baumarten
2021	*Ips typographus*	Test verschiedener Additive zur Verbesserung der Fang-wirkung von Typosan®
		Test verschiedener Siebweiten zur Reduzierung von Beifängen von *Thanasimu*s spec.
		Versuch zur Wirkung einer erhöhten Applikation von Typosan® auf die Fangzahlen
	Hylobius abietis	Lockstoffversuch in Weißhaus
		Massenfangversuch mit Schadbonitur in Pfeffenhausen
		Lockstoffversuch in Schellerhau
		Versuch zum Einfluss von Baumartenmischung, nichthei-mischen Baumarten und Nadelbaum-Naturverjüngung auf das Fraßverhalten
	Ips typographus	Push-Pull-Versuch*
2022	*Hylobius abietis*	Massenfangversuch in Rosenthal
		Wiederfangversuch
		Auflagefallenentwicklung
		Massenfangversuch in Schellerhau
	Ips typographus	Vergleich verschiedener Additive zur Fangsteigerung
2023	*Hylobius abietis*	Vergleich von WitaTrap®-Rüsselkäferfangrohr, Nord-lander-Falle und Bodenfalle

* in Zusammenarbeit mit Teilprojekt 2

Tabelle 5: Übersicht der durchgeführten Versuche im Teilprojekt 2

Jahr	Zielart	Zielstellung
2020	*Ips typographus*	Erprobung verschiedener potenzieller Repellentien in Gemeiner Fichte
	Ips sexdentatus	Erprobung verschiedener potenzieller Repellentien in Gemeiner Kiefer
	Xylosandrus germanus	Erprobung verschiedener potenzieller Repellentien in Rotbuche
2021	*Ips typographus*	Ökoversuch zur Wirkung von Eukalyptusöl auf die Besiedlung von Gemeiner Fichte
		Erprobung verschiedener potenzieller Repellentien in Gemeiner Fichte (zwei verschiedene Aufbauten)
	Ips sexdentatus	Erprobung verschiedener potenzieller Repellentien in Gemeiner Kiefer
	Xylosandrus germanus	Erprobung verschiedener potenzieller Repellentien in Rotbuche
	Ips typographus	Push-Pull-Versuch*
2022	*Ips typographus*	Optimierter Ökoversuch zur Wirkung von Eukalyptusöl auf die Besiedlung von Gemeiner Fichte
		Erprobung verschiedener potenzieller Repellentien in Gemeiner Fichte
	Ips sexdentatus	Erprobung verschiedener potenzieller Repellentien in Gemeiner Kiefer
	Xylosandrus germanus	Erprobung verschiedener potenzieller Repellentien in Rotbuche
2023	*Trypodendron lineatum*	Erprobung verschiedener potenzieller Repellentien in Gemeiner Fichte

* in Zusammenarbeit mit Teilprojekt 1

2. Erzielte Ergebnisse – Teilprojekt 1, Arbeitspaket 1.2

2.1. Einleitung

Innerhalb der Projektlaufzeit wurden im Teilprojekt 1 insgesamt 21 Versuche in fünf verschiedenen Versuchsgebieten durchgeführt (Tabelle 4). Aufgrund des großen Umfangs werden im Folgenden nur jene Ergebnisse dargestellt, die für die Zielstellung relevant sind und sich auf die beiden Zielarten *Ips typographus* und *Hylobius abietis* sowie wichtige Nichtzielorganismen konzentrieren. Die Versuche waren so konzipiert, dass zunächst verschiedene Fallentypen erprobt wurden, um dann geeignete Konstruktionen zu qualifizieren. Gleichzeitig erfolgte eine kontinuierliche Lockstofferprobung im Freiland. Auf diese Art und Weise wurden Erkenntnisse gewonnen, die eine Verbesserung bestehender Fangverfahren ermöglichen und zur Entwicklung naturnaher und pflanzenschutzmittelfreier Regulationsverfahren für das Management von Borken- und Rüsselkäfern beitragen.

2.2. Methodik

Die Freilandversuche orientierten sich methodisch am Konzept der Falleninseln (Wehnert 2014), bei dem verschiedene Varianten innerhalb einer Falleninsel miteinander verglichen werden und dieser Aufbau fünffach in einem Versuchsgebiet wiederholt wird. Die Falleninseln wurden dabei in einem Abstand von mindestens 50 m errichtet, während die Fallen innerhalb der Inseln abhängig von der Abgaberate der Lockstoffe im Abstand von 5-15 m zueinander aufgebaut wurden. Dies schließt eine gegenseitige Beeinflussung innerhalb einer Insel sowie zwischen verschiedenen Inseln aus, während gleichzeitig vergleichbare Umweltbedingungen zwischen den verschiedenen Varianten gewährleistet sind. Zum Fang der Insekten wurden Totfangfallen verwendet, in denen die Organismen in einer Fang- und Konservierungsflüssigkeit fixiert werden. Dazu wurde eine gesättigte Benzoesäurelösung mit einem Tropfen Spülmittel verwendet, welches der Herabsetzung der Oberflächenspannung diente, um ein schnelles Absinken der Organismen zu garantieren.

Typische Versuchsflächen waren von Altbeständen umgebene Freiflächen, die infolge von Sturmereignissen oder Sanitärhieben entstanden. Hierfür wurden für *Ips typographus* Flächen in Sachsen im Forstbezirk Bärenfels (Revier Naundorf) ausgewählt, während für *Hylobius abietis* Versuche in Sachsen im Forstbezirk Bärenfels (Reviere Schellerhau und Naundorf) und Forstbezirk Neustadt (Revier Rosenthal), in Brandenburg in der Landeswaldoberförsterei Doberlug (Revier Weißhaus) und in Bayern im Landkreis Pfeffenhausen durchgeführt wurden. Nach Möglichkeit wurden die Fallen im Rhythmus von ein bis zwei Wochen sechsmal geleert. Statistisch wurde die Anzahl der Leerungen ebenso wie die Anzahl der Falleninseln als Wiederholungen betrachtet, so dass sich ein maximaler Stichprobenumfang von n = 30 ergab, der aber aufgrund abweichender Bedingungen in manchen Fällen angepasst werden musste.

2.3. Ergebnisse

2.3.1. Zielart *Ips typographus*

2.3.1.1. Versuchsjahr 2020

2.3.1.1.1. Fallenvergleich

In einem Freilandversuch im Tharandter Wald im Forstbezirk Bärenfels im Revier Naundorf wurden verschiedene Fallentypen hinsichtlich ihrer Effektivität im Fang von *Ips typographus* untersucht. Dabei wurden zwei grundsätzliche Fallentypen ausgewählt: die WitaTrap®-Segmenttrichterfalle basierend auf der Trichterfalle von Lindgren (1983) und die Theysohn®-Schlitzfalle nach Niemeyer et al. (1983). Die Versuche von Galko et al. (2010) deuteten bereits auf die überlegene Fangwirkung der Falle mit 12 Trichtern nach Lindgren (1983) hin, weshalb die WitaTrap®-Segmenttrichterfalle in verschiedenen Längen mit 8, 12 und 16 Trichtern getestet und mit den Fangergebnissen der Theysohn®-Schlitzfalle verglichen wurde. Dabei stellte sich die WitaTrap®-Falle mit 12 Trichtern als am effektivsten im Fang von *Ips typographus* heraus (Abbildung 2). Mit ihr wurden signifikant mehr Individuen als mit den anderen drei Fallentypen gefangen. Auch die Theysohn®-Schlitzfalle, welche gegenwärtig standardmäßig im Monitoring von *Ips typographus* verwendet wird, fing signifikant weniger Individuen. Die Verkürzung der WitaTrap®-Falle auf 8 Trichter bewirkt offensichtlich eine zu starke Reduktion von Fallenoberfläche und -silhouette, während bei der Verlängerung auf 16 Trichter zu vermuten ist, dass die Käfer aufgrund der langen Fallstrecke in der Lage sind, ihre Flügel zu öffnen und die Falle zu verlassen, bevor sie in der Fangflüssigkeit fixiert werden.

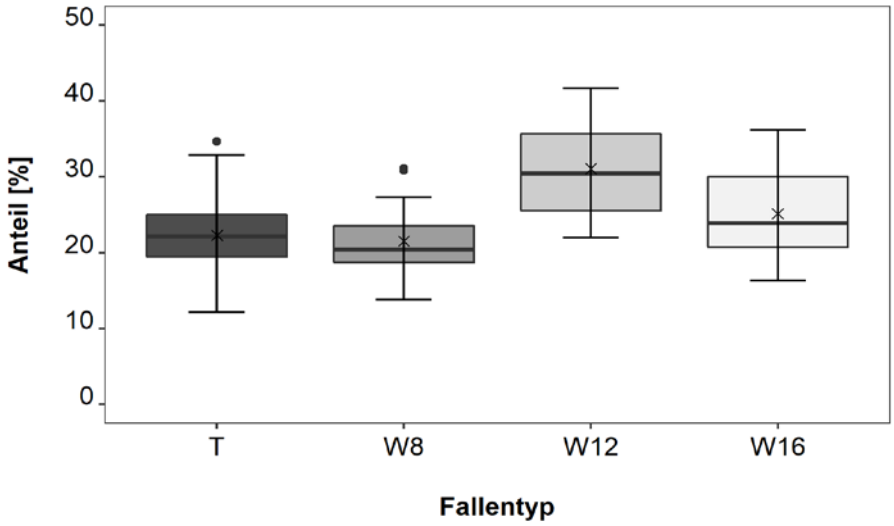

Abbildung 2: Fanganteile von *Ips typographus* je Falleninsel und Leerungsdatum in Abhängigkeit vom Fallentyp im Versuchszeitraum vom 06.04.-29.06.2020, n = 30, T = Theysohn®-Schlitzfalle, W8/12/16 = WitaTrap®-Segmenttrichterfalle mit 8, 12 und 16 Trichtern

Ein anderes Bild ergab sich bei der Betrachtung der Fänge von *Pityogenes chalcographus* (Kupferstecher oder Sechszähniger Fichtenborkenkäfer), der häufig in Gesellschaft mit *Ips typographus* und ebenso wie dieser in Massenvermehrung vorkommt, und den beiden Borkenkäferantagonisten *Thanasimus formicarius* und *Thanasimus femoralis*. Die höchsten Fangzahlen von *Pityogenes chalcographus* wurden in der Theysohn®-Schlitzfalle nachgewiesen (Abbildung 3). Dies könnte auf die Präferenz dieser Borkenkäferart für den Kronenraum von Fichten und der eher flächigen Optik der Schlitzfalle im Vergleich zu den Trichterfallen zurückzuführen sein. So ist die visuelle Wahrnehmung von Silhouetten durch Borkenkäfer bekannt (Goyer et al. 2004, Zumr 1992).

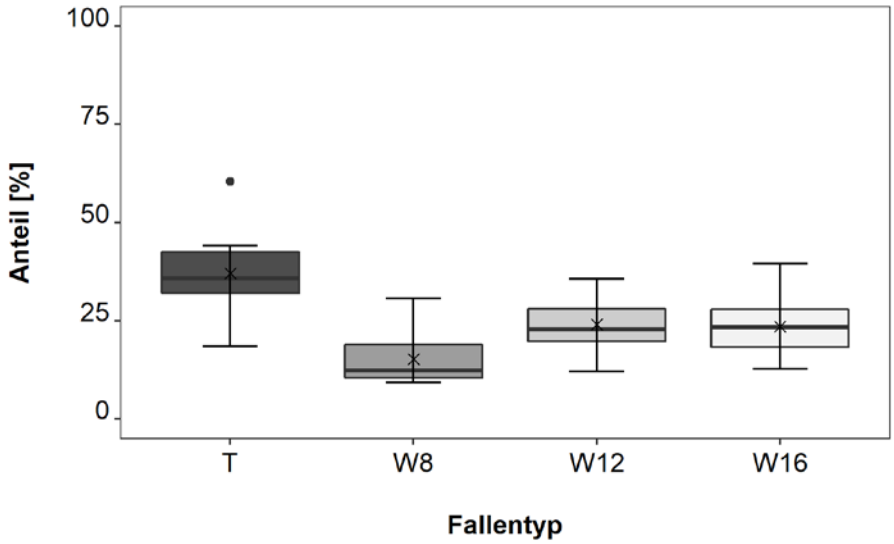

Abbildung 3: Fanganteile von *Pityogenes chalcographus* je Falleninsel und Leerungsdatum in Abhängigkeit vom Fallentyp im Versuchszeitraum vom 06.04.-29.06.2020, n = 30, T = Theysohn®-Schlitzfalle, W8/12/16 = WitaTrap®-Segmenttrichterfalle mit 8, 12 und 16 Trichtern

Bei *Thanasimus* spec. ist dagegen ein deutlicher Zusammenhang zwischen steigender Fallenoberfläche bzw. steigender Anzahl an Trichtern und steigenden Fangzahlen zu erkennen (Abbildung 4). So wurden die signifikant höchsten Individuenzahlen im Fallentyp mit 16 Trichtern gefangen, während die geringsten Fangzahlen in der Theysohn®-Schlitzfalle vorlagen.

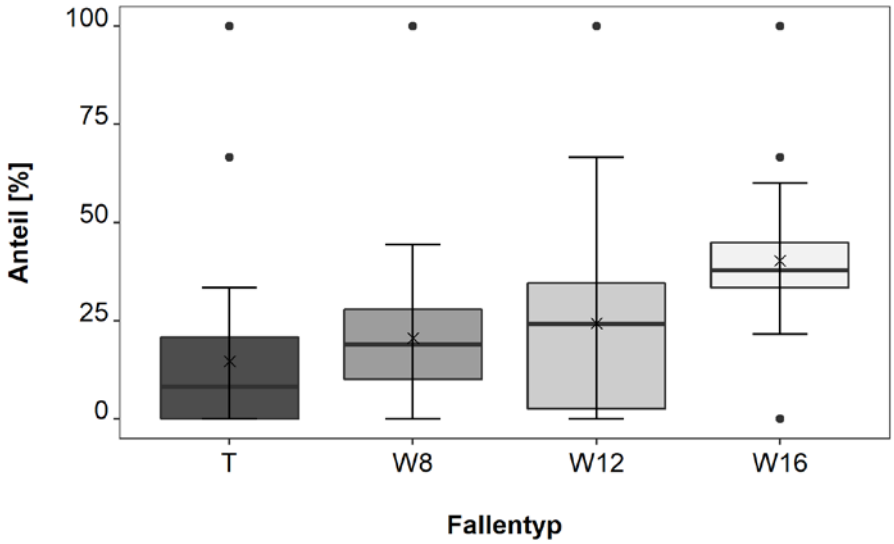

Abbildung 4: Fanganteile von *Thanasimus* spec. je Falleninsel und Leerungsdatum in Abhängigkeit vom Fallentyp im Versuchszeitraum vom 06.04.-29.06.2020, n = 30, T = Theysohn®-Schlitzfalle, W8/12/16 = WitaTrap®-Segmenttrichterfalle mit 8, 12 und 16 Trichtern

2.3.1.1.2. Dispenservergleich I

Ebenfalls im Revier Naundorf im Forstbezirk Bärenfels wurden verschiedene kommerzielle Dispenser getestet, die in Europa für den Fang von *Ips typographus* genutzt werden. Dabei handelte es sich um Pheroprax®, Typosan®, Ipsowit®, IT Ecolure classic®, IT Ecolure Mega® und IT Ecolure Extra®. Ziel war die Evaluation der Fangeffektivität dieser Dispenser und die Abschätzung des lockstoffbasierten Optimierungspotenzials aktueller Monitoringverfahren hin zu einer Erweiterung zum Massenfang. Typosan® erwies sich dabei als der am besten fangende Dispenser für *Ips typographus* (Abbildung 5). Die Unterschiede waren dabei im Vergleich zu allen anderen Dispensern bis auf IT Ecolure Extra® signifikant. Es zeigte sich eine zeitliche Abhängigkeit der Reaktion von *Ips typographus* auf die genutzten Lockstoffpräparate, wobei die Attraktivität von Typosan® zu Beginn der Fangperiode besonders hoch und signifikant höher war als alle anderen Varianten (Abbildung 6). Basierend auf dem Modell PHENIPS (Baier et al. 2007) wurden während der ersten drei Fangperioden überwinternde Altkäfer gefangen, die auf der Suche nach neuen Brutbäumen waren. In diesem Zeitraum ist die Populationsdichte von *Ips typographus* durch die Wintermortalität am geringsten und eine effektive Reduktion durch Massenfang am wahrscheinlichsten. Ursächlich für die überlegene Fangwirkung von Typosan® scheint dessen Zusammensetzung zu sein, da die Abgaberate im Vergleich zu den anderen Dispensern eher im mittleren Bereich liegt und damit nicht entscheidend für die höhere Fangwirkung sein kann. Typosan® setzt sich offenbar aus einer sehr effektiven Kombination aus 2-Methyl-3-buten-1-ol und cis-Verbenol zusammen. Ersteres wirkt als Landestimulus auf kurze Distanz und Letzteres als Fernattraktant (Schlyter et al. 1987).

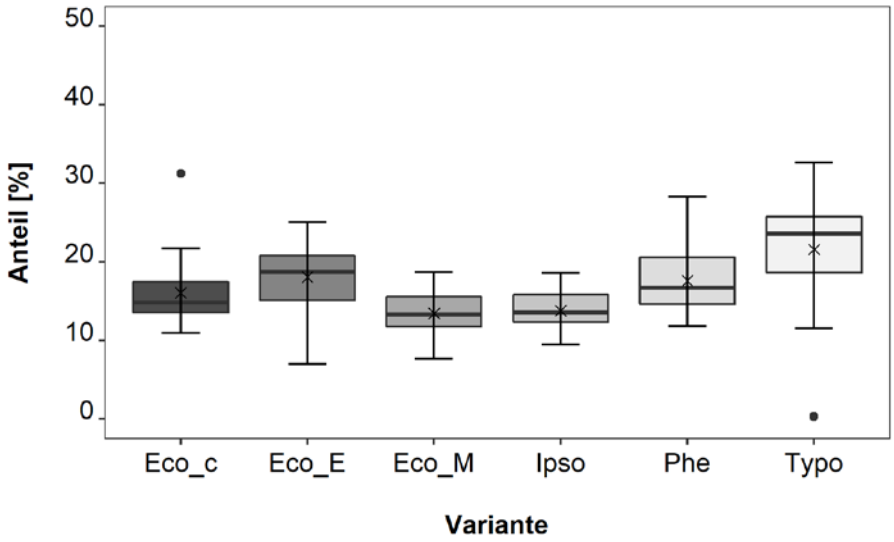

Abbildung 5: Fanganteile von *Ips typographus* je Falleninsel und Leerungsdatum in Abhängigkeit vom Lockstoffpräparat in Theysohn®-Schlitzfallen im Versuchszeitraum vom 06.04.-29.06.2020, n = 30, Eco_c = IT Ecolure classic®, Eco_E = IT Ecolure Extra®, Eco_M = IT Ecolure Mega®, Ipso = Ipsowit®, Phe = Pheroprax®, Typo = Typosan®

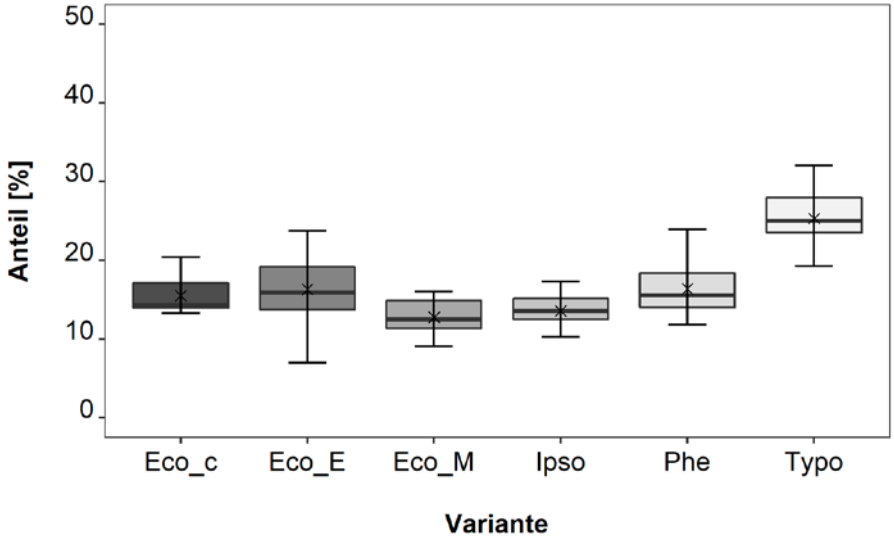

Abbildung 6: Fanganteile von *Ips typographus* je Falleninsel und Leerungsdatum in Abhängigkeit vom Lockstoffpräparat in Theysohn®-Schlitzfallen im Versuchszeitraum vom 06.04.-18.05.2020, n = 15, Eco_c = IT Ecolure classic®, Eco_E = IT Ecolure Extra®, Eco_M = IT Ecolure Mega®, Ipso = Ipsowit®, Phe = Pheroprax®, Typo = Typosan®

Die hohe Attraktivität von Typosan® für *Ips typographus* geht einher mit einer geringen Attraktivität auf die beiden Antagonistenarten *Thanasimus formicarius* und *Thanasimus femoralis*, die nicht nur für Typosan®, sondern auch für Ipsowit® signifikant geringer ausfiel als für alle anderen Dispenser (Abbildung 7).

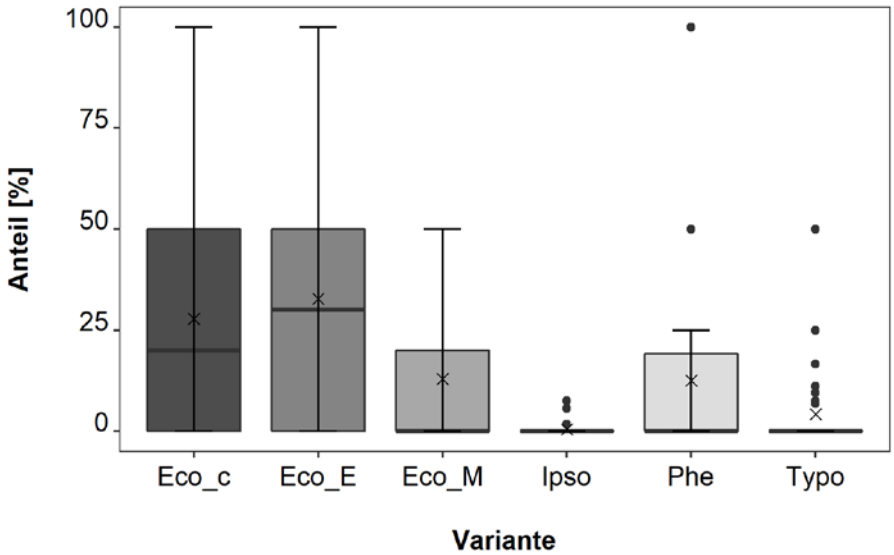

Abbildung 7: Fanganteile von *Thanasimus* spec. je Falleninsel und Leerungsdatum in Abhängigkeit vom Lockstoffpräparat in Theysohn®-Schlitzfallen im Versuchszeitraum vom 06.04.2020 bis 29.06.2020, n = 30, Eco_c = IT Ecolure classic®, Eco_E = IT Ecolure Extra®, Eco_M = IT Ecolure Mega®, Ipso = Ipsowit®, Phe = Pheroprax®, Typo = Typosan®

Die Kombination einer hohen Attraktivität für die Zielart *Ips typographus* und einer geringen Attraktivität für wichtige natürliche Gegenspieler macht Typosan® zu einem sehr geeigneten Lockstoff für Verfahren zum massenhaften Fang von *Ips typographus*. Gleichzeitig zeigen die Unterschiede zwischen den Fangzahlen, dass die Komponente der Lockstoffzusammensetzung noch deutliches Verbesserungspotenzial bietet, um die Massenfangtauglichkeit aktueller Fangverfahren zu optimieren.

2.3.1.1.3. Dispenservergleich II

Die Vermutung, dass eine jahreszeitspezifische Lockstoffwahrnehmung bei *Ips typographus* vorliegt, wurde in einer Wiederholung des Versuches vom 14.07.-25.08.2020 auf derselben Versuchsfläche bestätigt. In diesem Zeitraum zeigten sich nur geringe Unterschiede in der Fangwirkung der verschiedenen Dispenser (Abbildung 8). Lediglich Ipsowit® fing signifikant weniger Individuen von *Ips typographus* als Pheroprax®, Typosan® und IT Ecolure Extra®. Die deutliche Überlegenheit von Typosan®, die besonders in den ersten sechs Fangwochen des ersten Dispenservergleichs ausgeprägt war, konnte im Spätsommer nicht beobachtet werden. Basierend auf dem Modell PHENIPS (Baier et al. 2007) wurden in diesem Zeitraum Individuen der ersten bis dritten Generation gefangen, die die Fallen deutlich weniger selektiv anflogen als die überwinterten Altkäfer. Letztere sind während des ersten Schwärmflugs nach der Überwinterung einer verstärkten Mortalität ausgesetzt und zeigen daher eine erhöhte olfaktorische Sensitivität, die beginnend mit der ersten Generation bis in den Spätsommer zunehmend abnimmt (Wermelinger 2004).

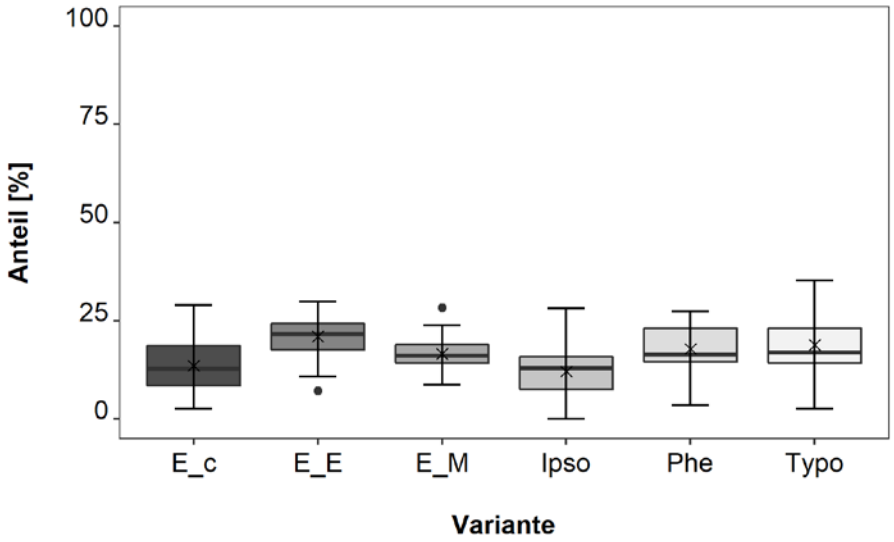

Abbildung 8: Fanganteile von *Ips typographus* je Falleninsel und Leerungsdatum in Abhängigkeit vom Lockstoffpräparat in Theysohn®-Schlitzfallen im Versuchszeitraum vom 28.07.-01.09.2020, n = 30, Eco_c = IT Ecolure classic®, Eco_E = IT Ecolure Extra®, Eco_M = IT Ecolure Mega®, Ipso = Ipsowit®, Phe = Pheroprax®, Typo = Typosan®

2.3.1.1.3.1. Abgaberatenversuch

Neben den Komponenten Fallentyp und Lockstoffzusammensetzung wurde auch die Abgaberate hinsichtlich ihres Potenzials für einen zukünftigen Massenfang von *Ips typographus* untersucht. Die Versuche fanden ebenso wie der Fallen- und Dispenservergleich im Tharandter Wald im Revier Naundorf statt. Als Lockstoff wurde Pheroprax® verwendet und in ein-, zwei- und vierfacher Applikation in Theysohn®-Schlitzfallen angebracht. Es zeigte sich eine signifikante Steigerung der Fänge bei einer Erhöhung der Abgaberate, wobei die meisten Käfer mit der vierfachen Applikation gefangen wurden (Abbildung 9). Bi einem Gesamtfang von 560.598 Individuen von *Ips typographus* entsprach dies einem Anteil von 36,2 % und damit einer Steigerung der Fangmenge im Vergleich zur einfachen Applikation um 15,5 %.

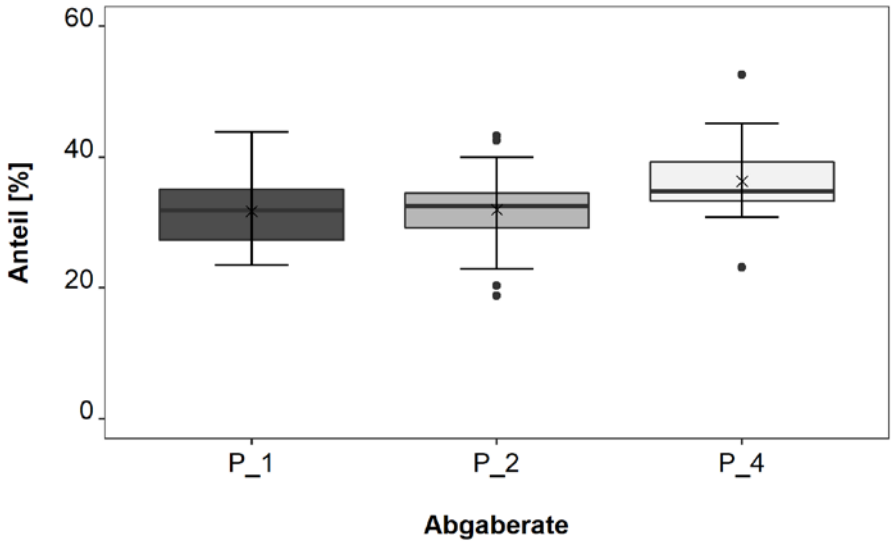

Abbildung 9: Fanganteile von *Ips typographus* je Falleninsel und Leerungsdatum in Abhängigkeit von der Menge des Lockstoffpräparats in Theysohn®-Schlitzfallen im Versuchszeitraum vom 06.04.-29.06.2020, n = 30, P_1/2/4 = einfache/zweifache/vierfache Pheroprax®-Applikation

Eine noch deutlichere Reaktion auf die Erhöhung der Pheroprax®-Applikation zeigten die beiden Borkenkäferantagonisten *Thanasimus formicarius* und *Thanasimus femoralis* (Abbildung 10). Die vierfache Applikation führte zu einer Verdreifachung der Fangzahlen von *Thanasimus* spec. im Vergleich zur einfachen Applikation.

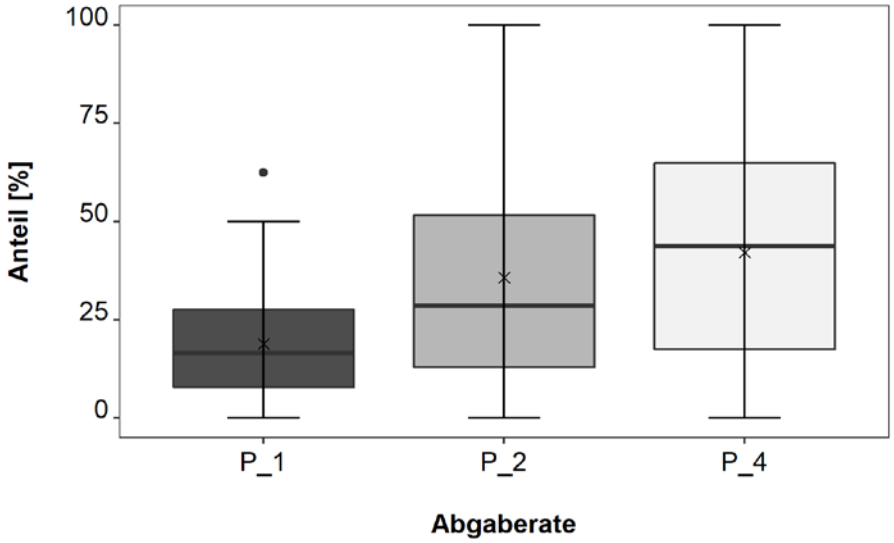

Abbildung 10: Fanganteile von *Thanasimus* spec. je Falleninsel und Leerungsdatum in Abhängigkeit von der Menge des Lockstoffpräparats in Theysohn®-Schlitzfallen im Versuchszeitraum vom 06.04.-29.06.2020, n = 30, P_1/2/4 = einfache/zweifache/vierfache Pheroprax®-Applikation

Zusammenfassend zeigte sich, dass die Komponente der Abgaberate ein eher ungeeignetes Instrument darstellt, um aktuelle Monitoringverfahren hin zu einem Massenfangverfahren zu erweitern. Zwar wurde eine signifikante Erhöhung der Fangzahlen der Zielart

Ips typographus bei Erhöhung der Abgaberate durch die Ausbringung mehrerer Dispenser erreicht, jedoch fiel diese bezüglich der absoluten Fangzahlen marginal aus und rechtfertigt nicht die erhöhten finanziellen Kosten. Eine stärkere Erhöhung der Fangzahlen wäre mit einer weiteren, logarithmischen Steigerung der Lockstoffabgabe zu vermuten (Ditz und Nieder 2016, Müller 1993), die jedoch ebenso die Kosten logarithmisch steigern würde. Außerdem reagierten wichtige Borkenkäferantagonisten mit linear gesteigerten Fangzahlen bei steigender Abgaberate. Diese Reaktion ist im Rahmen eines Massenfangs nicht wünschenswert bzw. kontraproduktiv, da von einer Schwächung der natürlichen Widerstandsfähigkeit des Ökosystems ausgegangen werden muss. Gleichzeitig verdeutlicht dieses Ergebnis aber auch die Notwendigkeit eines mechanischen Selektionsmechanismus in Borkenkäferfallen.

2.3.1.2. Versuchsjahr 2021

2.3.1.2.1. Additivversuch

Nachdem der Dispenservergleich aus dem Vorjahr zeigte, dass die Fangzahlen signifikant durch die Lockstoffzusammensetzung beeinflusst werden, wurde die Optimierung dieser Komponente im Versuchsjahr 2021 auf den vorjährig genutzten Freiflächen im Tharandter Wald im Revier Naundorf angestrebt. Ziel des Additivversuches war es, die Effektivität des kommerziellen Dispensers Typosan®, der sich im Vorjahr als am besten fangender Dispenser für *Ips typographus* erwies, durch den Zusatz von potenziell attraktiven Additiven zu steigern. Dafür wurden die Semiochemikalien (-)-α-Pinen (CAS 7785-26-4) mit hoher und niedriger Abgaberate, Fichtennadelöl (Primavera R 524), eine Kombination aus Hexansäure (CAS 142-62-1) und Nonanal (CAS 124-19-6) sowie Oreganoöl (TAOASIS) ausgewählt. Die Kombination aus Hexansäure und Nonanal wurde mit einer Konzentration von 10^{-3} und Oreganoöl mit 10^{-5} in Silikonöl ausgebracht. Die hohe Abgaberate des (-)-α-Pinens wurde durch eine offene Polypropylen-Dosen (4 cm Durchmesser 4 cm, 80 ml Fassungsvermögen, 50 ml Füllmenge) realisiert, die niedrige durch die Verwendung eines Langlock®-Dispensers. Alle weiteren Additive wurden ebenfalls in Langlock®-Dispensern ausgebracht. Um den zielgerichteten Anflug der Borkenkäfer auf die Lockstoffe zu demonstrieren, wurde auch eine Nullvariante in den Versuch integriert.

Im Ergebnis gelang es jedoch nicht, die Attraktivität von Typosan® für *Ips typographus* durch den Zusatz der verschiedenen Additive signifikant zu steigern (Abbildung 11). Stattdessen wurde aber ein vielversprechendes Ergebnis hinsichtlich der Forschung nach potenziellen Repellentien erzielt. So senkte die hohe Abgaberate von (-)-α-Pinen die Lockwirkung des Typosan®-Dispensers signifikant herab und wurde daher als eine Testvariante in die Versuche im Teilprojekt 2 einbezogen. Auch bei *Pityogenes chalcographus* zeigten sich ähnliche Wirkungen der Additive wie bei *Ips typographus* (Abbildung 12).

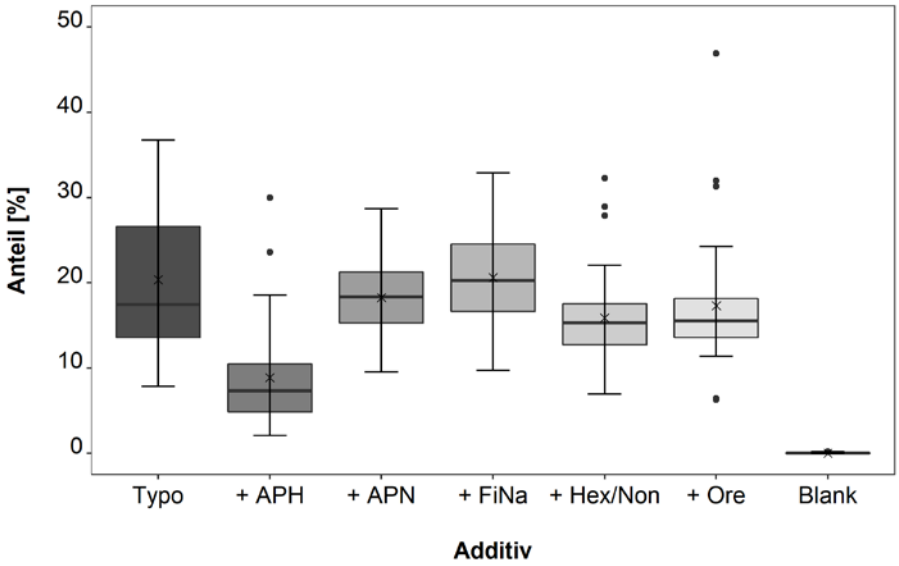

Abbildung 11: Fanganteile von *Ips typographus* je Falleninsel und Leerungsdatum in Abhängigkeit von der Lockstoffzusammensetzung (Typosan® + Additiv) im Versuchszeitraum vom 07.05.-19.07.2021 in WitaTrap®-Segmenttrichterfallen mit 12 Trichtern, n = 30, Typo = Typosan®, APH = (-)-α-Pinen mit hoher Abgaberate, APN = (-)-α-Pinen mit niedriger Abgaberate, FiNa = Fichtennadelöl, Hex/Non = Hexansäure/Nonanal, Ore = Oreganoöl, Blank = Nullfalle ohne Lockstoff

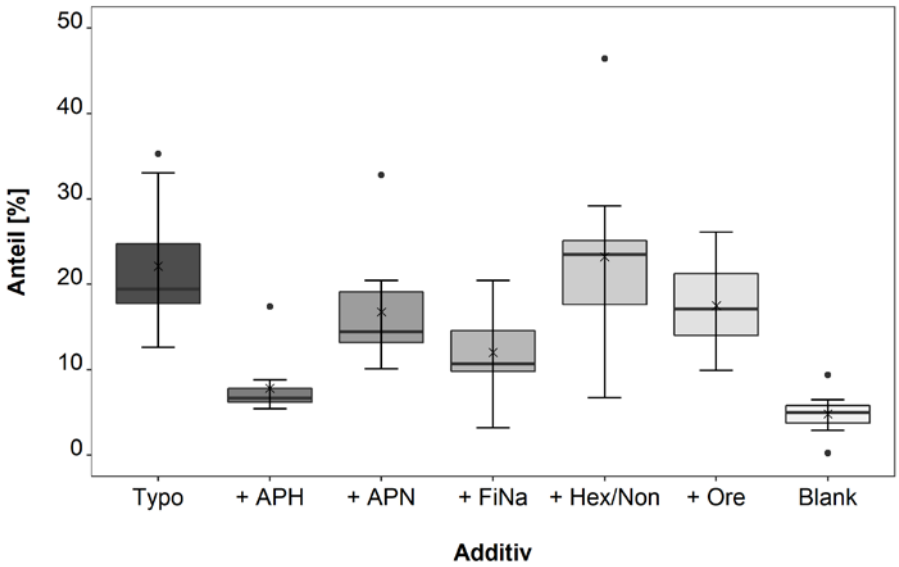

Abbildung 12: Fanganteile von *Pityogenes chalcographus* je Falleninsel und Leerungsdatum in Abhängigkeit von der Lockstoffzusammensetzung (Typosan® + Additiv) im Versuchszeitraum vom 07.05.-04.06.2021 in WitaTrap®-Segmenttrichterfallen mit 12 Trichtern, n = 10, Typo = Typosan®, APH = (-)-α-Pinen mit hoher Abgaberate, APN = (-)-α-Pinen mit niedriger Abgaberate, FiNa = Fichtennadelöl, Hex/Non = Hexansäure/Nonanal, Ore = Oreganoöl, Blank = Nullfalle ohne Lockstoff

Während die hohe Abgaberate von (-)-α-Pinen die Lockwirkung des Typosan®-Dispensers auf die Borkenkäferarten *Ips typographus* und *Pityogenes chalcographus* signifikant senkte, zeigten sich signifikant gesteigerte Fangzahlen bei den beiden Antagonistenarten *Thanasimus formicarius* und *Thanasimus femoralis* (Abbildung 13). In die statistische Auswertung konnte dabei lediglich die erste Fangperiode einbezogen werden, da nur hier ein ausreichender Anflug an Individuen gegeben war. Von den in diesem Zeitraum gefangenen 250 Individuen von *Thanasimus* spec. wurden 129 Stück, d. h. 51,6 %, in den Fallen mit der Kombination aus Typosan® und der hohen Abgaberate von (-)-α-Pinen gefangen. Auch dies ist als positives Ergebnis hinsichtlich der Ziele des Teilprojekts 2 zu werten, in dessen Rahmen Substanzen, die eine Repellenz für Borkenkäfer mit einer Attraktanz für deren Antagonisten vereinen, als Optimum gelten.

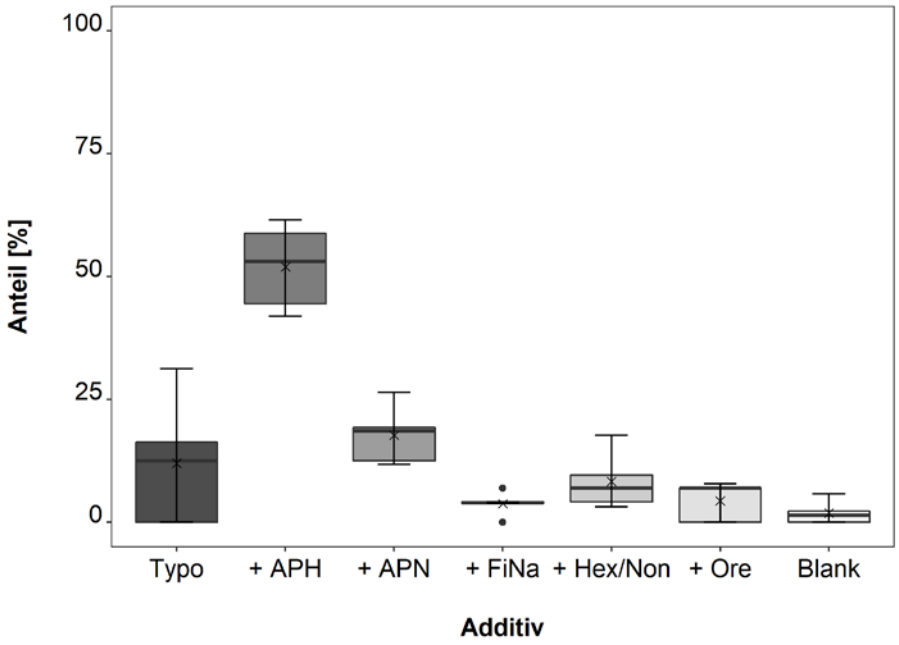

Abbildung 13: Fanganteile von *Thanasimus* spec. je Falleninsel und Leerungsdatum in Abhängigkeit von der Lockstoffzusammensetzung (Typosan® + Additiv) im Versuchszeitraum vom 07.05.-17.05.2021 in Wita-Trap®-Segmenttrichterfallen mit 12 Trichtern, n = 5, Typo = Typosan®, APH = (-)-α-Pinen mit hoher Abgaberate, APN = (-)-α-Pinen mit niedriger Abgaberate, FiNa = Fichtennadelöl, Hex/Non = Hexansäure/Nonanal, Ore = Oreganoöl, Blank = Nullfalle ohne Lockstoff

2.3.1.2.2. Abgaberatenversuch

Die Ergebnisse aus dem Abgaberatenversuch des Vorjahres, in dem Pheroprax®-Dispenser in einfacher, zweifacher und vierfacher Menge appliziert wurden, zeigten, dass nur eine Steigerung der Fänge von maximal 15,5 % möglich war. Basierend auf dem Weber-Fechner-Gesetz ist bekannt, dass sich der Anflug der Insekten bei einer linearen Steigerung der Abgaberate nicht proportional erhöht. Stattdessen muss eine logarithmische Steigerung des Reizes erfolgen, um eine lineare Steigerung der Reaktion zu erzielen (Ditz

und Nieder 2016). Die Applikation von einem, zwei und zehn Dispensern im Abgaberatenversuch 2021 sollte diese Verhältnisse widerspiegeln und gleichzeitig klären, ob mit der höchsten Lockstoffdosis bereits das Maximum erreicht wird und, so wie es das Weber-Fechner-Gesetz beschreibt, eine Steigerung der Fangzahlen nicht mehr realisierbar ist (Müller 1993). Als Lockstoff wurde basierend auf dem Dispenservergleich im Vorjahr Typosan® verwendet. Außerdem wurden dieselben Freiflächen wie für den Abgaberatenversuch im Vorjahr und ebenso wieder Theysohn®-Schlitzfallen genutzt, um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten.

Die Fangzahlen von *Ips typographus* zeigten, dass auch die Applikation von zehn Lockstoffdispensern noch zu einer weiteren signifikanten Steigerung führt (Abbildung 14). Die Steigerung fiel dabei aufgrund der deutlich höheren Lockstoffmenge als im Vorjahr auch deutlich stärker aus. So konnten durch die zehnfache Applikation von Typosan® die Fangzahlen im Vergleich zur einfachen Variante um 129,9 % gesteigert werden. Wie basierend auf dem Weber-Fechner-Gesetz vermutet, konnten damit die Fangzahlen bei einer logarithmischen Erhöhung des Reizes linear um mehr als das Doppelte erhöht werden. Für die Optimierung von Fangverfahren hinsichtlich der Komponente der Abgaberate sind diese Ergebnisse jedoch ernüchternd. Der deutlich höhere finanzielle Aufwand, aber auch zeitliche Aufwand, bei der Ausbringung einer so hohen Zahl an Dispensern führt nicht zu einer diesen Aufwand rechtfertigenden Steigerung der Effektivität des Fangverfahrens. Hier wären nochmal deutlich höhere Fangzahlen notwendig, um einen entscheidenden Einfluss auf die sehr hohen Individuenzahlen vitaler Borkenkäferpopulationen ausüben zu können.

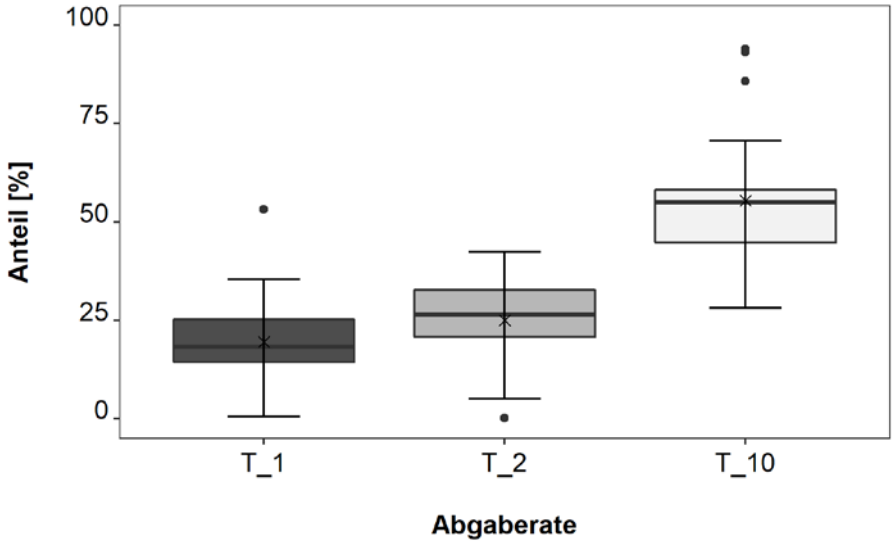

Abbildung 14: Fanganteile von *Ips typographus* je Falleninsel und Leerungsdatum in Abhängigkeit von der Menge des Lockstoffpräparats im Versuchszeitraum vom 07.05.-12.07.2021 in Theysohn®-Schlitzfallen, n = 30, T_1/2/10 = einfache/zweifache/zehnfache Typosan®-Applikation

In Analogie zu den beiden Dispenservergleichen im Jahr 2020 zeigte sich bei Betrachtung der Fangzahlen der letzten Leerungsperiode, dass insbesondere zu einem späteren Fangzeitpunkt eine sehr hohe Lockstoffmenge notwendig ist, um eine hohe Fängigkeit der Fallen zu gewährleisten (Abbildung 15). Es ist zu vermuten, dass die in der Umgebung befindlichen mit *Ips typographus* besiedelten Bäume eine so starke Lockwirkung erzeugen, dass die Attraktivität von Fallen nur bei der Applikation von sehr hohen Abgaberaten von Lockstoffen damit konkurrieren können. Dies bestätigt die von Heber et al. (2021) formulierte Theorie einer jahreszeitspezifischen Reaktion von *Ips typographus* auf verschiedene Lockstoffe, die offensichtlich auch auf die Abgaberate von Lockstoffen zutrifft. Eine Optimierung hinsichtlich eines Massenfangs kann daher nicht basierend auf der Abgaberate der Lockstoffe erfolgen. Zu Beginn der Schwärmperiode kann durch diese Komponente kein entscheidender Einfluss auf die Fangzahlen genommen werden, da die Käfer kaum zwischen niedrigen und hohen Abgaberaten unterscheiden. Tritt ein deutlicherer Effekt der erhöhten Abgaberate ein, ist die erste Generation bereits ausgeflogen und die Borkenkäferpopulation damit wieder auf einem derart hohen Niveau, dass Massenfänge laut jetzigem Stand der Wissenschaft uneffektiv sind.

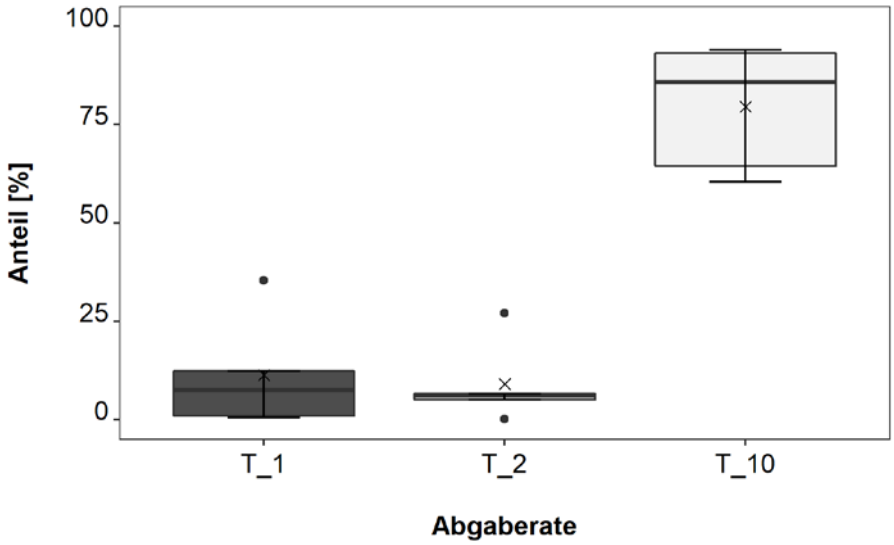

Abbildung 15: Fanganteile von *Ips typographus* je Falleninsel und Leerungsdatum in Abhängigkeit von der Menge des Lockstoffpräparats im Versuchszeitraum vom 01.07.-12.07.2021 in Theysohn®-Schlitzfallen, n = 5, T_1/2/10 = einfache/zweifache/zehnfache Typosan®-Applikation

Auch die in Abbildung 16 erkennbaren steigenden Fangzahlen der Borkenkäferantagonisten *Thanasimus formicarius* und *Thanasimus femoralis* sprechen gegen die Applikation einer hohen Menge Typosan®-Dispenser im Rahmen von potenziellen Massenfangverfahren.

Ein wiederum reziprokes Verhalten zeigte die ebenfalls Gemeine Fichte besiedelnde Borkenkäferart *Pityogenes chalcographus* (Abbildung 17), die signifikant geringere Fangzahlen in den Fallen mit der höchsten Applikationsmenge von Typosan® aufwies. Dieser Umstand deutet auf eine Konkurrenzvermeidung bezüglich *Ips typographus* hin. So könnte die hohe Menge an Typosan® ein hohes Vorkommen von *Ips typographus* widerspiegeln und ein Hinweis darauf sein, dass der vorhandene Brutraum bereits vollständig belegt ist.

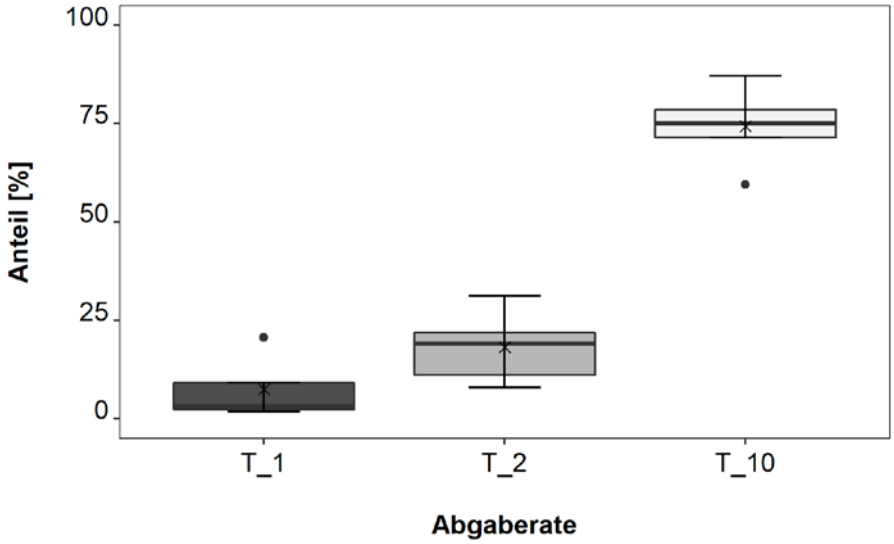

Abbildung 16: Fanganteile von *Thanasimus* spec. je Falleninsel und Leerungsdatum in Abhängigkeit von der Menge des Lockstoffpräparats im Versuchszeitraum vom 07.05.-17.05.2021 in Theysohn®-Schlitzfallen, n = 5, T_1/2/10 = einfache/zweifache/zehnfache Typosan®-Applikation

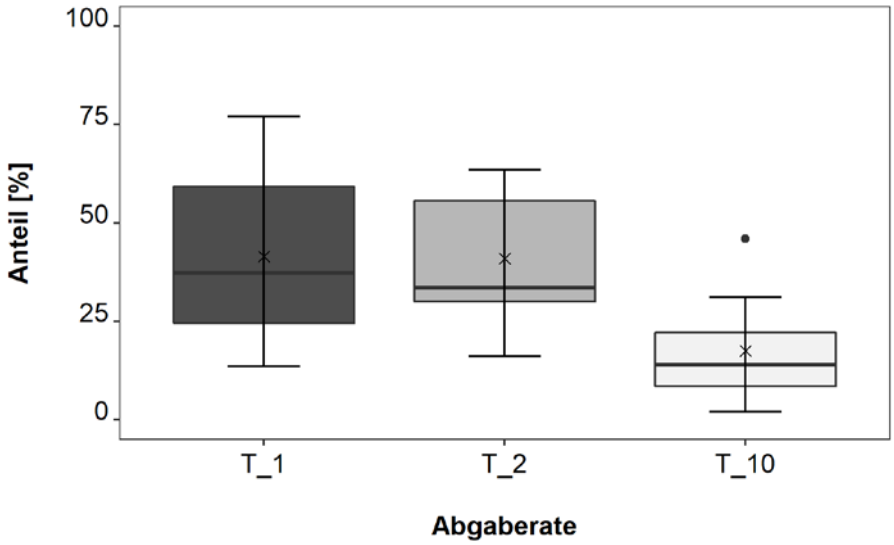

Abbildung 17: Fanganteile von *Pityogenes chalcographus* je Falleninsel und Leerungsdatum in Abhängigkeit von der Menge des Lockstoffpräparats im Versuchszeitraum vom 07.05.-01.06.2021 in Theysohn®-Schlitzfallen, n = 10, T_1/2/10 = einfache/zweifache/zehnfache Typosan®-Applikation

2.3.1.2.3. Siebversuch

Im Versuchsjahr 2020 waren die hohen Fangzahlen der bedeutenden Borkenkäferantagonisten *Thanasimus formicarius* und *Thanasimus femoralis* auffällig. So wurden im Fallenvergleich 982 Individuen, im Dispenservergleich 374 Individuen und im Abgaberatenversuch 1.073 Individuen gefangen. Diese hohen Fangzahlen tragen unter Umständen dazu bei, dass die Antagonistendichte lokal abgesenkt wird und deren Erholung aufgrund der univoltinen Lebensweise länger dauert. Massenfangfähige Fallen für *Ips typographus* müssen daher ein hohes Maß an Selektivität aufweisen. Aufgrund der Tatsache, dass *Thanasimus* spec. und andere Borkenkäferantagonisten in Wäldern der Gemeinen Fichte für die Lokalisierung von *Ips typographus* Komponenten dessen Aggregationspheromons nutzen (Bakke und Kvamme 1981, Hansen 1983, Tømmerås 1985), diese Stoffe also gleichermaßen attraktiv für Schadorganismus und Antagonist wirken, kann die notwendige Selektivität im gegebenen Fall nicht olfaktorisch erreicht werden. Eine potenzielle Alternative ist jedoch eine mechanische Barriere innerhalb der Fallen. So wurde ein siebbasierter Selektionsmechanismus bereits erfolgreich bezüglich *Thanasimus* spec. in Verbindung mit der größten europäischen *Ips*-Art, *Ips sexdentatus*, erprobt (Martín et al. 2013). Wichtig dabei ist ein konstruktiver Kompromiss, der die Antagonisten ausreichend schützt, gleichzeitig aber die Fängigkeit der Falle für die Zielart nur in einem geringen Maß herabsetzt.

Der darauf abzielende Freilandversuch beinhaltete die Integration eines Siebes in den untersten der 12 Trichter der WitaTrap®-Segmenttrichterfalle. Seitlich in den Trichter eingebohrte Löcher sollten es Nichtzielorganismen ermöglichen, über das Sieb laufend aus der Falle zu gelangen. Dabei wurden Siebe mit drei verschiedenen Maschenweiten von 4-6 mm getestet und mit einer Nullvariante ohne Sieb verglichen. Die Versuche fanden erneut auf der Fläche des Fallenvergleichs 2020 im Tharandter Wald im Revier Naundorf statt.

Im Ergebnis zeigte sich, dass die eingebauten Siebe die Fangwirkung der Fallen beeinflussen (Abbildung 18). Die kleinste Maschenweite von 4 mm führte zu einer signifikanten Verringerung der Fänge von *Ips typographus* im Vergleich Falle ohne Sieb. Offensichtlich war diese Maschenweite zu gering, so dass es auch einigen Zielinsekten gelang, die Falle wieder zu verlassen. Die mittlere Maschenweite von 5 mm sowie die hohe Maschenweite von 6 mm zeigten hingegen keine signifikanten Unterschiede in den Fangzahlen von *Ips typographus* im Vergleich zur Falle ohne Sieb. Im Hinblick auf das steigende Risiko des Beifangs von *Thanasimus* spec. mit steigender Maschenweite, ist die 5-mm-Variante empfehlenswert. Da im Gegensatz zum Vorjahr jedoch nur wenige Individuen von *Thanasimus* spec. gefangen wurden und dies für alle Fallenvarianten, auch die ohne Sieb galt, kann keine stichhaltige Aussage bezüglich der Selektivität der Siebe für *Thanasimus* spec. getroffen werden. Einen guten Anhaltspunkt geben jedoch die Ergebnisse von Martín et al. (2013), bei denen der Beifang von *Thanasimus* spec. in Fallen mit einem 5-mm-Maschenweiten-Sieb um 75 % reduziert und damit eine gute Selektivität erreicht werden konnte.

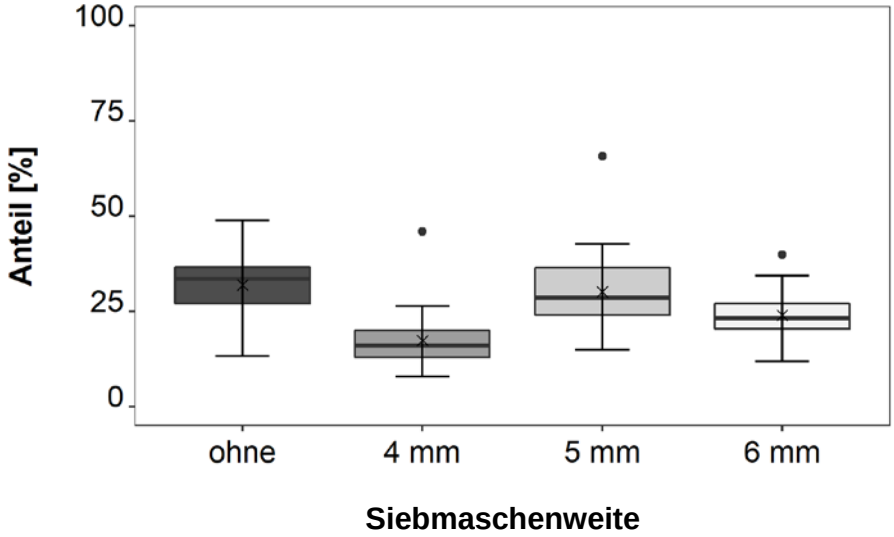

Abbildung 18: Fanganteile von *Ips typographus* je Falleninsel und Leerungsdatum in Abhängigkeit von der Maschenweite von in WitaTrap®-Segmenttrichterfallen mit 12 Trichtern installierten Sieben im Versuchszeitraum vom 07.05.-22.07.2021, n = 30, ohne = kein Sieb installiert

2.3.1.2.4. Push-Pull-Versuch

Als Zusammenarbeit von Teilprojekt 1 und Teilprojekt 2 wurde im Rahmen einer studentischen Belegarbeit ein Freilandversuch gestaltet, der zum ersten Mal die Elemente beider Teilprojekte (TP 1 = Pull, TP 2 = Push) kombiniert. Als Grundlage hierfür diente der Versuchsaufbau von Jakuš et al. (2011a), bei dem Non-Host-Volatile an Fichten in Dispensern angebracht wurden und so das Absterben von Bäumen durch den Befall mit *Ips typographus* um 73 % reduziert werden konnte. Der Versuchsaufbau wurde jeweils in zwei Fichtenbeständen mit angrenzenden Freiflächen im Tharandter Wald im Revier Naundorf nachgestellt (Abbildung 19). Statt eines Non-Host-Volatils wurde mit Eukalyptusöl eine besser als Non-Habitat-Volatil (NHabV) zu bezeichnende Substanz verwendet, welche aus dem Portfolio der im Teilprojekt 2 getesteten Substanzen aufgrund vielversprechender repellenter Wirkungen ausgewählt wurde. Das Öl wurde an den Bäumen in Langlock®-Dispensern in einer Höhe von zwei Metern angebracht, wobei je Fläche insgesamt 20 Bäume in zwei an die Freifläche angrenzenden Reihen zu je 10 Bäumen auf diese Weise behandelt wurden. Durch einen 10 m breiten Trennstreifen wurden die Null-Flächen separiert, auf denen keine Ausbringung von Eukalyptusöl erfolgte. Auf den an beiden Beständen angrenzenden Freiflächen wurden Theysohn®-Schlitzfallen mit einer Fang- und Konservierungsflüssigkeit aufgebaut. Diese wurden vom 07.05.-08.06.2021 ohne Lockstoff belassen und vom 08.06.-20.07.2021 mit einem Dispenser Typosan® beködert. Dadurch entstanden die zwei Zeiträume I und II, bei der Ersterer lediglich eine Push-Komponente und Zweiterer zusätzlich eine Pull-Komponente beinhaltete.

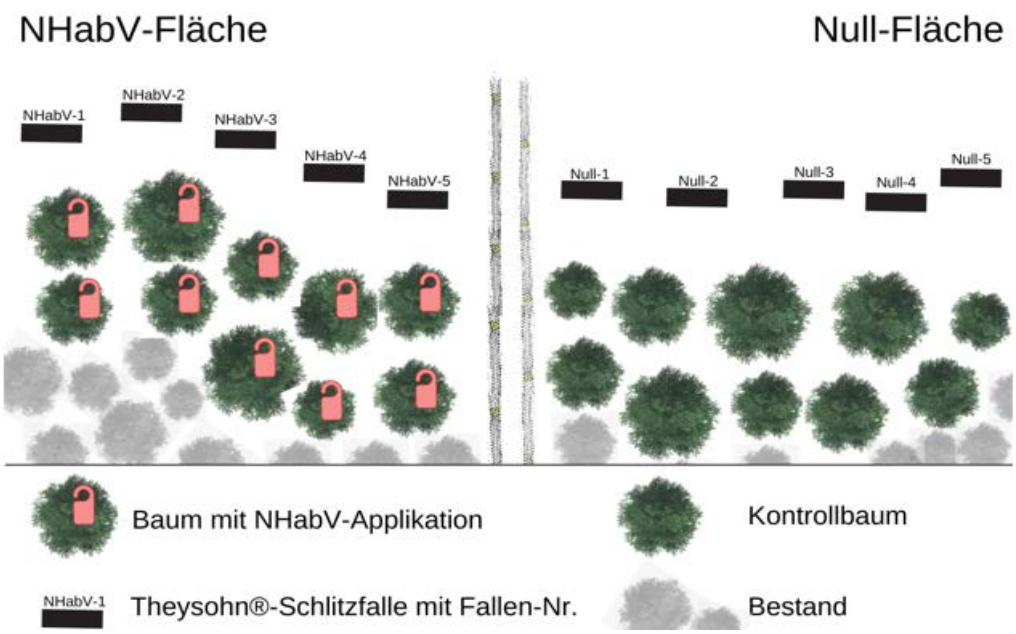

Abbildung 19: Schematischer Versuchsaufbau, NHabV = Non-Habitat-Volatil = Eukalyptusöl

In beiden Zeiträumen wurden in den Theysohn®-Schlitzfallen auf der Nullfläche höhere Fangzahlen nachgewiesen als auf der NHabV-Fläche, jedoch ohne statistische Signifikanz (Abbildung 20) und bei hoher Varianz. Die Interpretation der Ergebnisse ist schwierig. Es könnte vermutet werden, dass die Push-Wirkung des Eukalyptusöls einen geringeren Anflug von *Ips typographus* bewirkte bzw. den Anflug ablenkte und deshalb die Fänge auf der benachbarten Nullfläche tendenziell höher ausfielen. Dass dies auch für Zeitraum II und damit für die Integration einer Pull-Komponente galt, könnte darauf hinweisen, dass von Eukalyptusöl eine nicht zu unterschätzende Fernwirkung ausgeht.

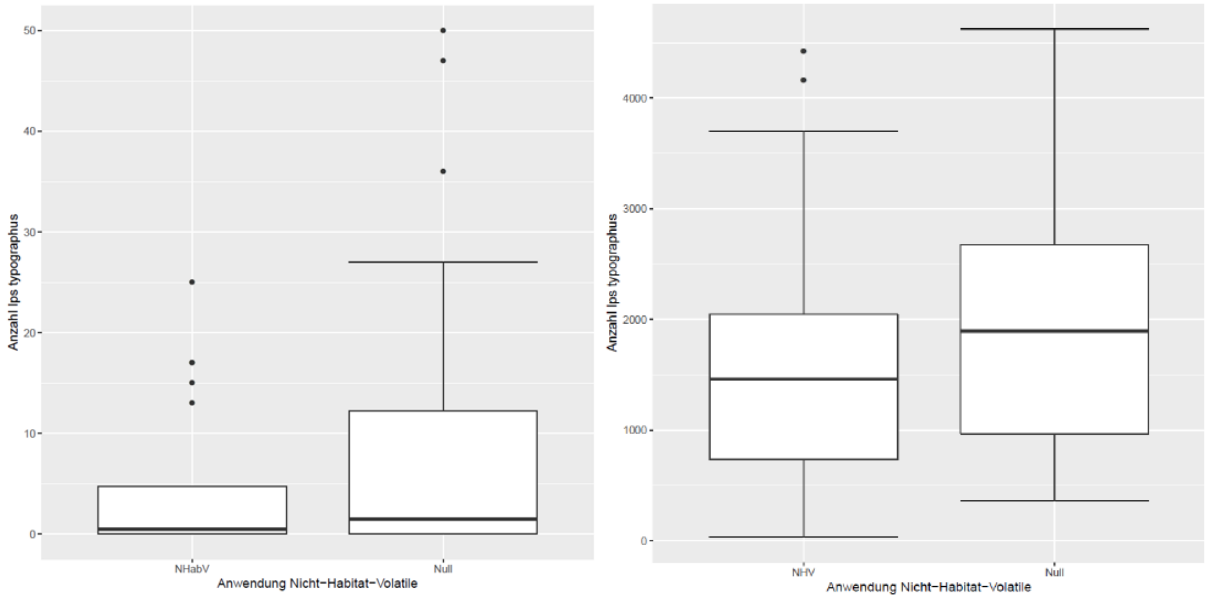

Abbildung 20: Fangzahlen von *Ips typographus* je Falleninsel und Leerungsdatum in Theysohn®-Schlitzfallen im Versuchszeitraum vom 07.05.-08.06.2021 ohne Pull-Komponente, n = 10 (links) und vom 08.06.-20.07.2021 mit Pull-Komponente, n = 20

Neben der Auswertung der Fangzahlen wurde eine Einschätzung der Vitalität des stehenden Bestandes durchgeführt. Hierfür wurden jeweils 20 Bäume auf den NHabV- und den Nullflächen dauerhaft markiert, um bei jeder Leerung der Fallen deren Gesundheitszustand einzuschätzen. Abbildung 21 zeigt, dass die Anwendung des Eukalyptusöls keine Auswirkung auf den Befall der begutachteten Bäume durch *Ips typographus* hatte. Zwar war auf den NHabV-Flächen ein marginal geringerer Anteil besiedelter Bäume zu beobachten, jedoch ist diese Verringerung um lediglich drei Prozent nicht zwangsläufig der Wirkung der NHabV zuzuschreiben.

Die Anwendung eines Push-Pull-Konzepts, die neben Jakuš et al. (2011a) auch von Cook et al. (2007), Huber et al. (2021), Seybold et al. (2018) und Anderen beschrieben wird, ist in diesem ersten kleinen Versuchsrahmen nicht gelungen. Eine höhere Anzahl an Wiederholungen zur statistischen Absicherung wäre notwendig gewesen ebenso wie eine höhere Abgaberate der Push-Komponente, um die Bestände effektiv zu schützen. Gleichermaßen kann aber auch die Gesamtsituation im Versuchsgebiet und der insgesamt hohe Druck auf die Bestände durch den in Massenvermehrung befindlichen *Ips typographus* eine Ursache für die indifferenten Ergebnisse sein. Ein gleichartiger Versuch mit einer wie beschriebenen Optimierung des Versuchsaufbaus hätte die Kapazitäten innerhalb des Projekts überschritten und sollte Bestandteil neuer Forschungsvorhaben sein, die die Erkenntnisse beider ReBek-Teilprojekte hinsichtlich Repellenz und Attraktion von Borkenkäfern vereinen.

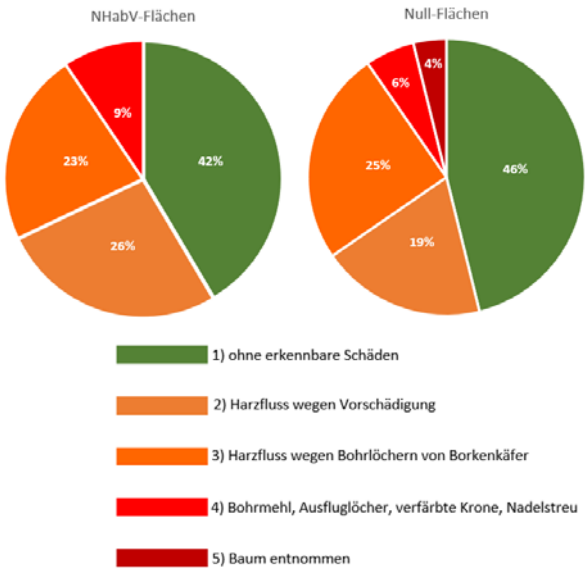

Abbildung 21: Ergebnisse der Vitalitätsansprache der markierten Gemeinen Fichten im Zeitraum des Push-Pull-Versuchs vom 07.05.– 20.07.2021, n = 40

2.3.1.3. Versuchsjahr 2022

2.3.1.3.1. Additivversuch

Nach dem Versuch im Vorjahr sollten 2022 im Tharandter Wald im Revier Naundorf weitere Additive hinsichtlich ihrer potenziell fangsteigernden Wirkung von kommerziellen Dispensern auf *Ips typographus* getestet werden. Dabei wurde der bewährte Dispenser Typosan® mit den Substanzen Retterspitz® Äußerlich, Terpinen (CAS 99-85-4), Oreganoöl (TAOASIS) sowie einer Kombination aus Sabinenhydrat (CAS 546-79-2) und Phenylacetylen (CAS 536-74-3) ergänzt. Die ersten beiden Substanzen hatten im Vorjahr im Rahmen der Versuche des Teilprojekts 2 eine attrahierende Wirkung auf *Ips typographus* gezeigt, während die letzten beiden Substanzen vom Projektpartner an der UGÖ basierend auf Verhaltensversuchen zur Erprobung empfohlen wurden. Auch Fichtennadelöl (Primavera) wurde nochmals getestet, da es im Vorjahr die tendenziell besten Ergebnisse aufwies.

Allerdings zeigte sich im Ergebnis erneut, dass keines der Additive die Lockwirkung von Typosan® erhöhen (Abbildung 22) und damit letztendlich keine geeignete Substanz für die Weiterentwicklung von Monitoringdispensern hin zu einem Massenfang identifiziert werden konnte. Stattdessen führten mit Ausnahme des Fichtennadelöls alle Substanzen sogar zu einer signifikanten Reduktion der Fangzahlen und sind damit eher dem Teilprojekt 2 und der Erforschung potenzieller Repellentien zuzuordnen.

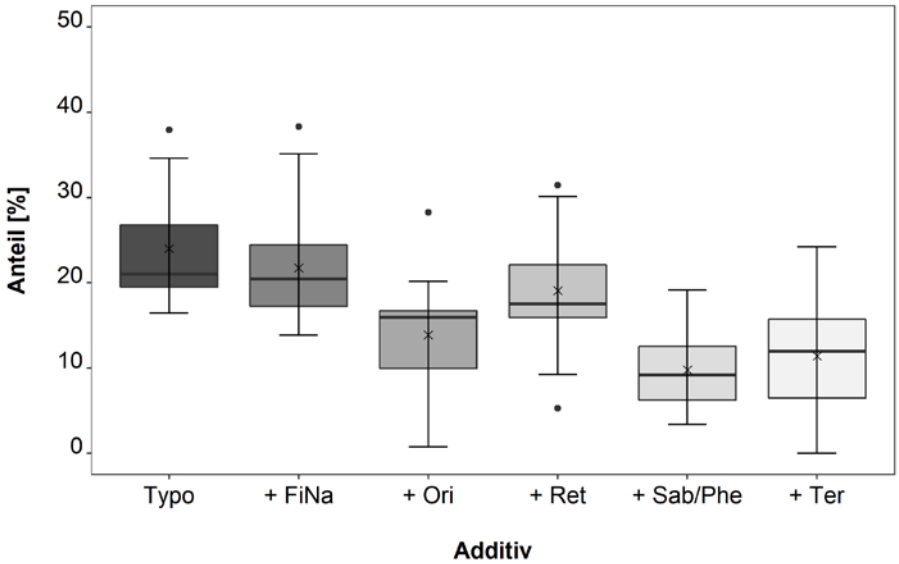

Abbildung 22: Fanganteile von *Ips typographus* je Falleninsel und Leerungsdatum in Abhängigkeit von der Lockstoffzusammensetzung (Typosan® + Additiv) im Versuchszeitraum vom 03.05.-26.07.2022 in WitaTrap®-Segmenttrichterfallen mit 12 Trichtern, n = 30, Typo = Typosan®, FiNa = Fichtennadelöl, Ori = Oreganoöl, Ret = Retterspitz® Äußerlich, Sab/Phe = Sabinenhydrat/Phenylacetylen, Ter = Terpinen

Weitere relevante Arten wie *Pityogenes chalcographus* (Abbildung 23) und *Thanasimus* spec. (Abbildung 24) zeigten tendenzielle, jedoch keine signifikanten Unterschiede hinsichtlich der Fangzahlen der verwendeten Lockstoffkombinationen.

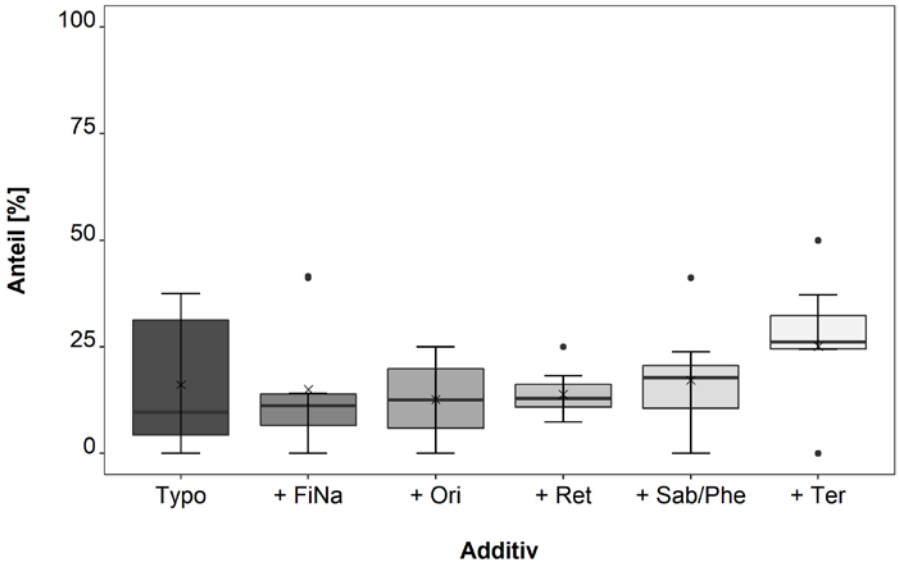

Abbildung 23: Fanganteile von *Pityogenes chalcographus* je Falleninsel und Leerungsdatum in Abhängigkeit von der Lockstoffzusammensetzung (Typosan® + Additiv) im Versuchszeitraum vom 03.05.-30.05.2022 in WitaTrap®-Segmenttrichterfallen mit 12 Trichtern, n = 10, Typo = Typosan®, FiNa = Fichtennadelöl, Ori = Oreganoöl, Ret = Retterspitz® Äußerlich, Sab/Phe = Sabinenhydrat/Phenylacetylen, Ter = Terpinen

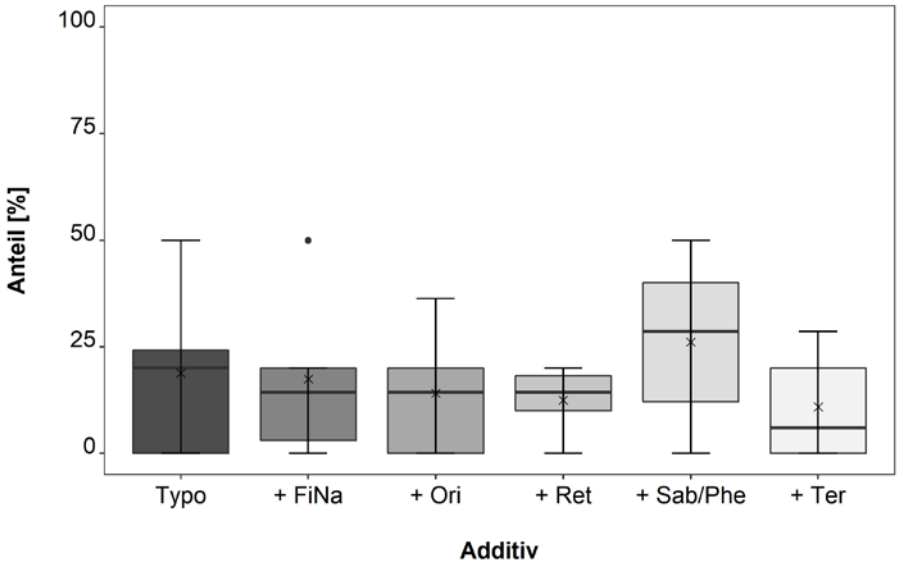

Abbildung 24: Fanganteile von *Thanasimus* spec. je Falleninsel und Leerungsdatum in Abhängigkeit von der Lockstoffzusammensetzung (Typosan® + Additiv) im Versuchszeitraum vom 03.05.-17.05.2022 in Wita-Trap®-Segmenttrichterfallen mit 12 Trichtern, n = 5, Typo = Typosan®, FiNa = Fichtennadelöl, Ori = Oreganoöl, Ret = Retterspitz® Äußerlich, Sab/Phe = Sabinenhydrat/Phenylacetylen, Ter = Terpinen

2.3.1.4. Fazit zur Zielart *Ips typographus*

In den insgesamt neun Versuchen zur Zielart *Ips typographus* wurden 1.929.674 Individuen gefangen und dabei deutliche Fortschritte hinsichtlich der Optimierung aktueller Fangverfahren erzielt. Eine Fangsteigerung konnte durch die Wahl des Fallentyps, der Lockstoffe und der Abgaberate erzielt werden. Die Steigerung der Fangzahlen erfolgte jedoch nicht in dem Maße wie es für einen effektiven Massenfang als notwendig erachtet wird. Die aktuelle Extremsituation in Beständen der Gemeinen Fichte kann somit nicht durch einen verstärkten Einsatz von Borkenkäferfallen abgemildert werden. Dennoch werden deutliche Verbesserungen im Vergleich zum derzeit angewandten Verfahren als Handlungsempfehlung formuliert.

Die Segmenttrichterfalle mit 12 Trichtern fängt am effektivsten die Zielart *Ips typographus*. Durch den Einsatz eines Siebs mit einer Maschenweite von 5 mm in den untersten Trichter kann ebenfalls ein effektiver Nützlingsschutz realisiert werden kann. Als Dispenser ist Typsan® zu empfehlen, wobei die Fangzahl durch die Verwendung mehrerer Lockstoffträger gesteigert werden kann. Eine Aggregation von Antagonisten kann durch hohe Abgaberaten von (-)-α-Pinen erreicht werden, wobei dies verständlicherweise nicht in Kombination mit Totfangfallen erfolgen sollte. Die Wirksamkeit der optimierten Verfahren kann in den zu erwartenden zukünftigen Waldbildern dazu beitragen, inselartige Fichtenvorkommen durch Massenfang vor einer Besiedlung mit *Ips typographus* zu schützen und das mittelfristig seltenere und daher mutmaßlich wertvollere Fichtenholz zu erhalten.

2.3.2. Zielart *Hylobius abietis*

2.3.2.1. Versuchsjahr 2020

2.3.2.1.1. Fallenvergleich Weißhaus

Für *Hylobius abietis* sind seit Beginn des 20. Jahrhunderts zahlreiche Fallenmodelle getestet und dokumentiert worden (Elgstrand 1921, Kauth und Madel 1955, Kissel 1911, Neumann und Müller 1991, Novák 1965, Tilles et al. 1986a). Dies geschah in der Regel nur für Zwecke eines Monitorings, den Vergleich verschiedener Lockstoffe oder zur Abschätzung von Populationsgrößen. Ziel im Projekt ReBek war es jedoch, eine Falle zu entwickeln, die den Ansprüchen einer Massenfangtauglichkeit gerecht wird. Diese umfassen sowohl eine hohe Effektivität im Fang von *Hylobius abietis* als auch ein hohes Maß an Selektivität bezüglich der Beifänge von Nichtzielorganismen wie Eidechsen, Mäusen oder Laufkäfern, deren Fang vermieden oder stark verringert werden soll. Gleichzeitig sollten die Fallen aber auch einfach nachbau- und handhabbar sein, um eine einfache Anwendung für Waldbesitzende und eine Produktion hoher Stückzahlen zu ermöglichen.

Im Rahmen des Freilandversuchs wurden zunächst zwei verschiedene Selektionsmechanismen getestet, die Beifänge ausschließen sollen, ohne den Fang von *Hylobius abietis* zu beeinträchtigen. Die erste Variante war die an der Professur für Waldschutz entwickelte Kragenfalle dar, die sich durch einen steilen Plastikkragen um die Falle herum auszeichnet. Während Laufkäfer nicht in der Lage sind, eine solche große Steigung zu überwinden, stellt diese für *Hylobius abietis* kein Hindernis dar (Kühlhorn 2017). Als zweite Variante wurde eine modifizierte Bodenfalle nach Nordlander (1987) getestet, die ihre Selektivität durch 10 mm breite Eintrittslöcher erhielt und damit breitere Organismen am Betreten des Fangkörpers hindert. In den Vergleich wurde außerdem eine standardmäßige nichtselektive Bodenfalle als Nullvariante einbezogen. Alle drei Fallentypen sind in Abbildung 25 dargestellt. Als Lockstoff in den Fallen wurden basierend auf Lalík et al. (2019) vier etwa 10 cm lange Kiefernzweigabschnitte in Kombination mit Ethanol in einer offenen Polypropylen-Dosen (4 cm Durchmesser 4 cm, 80 ml Fassungsvermögen, 50 ml Füllmenge) verwendet und bei allen Leerungen erneuert wurden.

Abbildung 25: Für *Hylobius abietis* getestete Fallentypen von links nach rechts: nichtselektive Bodenfalle, an der Professur für Waldschutz entwickelte Kragenfalle und modifizierte Nordlander-Falle

Die Ergebnisse identifizierten eindeutig die Nordlander-Falle als effektivste der drei Fallentypen (Abbildung 26). Sie fing signifikant mehr Individuen von *Hylobius abietis* als die beiden anderen Varianten. Zwischen der Kragenfalle und der nichtselektiven Bodenfalle zeigte sich dagegen nur ein geringer Unterschied. Gründe für den hohen Fangerfolg der Nordlander-Falle sind die stubbenähnliche Silhouette, die *Hylobius abietis* wahrnehmen kann sowie die dunklen Eintrittslöcher, die die Lichtbedingungen zur Hauptaktivitätsphase der Art widerspiegeln und ebenfalls Versteckmöglichkeiten bieten (Björklund et al. 2003, Björklund 2004, Fedderwitz et al. 2014, Prokopy und Owens 1983). Die höhere Frequentierung der Nordlander-Falle und die längere Aufenthaltsdauer im Falleninneren erhöhen die Wahrscheinlichkeit des Abrutschens der Individuen in die Fang- und Konservierungsflüssigkeit (Björklund 2004, 2008).

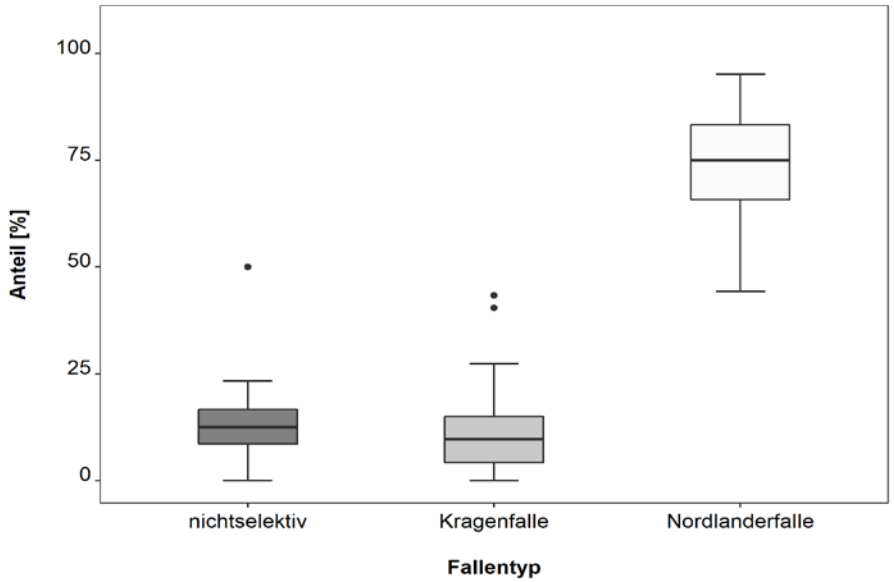

Abbildung 26: Fanganteile von *Hylobius abietis* je Falleninsel und Leerungsdatum in Abhängigkeit vom Fallentyp im Revier Weißhaus im Versuchszeitraum vom 14.03.-02.06.2020, n = 15, Beköderung der Fallen mit vier Kiefernzweigen und Ethanol

Neben den signifikant höchsten Fangzahlen von *Hylobius abietis* weist die Nordlander-Falle aber auch ein hohes Maß an Selektivität auf (Abbildung 27). Im Vergleich zur nicht-selektiven Bodenfalle führte sowohl der Selektionsmechanismus der Nordlander- als auch der Kragenfalle zu signifikant geringeren Beifängen von Laufkäfern, die wichtige Nützlinge im Ökosystem Wald sind. Diese Selektivität ist allerdings auf größere Arten begrenzt, wie sie im Wald vorkommen. Außerdem wurden zuverlässig die Fänge von Eidechsen und Mäusen ausgeschlossen.

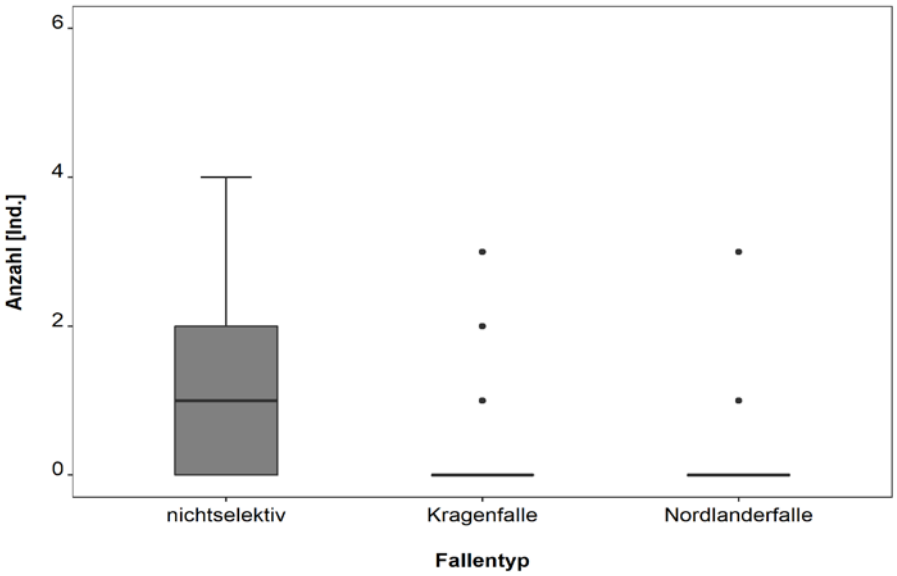

Abbildung 27: Fangzahlen der Familie Carabidae im Revier Weißhaus je Falleninsel und Leerungsdatum in Abhängigkeit vom Fallentyp im Versuchszeitraum vom 14.05.-22.07.2020, n = 30, Beköderung der Fallen mit vier Kiefernzweigen und Ethanol

Da die Nordlander-Falle als einziger getesteter Fallentyp beide Zieleigenschaften – hohe Fangzahlen von *Hylobius abietis* und niedrige Fangzahlen von Nichtzielorganismen – aufweist, wurde sie als Basismodell für die in den folgenden Projektjahren durchgeführten Lockstoff- und Massenfangversuche verwendet.

Neben den Fangzahlen war der zweite zu bewertende Parameter der drei Fallentypen deren praktische Handhabbarkeit. Die Fallen sollten einfach herstellbar und robust in der Anwendung sein, um Eingang in die forstliche Praxis zu finden. Daher wurden im Rahmen des Fallenvergleichsversuchs auch Zeitmessungen bei Fallenaufbau und -leerung durchgeführt. Die Ergebnisse sind eine weitere Bestätigung für die sehr gute Eignung der modifizierten Nordlander-Falle, da diese signifikant schneller aufgebaut und geleert werden kann als die beiden anderen Fallentypen (Abbildung 28).

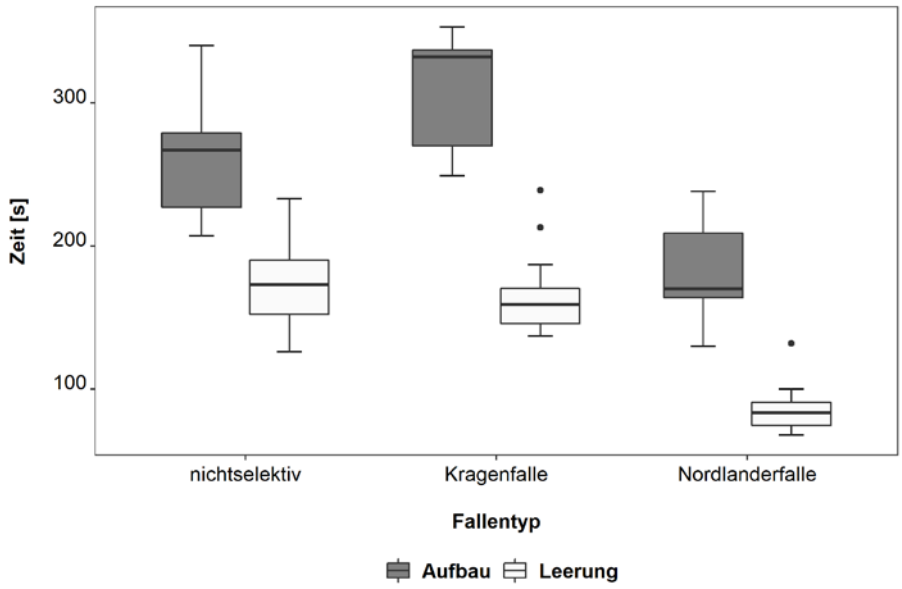

Abbildung 28: Zeitbedarf für Aufbau und Leerung der drei getesteten Fallentypen für *Hylobius abietis*, $n_{Aufbau} = 5$, $n_{Leerung} = 9$ (Zusammenfassung der Daten aus den Revieren Weißhaus und Naundorf, Beköderung der Fallen mit vier Kiefernzweigen und Ethanol)

2.3.2.1.2. Fallenvergleich Naundorf

Da der im Revier Weißhaus aufgebaute Versuch aufgrund des im Zuge der Covid-19-Pandemie verhängten Dienstreiseverbots der TU Dresden kurz nach dem Start am 13.03.2020 temporär abgebrochen werden musste, wurde ein gleichartiger Versuch im Revier Naundorf im Tharandter Wald aufgebaut, welcher im Rahmen von Dienstgängen weiterhin erreichbar war. Analog zu den Ergebnissen des Versuchs in Weißhaus, der nach Aufhebung des Dienstreiseverbots fortgesetzt werden konnte, weisen auch die Ergebnisse des Versuchs in Naundorf die modifizierte Nordlander-Falle als am besten fängig für *Hylobius abietis* aus (Abbildung 29).

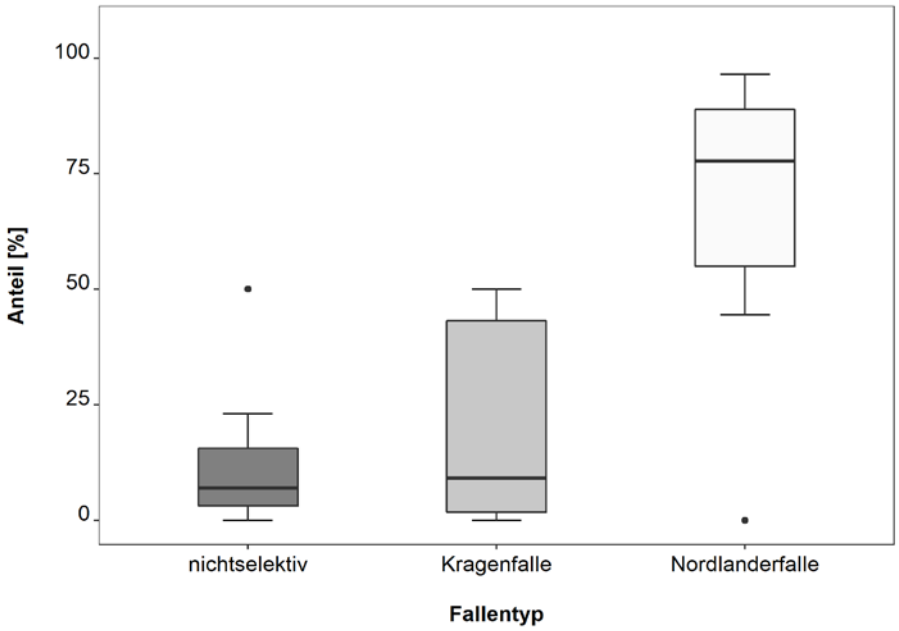

Abbildung 29: Fanganteile von *Hylobius abietis* je Falleninsel und Leerungsdatum in Abhängigkeit vom Fallentyp im Revier Naundorf im Versuchszeitraum vom 14.03.-02.06.2020, n = 15, Beköderung der Fallen mit vier Kiefernzweigen und Ethanol

2.3.2.1.3. Fraßversuch zur Prägung mit heimischen Baumarten

Im Rahmen einer studentischen Belegarbeit wurden verschiedene, die Fraßpräferenzen von *Hylobius abietis* betreffende Aspekte untersucht. Dabei stand die Frage im Vordergrund, ob es Unterschiede in den Präferenzen zwischen Individuen einer Population aus dem kieferngeprägten südlichen Brandenburg und Individuen aus dem fichtengeprägten Tharandter Wald gibt. Hintergrund dieses Versuches ist die Theorie der olfaktorischen Dialekte, die von Seybold und Fettig (2020) für Borken- und Ambrosiakäfer beschrieben wurde. Im Laborversuch wurden dazu Jeweils ein Weibchen und ein Männchen von *Hylobius abietis* unter kontrollierten Bedingungen für die Dauer von 14 Tagen in einer Platikbox gehalten, in der sich Zweigabschnitte von sechs verschiedenen Nadel- und Laubbaumarten (Douglasie/*Pseudotsuga menziesii*, Europäische Lärche/*Larix decidua*, Gemeine Fichte, Gemeine Kiefer, Rotbuche, Stieleiche/*Quercus robur*) befanden. Ein geschlechtsspezifischer Einfluss auf die Ergebnisse war damit ausgeschlossen. Dieser Versuchsaufbau wurde zehnfach wiederholt und es fanden zwei Versuchsreihen à 14 Tagen statt (16.-30.06.2020, 12.-26.08.2020). Für die Auswertung wurde mittels eines Rasters der Fraß an den Tagen 1, 3, 7 und 14 nach Einsetzen der Individuen in die Boxen gemessen.

Es zeigte sich dabei eine deutliche Präferenz von *Hylobius abietis* für Gemeine Kiefer (Abbildung 30). Darauf folgte mit Abstand Douglasie, während Gemeine Fichte und Europäische Lärche nur geringfügig und die beiden Laubbaumarten Stieleiche und Rotbuche praktisch nicht befressen wurden. Dabei konnte kein signifikanter Unterschied in den Fraßpräferenzen der beiden Herkünfte von *Hylobius abietis* festgestellt werden.

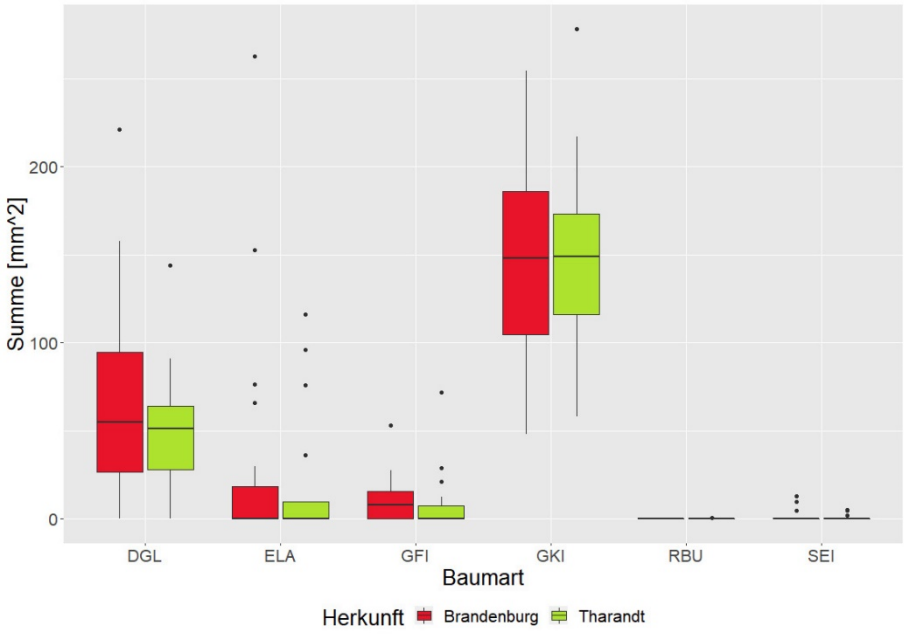

Abbildung 30: Gesamtfraßfläche von *Hylobius abietis* im 14-tägigen Versuchszeitraum in Abhängigkeit von der Baumart, n = 20, DGL = Douglasie, ELA = Europäische Lärche, GFI = Gemeine Fichte, GKI = Gemeine Kiefer, RBU = Rotbuche, SEI = Stieleiche

Es kann geschlussfolgert werden, dass die Komposition eines Lockstoffs zum Massenfang von *Hylobius abietis* überregional angewandt werden kann und keiner lokalen Spezifikation bedarf. Die Fraßspuren an Rotbuche und Stieleiche des Weiteren deuten darauf hin, dass nicht grundsätzlich von einer Nichtgefährdung von Verjüngungen mit Laubbaumarten auf Flächen mit einem Vorkommen von *Hylobius abietis* ausgegangen werden kann.

2.3.2.2. Versuchsjahr 2021

2.3.2.2.1. Lockstoffversuch Schellerhau

Nachdem im Versuchsjahr 2020 mit der modifizierten Nordlander-Falle ein zuverlässig und selektiv fangender Fallentyp identifiziert wurde, stand die Entwicklung massenfangtauglicher Lockstoffe für *Hylobius abietis* im Vordergrund. Einer der beiden Freilandversuche dazu fand im Revier Schellerhau im Forstbezirk Bärenfels im Osterzgebirge statt.

Da *Hylobius abietis* im Gegensatz zu *Ips typographus* kein Aggregationspheromon produziert, sondern lediglich eine die Fortpflanzung stimulierende Substanz bekannt ist, die nur auf kurzen Distanzen wirkt (Tilles et al. 1988), sollten Wirtsbaumvolatile als Attraktanzien getestet werden. Als Standardvariante wurde die Kombination aus Ethanol (CAS 64-17-5) und (-)-α-Pinen (CAS 7785-26-4) gewählt, da deren Attraktivität bereits aus der Literatur bekannt ist (Lindelöw et al. 1993, Nordenhem und Eidmann 1991, Nordlander 1990, Olenici et al. 2016, Tilles et al. 1986b). Ethanol ist ein dominantes Volatil geschwächter Bäume,

während α-Pinen die Hauptkomponente der VOC-Emissionen (volatile organic compounds) von Nadelbäumen darstellt (Kivimäenpää et al. 2012, Strömvall und Petersson 1991, Tilles et al. 1986b). Damit simulieren diese beiden Semiochemikalien das Vorhandensein von Brutmaterial in Form frischer Nadelholzstubben. Die Kombination aus Ethanol und α-Pinen bildet allerdings nur einen Teil der Substanzen ab, die bei *Hylobius abietis* eine Reaktion der Rezeptorneuronen hervorrufen (Wibe et al. 1997, Wibe et al. 1998, Wibe und Mustaparta 1996). Um weitere relevante Substanzen zu bestimmen, wurden Proben eines Kiefernstubbens aus dem Versuchsgebiet im Revier Weißhaus mittels Gaschromatographie und Massenspektroskopie ausgewertet. Bedeutende Semiochemikalien des registrierten Spektrums waren Δ-3-Caren (CAS 13466-78-9) und Ocimen (CAS 13877-91-3), die im Freilandversuch der beschriebenen Standardkombination in Langlock®-Dispensern hinzugefügt wurden, mit dem Ziel, die Attraktivität für *Hylobius abietis* zu steigern. Des Weiteren wurde Hylowit®, ein kommerziell erhältlicher Dispenser, getestet.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Lockwirkung der Standardkombination durch die zugesetzten Monoterpene nicht gesteigert werden konnten (Abbildung 31). Der Zusatz von Ocimen führte sogar zu signifikant geringeren Fangergebnissen, ist damit ungeeignet für einen Massenfanglockstoff, könnte aber ggf. als Repellent eingesetzt werden. Bei der Zugabe von Δ-3-Caren zur Standardkombination zeigten sich leichte positive Tendenzen, so dass die Erprobung der Substanz mit einer höheren Abgaberate als den hier gewählten von 0,017 g/Tag wiederholt werden sollte. Auffällig sind außerdem die geringen Fangzahlen von Hylowit®. Zwar konnte damit in der ersten Fangperiode die zweitgrößte Anzahl an *Hylobius abietis* gefangen werden, jedoch ließ die Attraktivität im Folgenden aufgrund der nachweislich stark absinkenden Abgaberate deutlich nach. Dieser kommerziell erhältliche Dispenser erwies sich demnach als ungeeignet für die Zielstellung eines Massenfangs. Die geschlechtsspezifische Auswertung ergab keine differenzierte Attraktivität der Lockstoffe.

Die Fangzahlen der Nichtzielorganismen fielen mit insgesamt 101 Laufkäfern und einer einzigen Eidechse gering aus, wobei keine signifikanten Unterschiede in der Wirkung der Semiochemikalien beobachtet werden konnten (Abbildung 32). Auffällig war, dass mit 38 % die meisten Laufkäfer in den Hylowit®-Fallen gefangen wurden, so dass vermutet werden könnte, dass Lockstoffe mit hohen Abgaberaten repellent auf Laufkäfer wirken. Durch die Wahl hoher Abgaberaten von Lockstoffen könnte so die ökologische Verträglichkeit der modifizierten Nordlander-Fallen noch weiter erhöht werden.

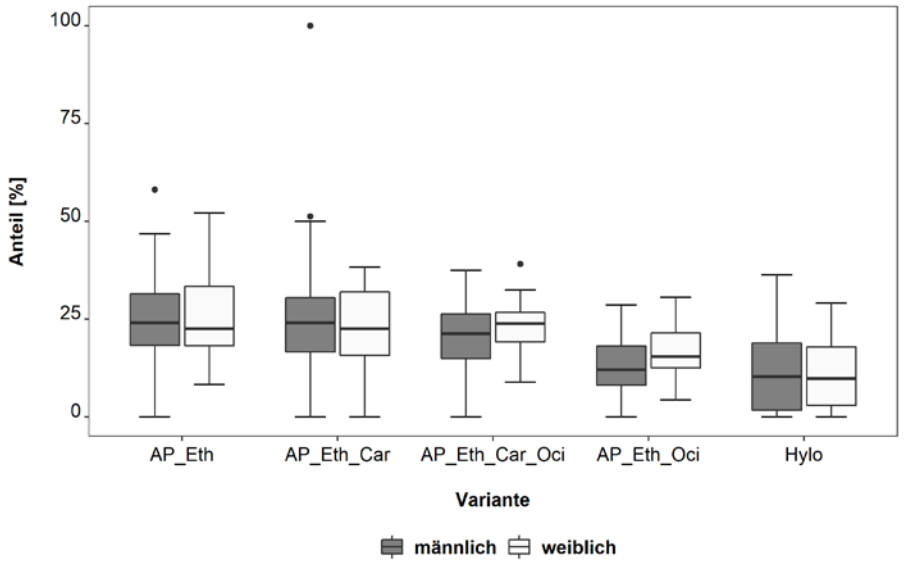

Abbildung 31: Fanganteile von *Hylobius abietis* je Falleninsel und Leerungsdatum in Abhängigkeit vom Lockstoff im Versuchszeitraum vom 02.06.-27.07.2021 in modifizierten Nordlander-Fallen im Versuchsgebiet Schellerhau, n = 20, AP = (-)-α-Pinen, Eth = Ethanol, Car = Δ-3-Caren, Oci = Ocimene, Hylo = Hylowit®

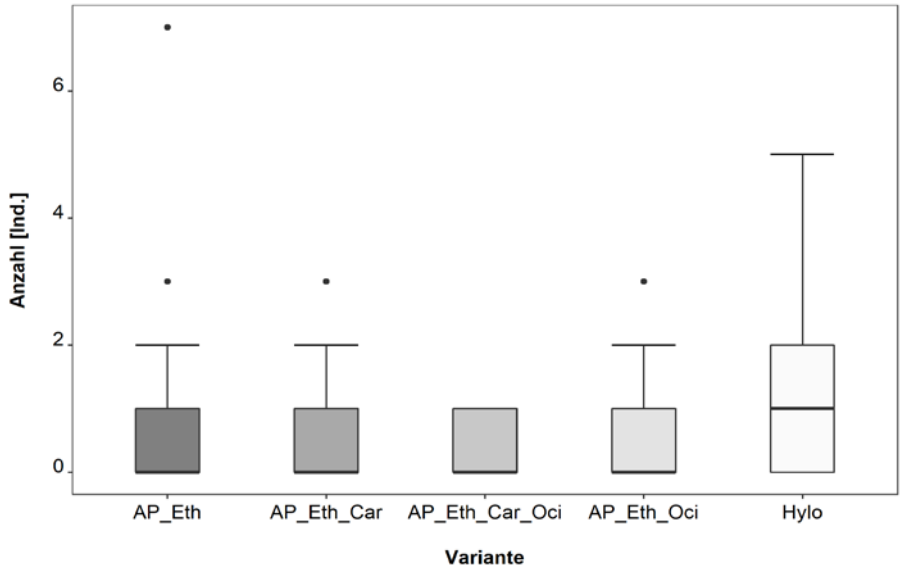

Abbildung 32: Fangzahlen der Laufkäfer je Falleninsel und Leerungsdatum in Abhängigkeit vom Lockstoff im Versuchszeitraum vom 02.06.-24.08.2021 in modifizierten Nordlander-Fallen im Versuchsgebiet Schellerhau, n = 30, AP = (-)-α-Pinen, Eth = Ethanol, Car = Δ-3-Caren, Oci = Ocimen, Hylo = Hylowit®

Laut Vorhabensbeschreibung sollte mit der Zielstellung des Teilprojekts auch eine Entwicklung spezieller Werkzeuge für die Installation der Fallen erfolgen. Diese Vorgabe wurde mit der Konstruktion eines halbrunden Hohlspatens mit einem Innendurchmesser von 200 mm umgesetzt, welcher im Rahmen der Lockstoffversuche 2021 erstmals im praktischen Einsatz erprobt wurde und insbesondere auf sandigen Böden und Böden mit einem geringen bis mittleren Skelettanteil sehr gut funktioniert. Bei einem überdurchschnittlich hohen Skelettanteil kann ggf. eine Ergänzung durch einen normalen Spaten nötig sein.

2.3.2.2.2. Lockstoffversuch Weißhaus

In Analogie zum Lockstoffversuch im Revier Schellerhau wurde auch im Revier Weißhaus in Brandenburg ein solcher Versuch durchgeführt. Dabei kamen basierend auf dem Vorschlag unseres Projektpartners an der UGÖ die Monoterpene Camphen (CAS 79-92-5) und Terpinolen (CAS 586-62-9) zum Einsatz, welche wieder mit der bewährten Standardvariante Ethanol und (-)-α-Pinen verglichen wurden.

Erneut konnte dabei jedoch keine Steigerung der Attraktivität der Standardkombination erzielt werden (Abbildung 33). Durch den Einsatz einer Nullvariante ohne Lockstoffbeköderung konnte außerdem nachgewiesen werden, dass die modifizierten Nordlander-Fallen selbst keine attrahierende Wirkung entfalten.

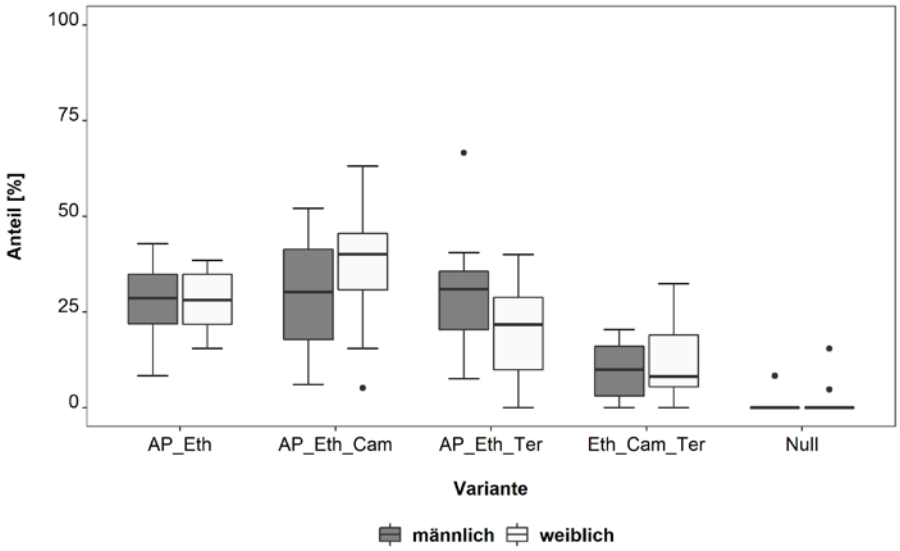

Abbildung 33: Fanganteile von *Hylobius abietis* je Falleninsel und Leerungsdatum in Abhängigkeit vom Lockstoff im Versuchszeitraum vom 09.-28.07.2021 in modifizierten Nordlander-Fallen im Versuchsgebiet Weißhaus, n = 10, AP = (-)-α-Pinen, Cam = Camphen, Eth = Ethanol, Ter = Terpinolen, Null = keine Lockstoffe

Die Zahl der gefangenen Laufkäfer fiel im Revier Weißhaus mit nur 24 Individuen äußerst gering aus, wobei keine gerichtete Reaktion auf die eingesetzten Semiochemikalien beobachtet werden konnte. Allerdings bestätigt sich die Tendenz des Lockstoffversuchs in Schellerhau, dass eine Konzentration der Laufkäferfänge in jenen Fallen stattfindet, die nur sehr geringe Abgaberaten bzw. wie hier keine Lockstoffe beinhalten (Abbildung 35).

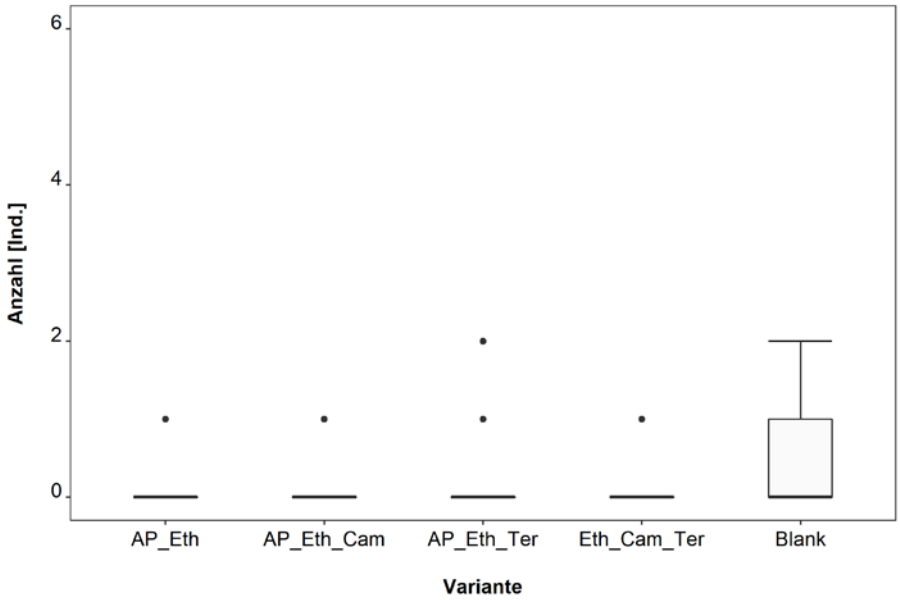

Abbildung 34: Fangzahlen der Laufkäfer je Falleninsel und Leerungsdatum in Abhängigkeit vom Lockstoff im Versuchszeitraum vom 09.07.-18.08.2021 in modifizierten Nordlander-Fallen im Versuchsgebiet Weißhaus, n = 25, AP = (-)-α-Pinen, Cam = Camphen, Eth = Ethanol, Ter = Terpinolen, Null = keine Lockstoffe

2.3.2.2.3. Fraßversuch mit alternativen Baumarten

Im Rahmen einer studentischen Belegarbeit wurde ein Fraßversuch unter kontrollierten Bedingungen mit verschiedenen alternativen Baumarten durchgeführt. Diese sind definiert als heimische und nichtheimische Baumarten, die in Zeiten des Klimawandels und sich ändernder Umweltbedingungen aufgrund ihrer speziellen Eigenschaften, wie z. B. einer hohen Toleranz gegenüber Trockenheit und hohen Temperaturen, von zunehmendem Interesse für die Waldverjüngung sind. Im Versuch kamen dabei die nichtheimischen Nadel- und Laubbaumarten Küstentanne (*Abies grandis*), Libanonzeder (*Cedrus libani*), Baumhasel (*Corylus colurna*), Esskastanie (*Castanea sativa*), Roteiche (*Quercus rubra*) und Schwarznuss (*Juglans nigra*) zum Einsatz. Auch die heimischen Baumarten Gemeine Fichte, Gemeine Kiefer, Weißtanne, Rotbuche und Stieleiche wurden in den Versuch integriert. Mit diesen Baumarten wurden vier verschiedene Szenarien gestaltet, wobei frisch geschnittene Zweigabschnitte in Plastikboxen jeweils einem weiblichen und einem männlichen Individuum von *Hylobius abietis* zum Fraß angeboten wurden.

Die Ergebnisse der vier Szenarien sind in Abbildung 36 dargestellt. In Szenario 1, der Nachstellung einer reinen Laubbaumverjüngung, wurden die Baumarten Roteiche, Baumhasel, Schwarznuss und Stieleiche präferiert. Die Fraßmengen entsprechen dabei denen von Nadelbaumarten in anderen Szenarien. Dies macht deutlich, dass auch in Laubbaumverjüngungen, die eigentlich keine bevorzugte Nahrung von *Hylobius abietis* darstellen, mit Fraßschäden zu rechnen ist.

Szenario 2 entsprach einer gemischten Verjüngung, in der die Laubbaumarten Roteiche, Schwarznuss und Esskastanie mit den Nadelbaumarten Küstentanne, Libanonzeder und Weißtanne kombiniert wurden, welche ebenfalls eine große Bedeutung für den Waldumbau besitzen bzw. haben könnten. Der Fraß von *Hylobius abietis* konzentriert sich in diesem Szenario deutlich auf die drei Nadelbaumarten, wobei die Küstentanne bevorzugt wurde und die Weißtanne kaum Fraßschäden aufwies.

In Szenario 3 wurde die Laubbaumverjüngung durch die Annahme einer Naturverjüngung aus Gemeiner Fichte und Gemeiner Kiefer ergänzt. Dabei handelt es sich um ein typisches Waldumbauszenario bei dem Nadelwaldbestände durch künstliche Verjüngung in Laubwaldbestände umgewandelt werden, während die bestehende Naturverjüngung des Vorbestandes auf der Fläche belassen wird. Die Ergebnisse zeigen in Bezug zu Szenario 1 und analog zu Szenario 2, dass der Fraß an den Laubbaumarten beinahe vollständig durch das Vorhandensein von Nadelbaumverjüngung und dem Fraß an diesen kompensiert wird. Für die forstliche Praxis bedeutet dies, dass das Belassen von Nadelbaumnaturverjüngung auf Waldumbauflächen aufgrund der Fraßpräferenzen von *Hylobius abietis* dem Schutz der wertvollen gepflanzten Laubbaumarten dienen kann.

Eine gemischte Verjüngung mit simulierter Naturverjüngung aus Gemeiner Kiefer und Gemeiner Fichte spiegelt Szenario 4 wider. Wie in Szenario 3 waren dabei die höchsten Fraßmengen an Gemeiner Kiefer festzustellen. Außerdem wurden sowohl Libanonzeder als auch Küstentanne stärker befressen als Gemeine Fichte, während die Laubbaumarten wiederum kaum angenommen wurden. Hiermit wird deutlich, dass auch nichtheimische Baumarten durch *Hylobius abietis* gefährdet sein können und bei der Anpflanzung dieser ebenfalls mit Schäden zu rechnen ist.

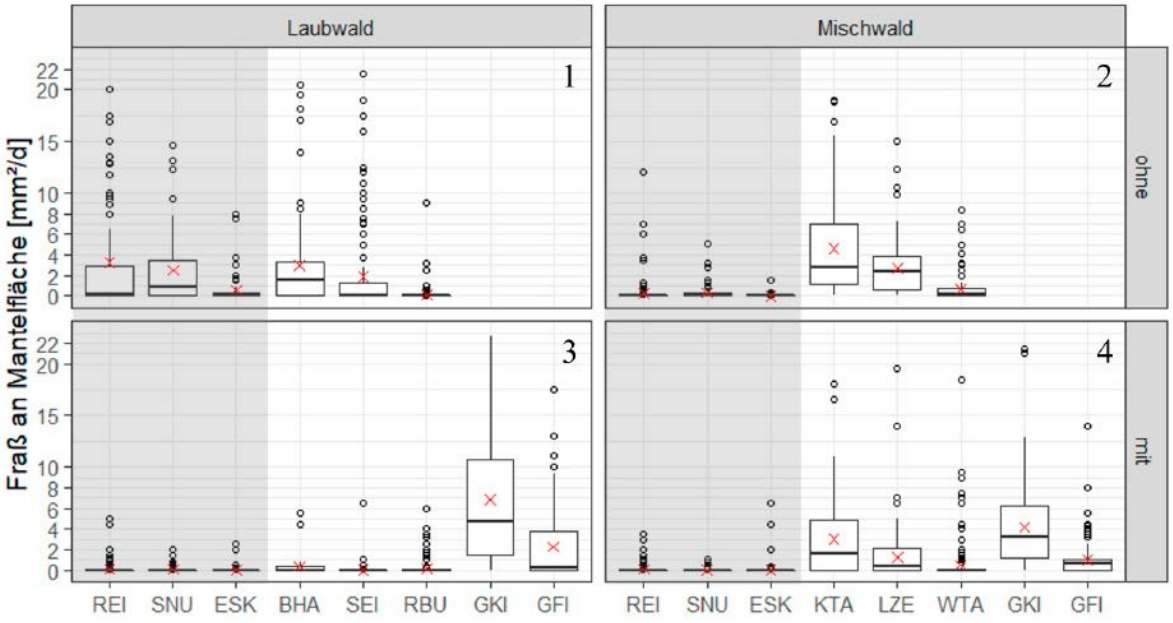

Abbildung 35: Fraßmengen von *Hylobius abietis* in mm² pro Tag an der Zweigmantelfläche in Abhängigkeit von der Baumart und der Baumartenzusammensetzung, n = 280, Szenario 1 = Laubbaumverjüngung ohne Nadelbaum-Naturverjüngung (NV), 2 = gemischte Verjüngung ohne NV, 3 = künstliche Laubbaumverjüngung mit NV, 4 = künstliche gemischte Verjüngung mit NV; REI = Roteiche, SNU = Schwarznuss, ESK = Esskastanie, BHA = Baumhasel, SEI = Stieleiche, RBU = Rotbuche, KTA = Küstentanne, LZE = Libanon-Zeder, WTA = Weißtanne, GKI = Gemeine Kiefer, GFI = Gemeine Fichte; grau hinterlegt = in allen Szenarien vorhanden

2.3.2.2.4. Massenfangversuch Pfeffenhausen

Aufgrund der anhaltenden Berichte von starken Ausfällen künstlicher Nadelbaumverjüngung durch den Fraß von *Hylobius abietis* aus der forstlichen Praxis wurde bereits im zweiten Projektjahr der praktische Versuch eines Massenfangs im Landkreis Pfeffenhausen in Bayern unternommen. Dafür wurden fünf Freiflächen ausgewählt, die im Vorjahr durch Sanitärhiebe nach Befall der ehemaligen Fichtenbestände mit *Ips typographus* entstanden. Dementsprechend stellen diese ein typisches Besiedlungshabitat für *Hylobius abietis* dar und es ist mit hohen Populationsdichten zu rechnen. Alle Flächen waren bereits mit Weißtanne und Rotbuche bepflanzt worden, wobei erstere besonders gefährdet für den Fraß durch *Hylobius abietis* ist. Die Versuchsflächen wurden jeweils in zwei Teilflächen unterteilt, wobei eine davon mit vier quadratisch angeordneten und mit Ethanol und (-)-α-Pinen beköderten modifizierten Nordlander-Fallen bestückt wurde. Ziel des Versuches war es, durch den Fang von *Hylobius abietis* in den Fallen einen Schutzeffekt auf die umliegende Verjüngung auszuüben. Am Ende des Versuchszeitraums, am 07. September 2021, wurden die Fraßschäden durch *Hylobius abietis* an der Verjüngung vermessen. Hierfür wurden Quadranten von 8 m Kantenlänge um jede der Fallen gelegt sowie ebenso vier Aufnahmequadranten auf der 25 m entfernten ungeschützten Teilfläche definiert. Innerhalb dieser Aufnahmequadranten wurde der Fraß an allen gepflanzten Verjüngungspflanzen mit

Hilfe eines Millimeterrasters gemessen (Abbildung 36). Zusätzlich wurden die Fangdaten der Fallen ausgewertet, wobei insgesamt 3.857 Individuen von *Hylobius abietis* sowie 92 Laufkäfer gefangen wurden. Die durchschnittliche Fängigkeit der modifizierten Nordlander-Fallen für *Hylobius abietis* betrug 192 Individuen/Falle/Saison. Positiv hervorzuheben sind die geringen ökologischen Nebeneffekte auf die Gruppe der Laufkäfer, da lediglich 4,6 Individuen/Falle/Saison gefangen wurden.

Abbildung 36: Aufnahmequadrant mit modifizierter Nordlander-Falle im Mittelpunkt für die Einschätzung von Fraßschäden durch *Hylobius abietis*

Im Ergebnis konnten Fraßschäden an beiden Verjüngungsbaumarten festgestellt werden, wobei entgegen der Erwartungen Rotbuche stärker befressen wurde als Weißtanne. Allerdings fiel der Fraß insgesamt nur sehr gering aus und führte bei keiner der aufgenommenen Pflanzen zum Absterben. So ergeben sich auch keine signifikanten Unterschiede im Auftreten von Fraßschäden zwischen den mit Fallen geschützten Teilflächen und Kontrollflächen ohne Fallen (Abbildung 37 und Abbildung 38). Ungeklärt ist allerdings, ob der insgesamt geringe Fraß durch die hohe Fangwirkung der Fallen bedingt war und eine lokale Abschöpfung der Population erreicht werden konnte. Da sich Fallen- und Kontrollplot auf derselben Freifläche befanden, ist eine Beeinflussung durchaus möglich. Die hohe Mobilität von *Hylobius abietis* ist bekannt (Müller 1993, Nordlander et al. 2010) und könnte dazu geführt haben, dass die Fallen eine Fangwirkung auf die gesamte Freifläche ausübten. Weiterhin ist es aber auch möglich, dass eine Konzentration der Käfer in Fallennähe stattfindet und es damit wie tendenziell bei Rotbuche beobachtet zu stärkeren Fraßschäden in Fallennähe kommt.

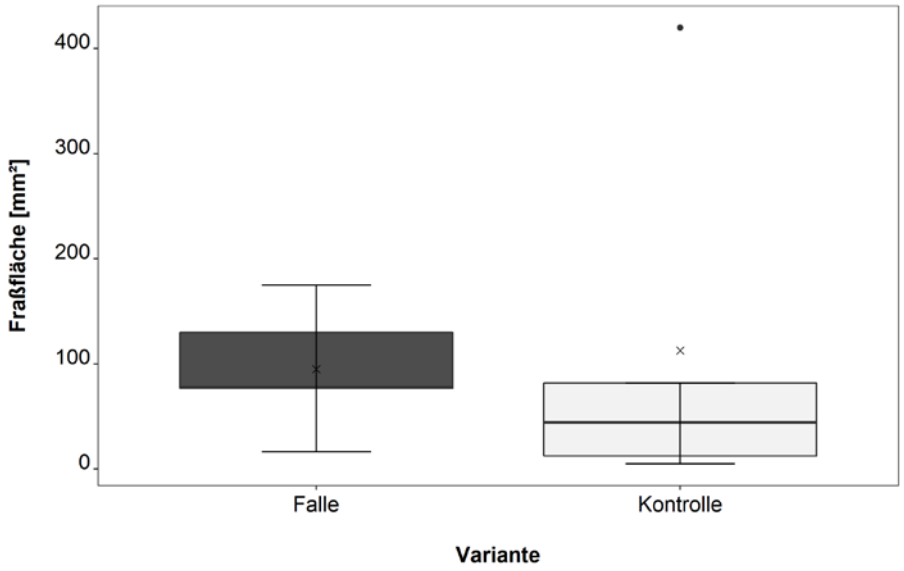

Abbildung 37: Ergebnisse der Fraßflächenaufnahme an künstlicher Rotbuchenverjüngung im Rahmen des Massenfangversuchs im Versuchsgebiet Pfeffenhausen, n = 5

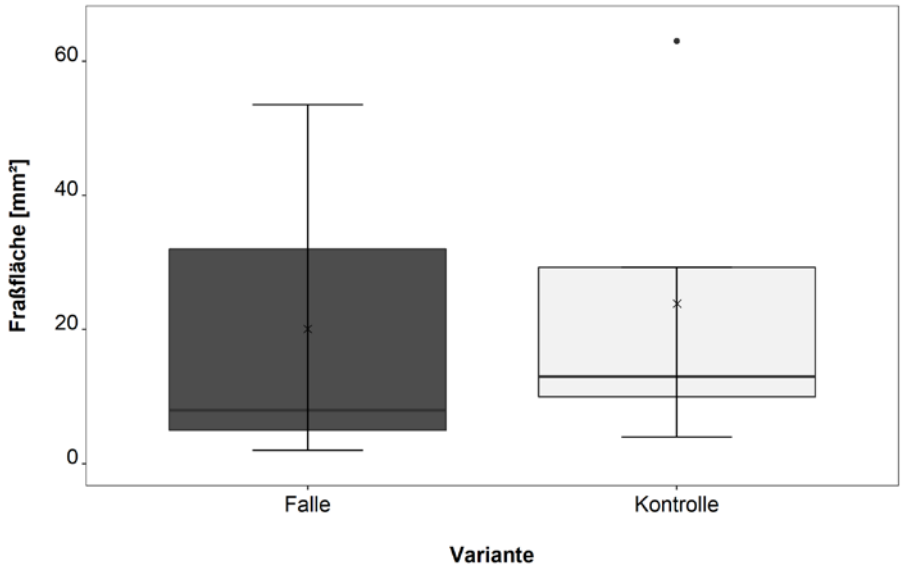

Abbildung 38: Ergebnisse der Fraßflächenaufnahme an künstlicher Weißtannenverjüngung im Rahmen des Massenfangversuchs im Versuchsgebiet Pfeffenhausen, n = 5

2.3.2.2.5. Fangzahlenentwicklung 2021

Im Versuchsjahr 2021 wurden insgesamt drei verschiedene Freilandversuche mit modifizierten Nordlander-Fallen durchgeführt. Dabei wurden im Massenfangversuch Pfeffenhausen insgesamt 3.857 Individuen, im Lockstoffversuch Weißhaus 1.324 Individuen und im Lockstoffversuch Schellerhau insgesamt 4.299 Individuen von *Hylobius abietis* gefangen. Auffällig war dabei, dass sich an allen drei Standorten ein vergleichbarer zeitlicher Verlauf der Fangzahlen zeigte und der Großteil der Fänge bereits in den ersten sechs Wochen der jeweiligen Versuche erfasst wurde. In Pfeffenhausen konnten so 71,7 % des Gesamtfangs getätigt werden (Abbildung 39), während in Schellerhau 87,3 % des Gesamtfangs in den ersten vier Wochen (Abbildung 40) und in Weißhaus 81,9 % des Gesamtfangs sogar in den ersten zwei Wochen des Versuchs festgestellt wurden (Abbildung 41). Die Konsistenz dieser Beobachtungen über die drei sehr unterschiedlichen Versuchsgebiete in Bayern, Brandenburg und Sachsen hinweg legt die Vermutung nahe, dass durch den Einsatz der Fallen eine Abschöpfung der lokalen Population von *Hylobius abietis* gelungen sein könnte. Der lange Versuchszeitraum in Pfeffenhausen zeigte zudem, dass es zu keinem deutlichen Wiederanstieg der Fangzahlen in der Vegetationsperiode kam. Diese vielversprechenden Ergebnisse wurden in einem Fachjournal veröffentlicht und lieferten die Grundlage für die Versuchsgestaltung des Folgejahrs 2022 (Heber et al. 2023).

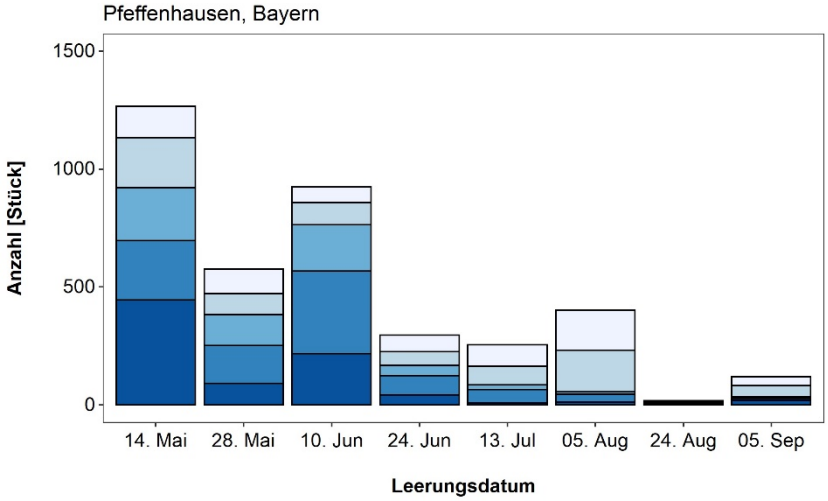

Abbildung 39: Zeitlicher Verlauf der Fangzahlen von *Hylobius abietis* im Massenfangversuch Pfeffenhausen vom 29.04.-05.09.2021, farbliche Abstufungen = Falleninseln 1-5

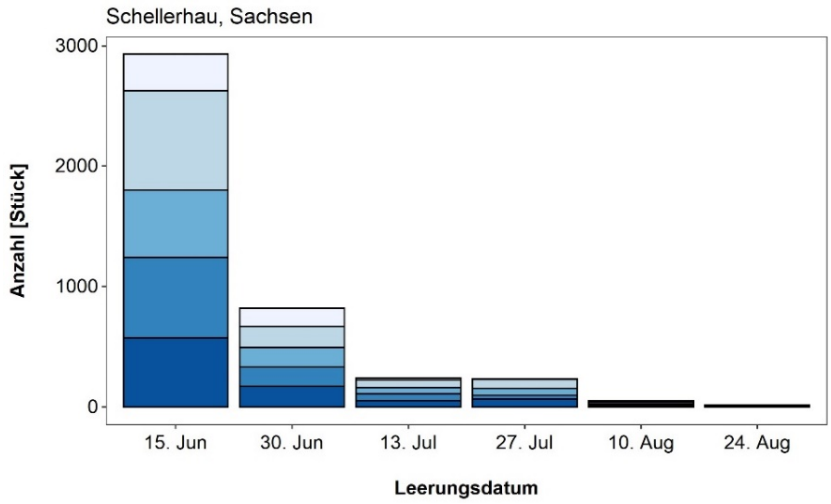

Abbildung 40: Zeitlicher Verlauf der Fangzahlen von *Hylobius abietis* im Lockstoffversuch Schellerhau vom 02.06.-24.08.2021, farbliche Abstufungen = Falleninseln 1-5

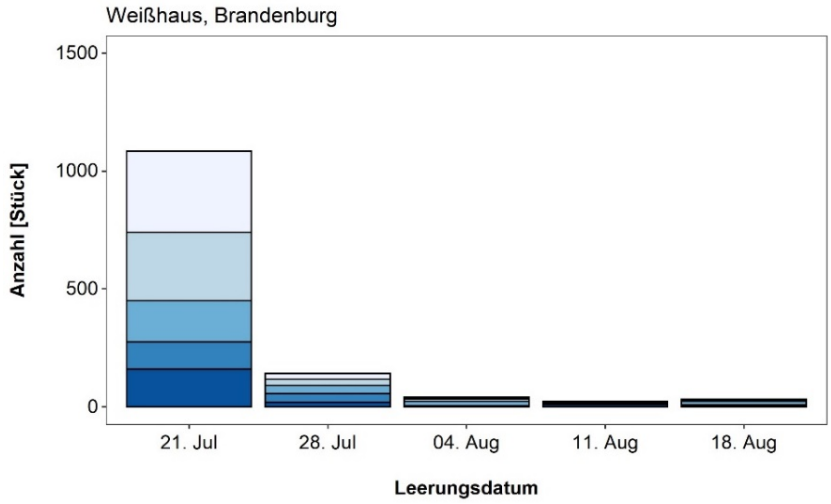

Abbildung 41: Zeitlicher Verlauf der Fangzahlen von *Hylobius abietis* im Lockstoffversuch Weißhaus vom 09.07.2021 bis 18.08.2021, farbliche Abstufungen = Falleninseln 1-5

2.3.2.3. Versuchsjahr 2022

2.3.2.3.1. Weiterentwicklung des Fangbehälters

Entsprechend der Aufgabenbeschreibung wurde an einer konstruktiven Weiterentwicklung der Fallen gearbeitet, wobei zunächst der Fangbehälter im Vordergrund stand. Dieser wurde bisher nur provisorisch aus händisch zugeschnittenen und mit Silikon verschlossenen Pflanztöpfen hergestellt, was insbesondere beim Herausnehmen der befüllten Fangbehälter aus der Falle im Zuge von Leerungen zu Problemen führte. Um eine praktikablere Variante zu konstruieren, wurde gemeinsam mit der Professur für Virtuelle Produktentwicklung der Technischen Universität Dresden ein 3D-Modell eines geeigneten

Fangbehälters erstellt, dieses als 3D-Druck umgesetzt und in Kleinserie produziert (Abbildung 42). Der weiterentwickelte Fangbehälter verfügt nun über einen Griff, um ihn einfach aus der Falle entnehmen zu können sowie über einen Lockstoffträger, der das mühsame Befestigen der Chemikalien am Fallendeckel ersetzt. Bei der Konstruktion wurde auch auf die Realisierbarkeit einer zukünftigen Serienproduktion geachtet.

Abbildung 42: Entwicklungsschritte des verbesserten Fangbehälters vom 3D-Modell (links) über den Prototyp als 3D-Druck (mittig) bis zur Anwendung einer Kleinserie im Freiland (rechts)

2.3.2.3.2. Entwicklung einer Auflagefalle

Neben der Entwicklung einer massenfangfähigen Bodenfalle gehörte auch die Konstruktion einer Auflagefalle, die nicht in den Boden eingebracht werden muss, zu den Zielen des Projekts. Diese wurde ebenfalls in Zusammenarbeit mit der Professur für Virtuelle Produktentwicklung der Technischen Universität Dresden zunächst in Form eines 3D-Modells umgesetzt (Abbildung 43, links). Dabei blieb die Grundkonstruktion der modifizierten Nordlander-Falle erhalten und wurde im Durchmesser auf 315 mm erweitert. Im Falleninneren befindet sich eine Rampe, deren Überwindung für *Hylobius abietis* kein Problem darstellt und über die die Individuen zur Lockstoffquelle im Zentrum der Falle gelangen. Dort sitzt der für die Bodenfalle entwickelte Fangbehälter, der gesättigte Benzoesäure mit einem Tropfen Spülmittel als Fang- und Konservierungsflüssigkeit enthält. Die Falle muss so lediglich mit Ankern auf dem Waldboden befestigt werden und ein Eingraben in den Boden entfällt (Abbildung 43, rechts).

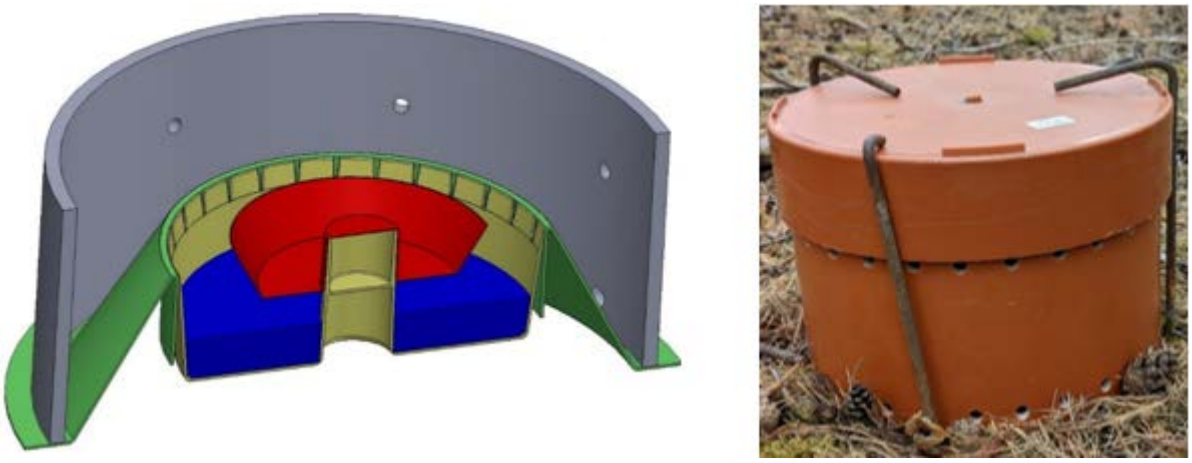

Abbildung 43: Entwicklungsschritte der neuartigen Auflagefalle, links: 3D-Modell der Auflagefalle, rechts: mit Ankern befestigte Auflagefalle im Freiland.

2.3.2.3.3. Lockstoffversuch Weißhaus

In Zusammenarbeit mit dem Projektpartner an der UGÖ wurde auch im dritten Projektjahr ein Lockstoffversuch gestaltet, bei dem wie in den Vorjahren verschiedene Substanzen mit der Standardkombination aus Ethanol und (-)-α-Pinen verglichen wurden. Das dabei verwendete Ethanol ist standardmäßig vergällt, d. h. es wird durch den Zusatz von Isopropylalkohol, Methylethylketon und Denatoniumbenzoat aus Sicherheitsgründen ungenießbar gemacht, da es in unvergällter Form geschmacklos ist. Inwiefern diese Zusätze einen Einfluss auf die Attraktivität des Ethanols für *Hylobius abietis* ausüben, sollte mit diesem Versuch ergründet werden. Des Weiteren wurden vom Projektpartner an der UGÖ zwei Substanzmischungen zur Testung vorgeschlagen. Grundlage hierfür waren die Beprobungen von Kiefernstubbenemissionen im Versuchsgebiet Weißhaus im September 2021 gewesen. Die daraus abgeleitete Mischung 1 setzte sich aus 60 % (-)-α-Pinen (CAS 7785-26-4), 30 % Δ-3-Caren (CAS 13466-78-9) und 10 % γ-Terpinen (CAS 99-85-4) zusammen. Mischung 2 bestand aus 50 % Δ-3-Caren, 25 % β-Pinen (CAS 18172-67-3) und 25 % Camphor (CAS 464-48-2). Sämtliche Substanzen wurden in Langlock®-Dispensern appliziert, da diese bereits in anderen Versuchen erfolgreich angewendet wurden und zuverlässig funktionierten. Zur Anwendung kam außerdem erneut das bewährte Falleninsel-Versuchsdesign, wobei die vier Testvarianten je Insel in einem Viereck angeordnet waren.

Leider zeigte sich im Ergebnis, dass die Zuverlässigkeit der Dispenser in diesem Versuchsjahr nicht gegeben war. So variierten die Abgaberaten identischer Varianten stark und einige Dispenser waren bereits nach einer Woche vollständig entleert, während bei anderen kaum eine Abgabe zu verzeichnen war. Da die Attraktion von *Hylobius abietis* stark von der Abgaberate abhängt (Duduman et al. 2009, Müller 1993), konnten somit keine gesicherten Aussagen hinsichtlich der Wirksamkeit der potenziellen Lockstoffe getroffen wer-

den. Dennoch wurden die Fangdaten ausgewertet und erlauben einige Aussagen. Zwischen dem vergällten und dem kostenintensiven unvergällten Ethanol zeigte sich kaum ein Unterschied in den Fangergebnissen (Abbildung 44). Außerdem fingen beide geteste-ten Mischungen signifikant weniger Individuen von *Hylobius abietis* als die beiden Kombinationen aus Ethanol und (-)-α-Pinen. Zwar sind diese Ergebnisse aufgrund der beschriebenen Dispenserproblematik nicht vollständig gesichert, eine deutliche Tendenz ist aber dennoch sichtbar.

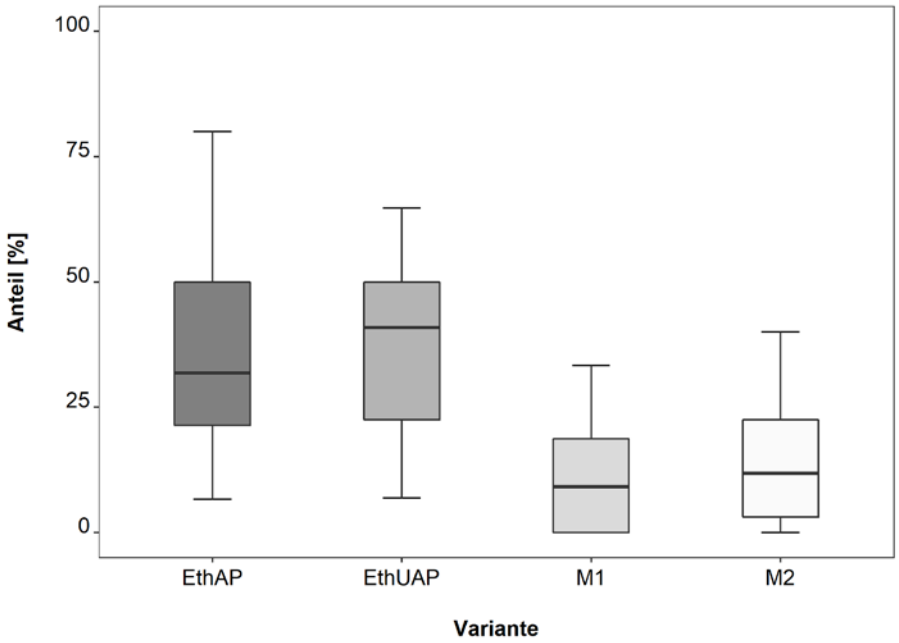

Abbildung 44: Fanganteile von *Hylobius abietis* je Falleninsel und Leerungsdatum in Abhängigkeit vom Lockstoff im Versuchszeitraum vom 15.06.-20.07.2022 in modifizierten Nordlander-Fallen im Versuchsgebiet Weißhaus, n = 15, Eth = Ethanol vergällt, AP = (-)-α-Pinen, EthU = Ethanol unvergällt, M = Mischung

Die im Versuchsjahr 2022 aufgetretene Unzuverlässigkeit der Dispenser weist nicht nur auf ein bestehendes Problem in Forschungsvorhaben, sondern auch bei der Einführung und dem Einsatz von Lockstoffen in die praktische forstliche Anwendung hin. Oft fehlt es an geeigneten Dispensern, um potenziell geeignete attraktive oder repellente Semiochemikalien, die sehr unterschiedlichen Stoffgruppen angehören und damit unterschiedliche Eigenschaften aufweisen, zuverlässig ausbringen zu können. Diese Problematik wird auch in Heber et al. (2024) thematisiert.

2.3.2.3.4. Wiederfangversuch

In einem Versuch kleineren Umfangs sollte der Wirkradius der bewährten modifizierten Nordlander-Falle auf *Hylobius abietis* ergründet werden. In der Literatur finden sich dazu verschiedene Angaben, wobei im Allgemeinen davon ausgegangen wird, dass die Käfer in

einem Radius von 2,5 m um die Falle herum effektiv von den Lockstoffen in der Falle angezogen werden (Olenici et al. 2016).

Für den Versuch wurden sechs modifizierte Nordlander-Fallen in zwei Reihen zu je drei Fallen und im Abstand von 10 m zueinander im Revier Naundorf im Tharandter Wald aufgestellt. Insgesamt 100 Individuen von *Hylobius abietis* wurden mit einem gelben Lackstift markiert und gleichmäßig innerhalb und außerhalb dieses Fallenrechtecks ausgesetzt. Die Fallen wurden mit der Standardkombination von Ethanl und (-)-α-Pinen in offenen Polypropylen-Dosen (4 cm Durchmesser 4 cm, 80 ml Fassungsvermögen, 50 ml Füllmenge) beködert, welche bei allen Leerungen erneuert wurden.

Innerhalb von 11 Tagen wurden insgesamt 38 der ausgesetzten markierten Käfer wieder gefangen, wobei der Großteil davon in den ersten fünf Tagen erfolgte (Abbildung 46). Nach einer Woche nahm die Fängigkeit der Fallen allerdings stark ab und es konnten kaum noch ausgesetzte Individuen gefangen werden.

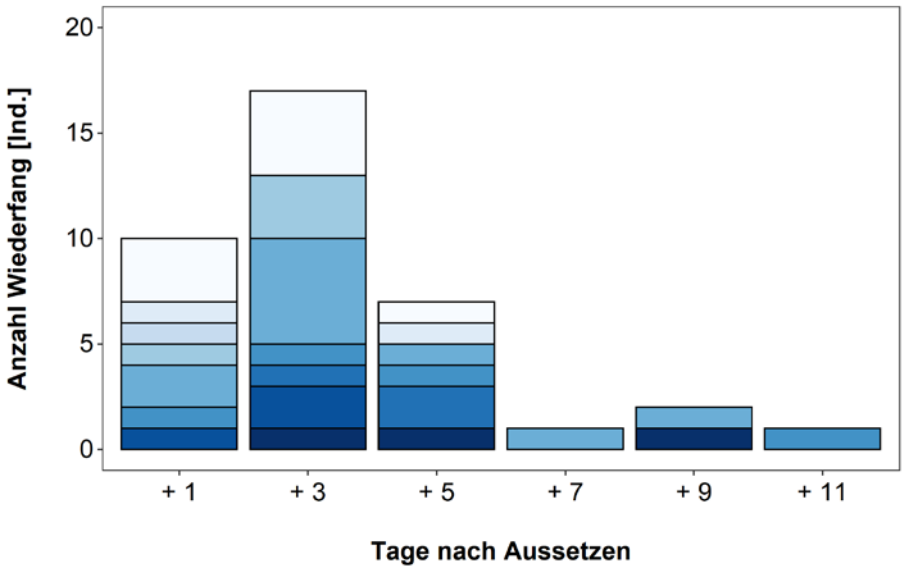

Abbildung 45: Anzahl und Zeitpunkt in modifizierten Nordlander-Fallen wieder gefangener Individuen von 100 markierten und am 14.09.2022 im Versuchsgebiet Naundorf ausgesetzten Individuen von *Hylobius abietis*

2.3.2.3.5. Massenfangversuch Rosenthal

Der Arbeitsaufwand im Versuchsjahr 2022 konzentrierte sich auf die Durchführung zweier Massenfangexperimente, von denen eines im Revier Rosenthal im Forstbezirk Neustadt durchgeführt wurde. Dabei wurde die Methodik des Massenfangversuchs im Vorjahr in Pfeffenhausen verbessert, indem die Fallen- und die Kontrollflächen separiert wurden. Die zehn ausgewählten Versuchsflächen wiesen für *Hylobius abietis* besiedlungsfähige Stubben sowie frisch gepflanzte Nadelbaumverjüngung auf. Während fünf dieser Flächen mit modifizierten Nordlander-Fallen bestückt wurden, blieben die anderen fünf Flächen

als Kontroll- bzw. Vergleichsvariante fallenfrei. Außerdem wurde keine Flächenbehandlung durch Pflanzenschutzmittel oder andere Managementmaßnahmen durchgeführt. Die Flächenauswahl gestaltete sich insgesamt als schwierig, da sowohl ein ähnliches Alter der Stubben als auch ein ähnliches Baumarten- und Größensortiment der Verjüngung gegeben sein mussten. Potenziell entstehende Pflanzenausfälle mussten durch die Forstbetriebe bewusst in Kauf genommen werden. Dementsprechend mussten gewisse Kompromisse hinsichtlich der Vergleichbarkeit der Flächen getroffen werden, die insbesondere unterschiedliche Verjüngungssortimente betrafen.

Die Evaluierung der Wirksamkeit der Fallen im Schutz der Verjüngung sollte erneut basierend auf einer Auswertung der Fangzahlen sowie einer Aufnahme des Vitalitätszustands der Verjüngung erfolgen. Dafür wurden im Revier Rosenthal nach der Vegetationsperiode Vollaufnahmen der Verjüngung auf allen zehn Flächen durchgeführt und die Fraßschäden an jeder Pflanze nach einer vierstufigen Skala kategorisiert.

Auf den Fallenflächen wurden zum 19.04.2022 jeweils fünf bis sechs modifizierte Nordlander-Fallen durch die Beköderung mit Ethanol und (-)-α-Pinen aktiviert. Bis zum 29.09.2022 wurden diese im Rhythmus von zwei Wochen geleert und die Lockstoffe erneuert.

In der gesamten Vegetationsperiode wurden so 12.087 Individuen von *Hylobius abietis* (88 %) und *Hylobius pinastri* (12 %) gefangen. Die Unterscheidung zwischen diesen beiden sehr ähnlichen Arten ist schwierig und wurde im Rahmen des Versuchs detailliert. Die neuen Erkenntnisse zur Unterscheidung der beiden Arten fanden Eingang in den Online-Bestimmungsschlüssel coleonet.de. Da beide Arten eine ähnliche Lebensweise aufweisen, gilt jedoch auch *Hylobius pinastri* als potenzieller Schadorganismus in Nadelbaumverjüngungen. Im zeitlichen Verlauf der Fangzahlen zeigte sich keine stark abnehmende Tendenz wie in den Versuchen im Vorjahr, sondern eine konstant hohe Abundanz von *Hylobius* spec. bis in den Juli hinein (Abbildung 46). Der seit 2018 dauerhaft starke Befall der Gemeinen Fichte mit *Ips typographus* im Versuchsgebiet bedingt eine gleichbleibend hohe Menge frischer Nadelbaumstubben, d. h. ein nahezu unbegrenztes Vorhandensein von Entwicklungsmaterial für *Hylobius* spec. und stellt damit eine Extremsituation dar. Die daraus resultierenden sehr hohen Populationsdichten von *Hylobius* spec. führen zu einem dauerhaft hohen Fraßdruck auf die gepflanzte Verjüngung. So waren bereits im Mai sehr hohe Zahlen an Käfern sowohl in den Fallen als auch auf der Fläche zu beobachten, wodurch bereits früh in der Vegetationsperiode die ersten Ausfälle in den Anpflanzungen auftraten. Trotz einer durchschnittlichen Fangzahl von 431,7 Individuen/Falle/Saison stiegen die Ausfälle in der Verjüngung durch den konstanten Fraßdruck von *Hylobius* spec. auf bis zu 77,8 % auf den Fallenflächen und 75,7 % auf den Kontrollflächen.

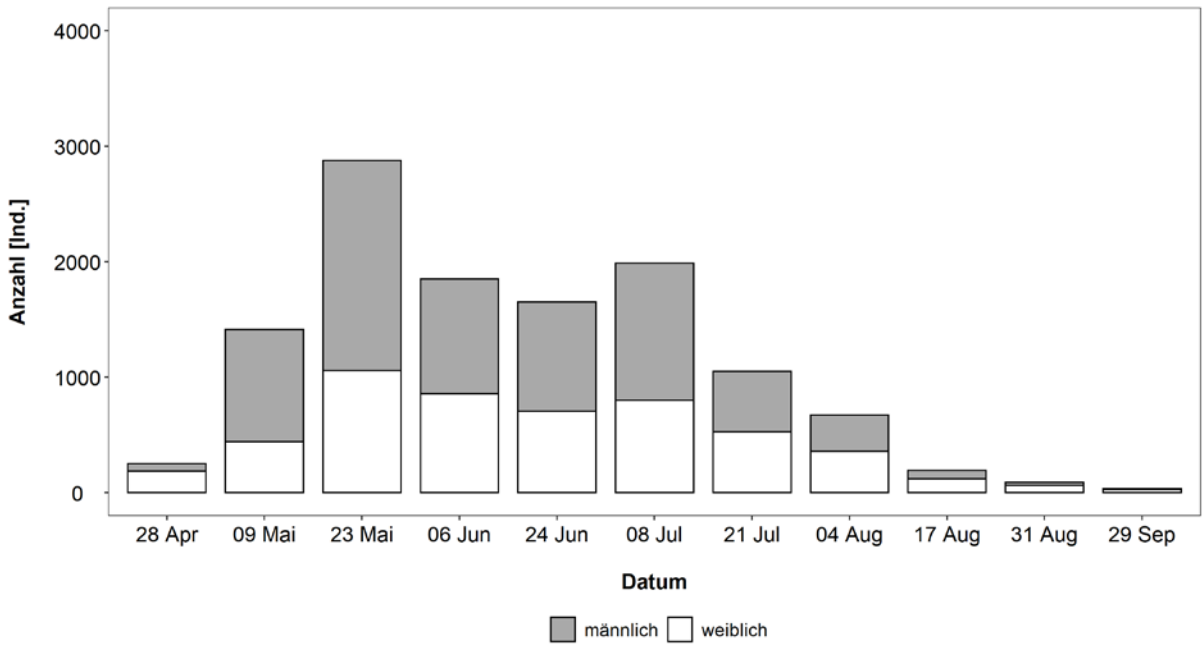

Abbildung 46: Zeitlicher Verlauf der absoluten Fangzahlen von *Hylobius abietis* und *Hylobius pinastri* in modifizierten Nordlander-Fallen im Versuchszeitraum vom 19.04.-29.09.2022 im Versuchsgebiet Rosenthal

Die Ergebnisse der Vitalitätsbeurteilung an den insgesamt 3.082 Verjüngungspflanzen ergaben für alle vier Schadstufen keine signifikanten Unterschiede zwischen den Fallen- und den Kontrollflächen. Das Fraßgeschehen auf den Fallenflächen konnte durch die Fangaktivität der Fallen nicht signifikant beeinflusst werden und war trotz der sehr hohen Fangzahlen auf einem sehr hohen Niveau (Abbildung 47). Der aktuell realisierbare Wirkungsgrad der Fallen wurde im Revier Rosenthal offensichtlich überschritten. Eine mögliche Ursache ist, dass die hohe Lockstoffapplikation auf den Fallenflächen insbesondere in der Migrationsphase von *Hylobius abietis* im Mai zusätzliche Käfer auf die Flächen gelockt hat und dies nicht von den Fallen kompensiert werden konnte. Die gleichmäßige Verteilung der Fallen auf der Fläche in einem Raster mit 30 m Abstand könnte zusätzlich dazu beigetragen haben. Eine Positionierung der Fallen an den Flächenrändern könnte sich für den Abfang der Käfer ggf. als günstiger erweisen. Es ist aber auch eine unzureichende Wirkung des Lockstoffs oder eine zu geringe Anzahl an Fallen denkbar. Da davon ausgegangen wird, dass die Populationsdichten von *Hylobius abietis* zwischen verschiedenen Flächen stark schwanken und eine genaue Abschätzung ausgesprochen schwierig ist (Bylund et al. 2004, Day et al. 2004, Eidmann 1997), bleibt die tatsächliche Anzahl an Käfern auf der Fläche und damit der Wirkungsgrad der Fallen auf die Population unbekannt. Die Daten deuten allerdings darauf hin, dass die modifizierte Nordlander-Falle auf stark gefährdeten Flächen in einer Extremsituation wie im Revier Rosenthal in der derzeit angewendeten Art und Weise keinen ausreichenden Wirkungsgrad besitzt.

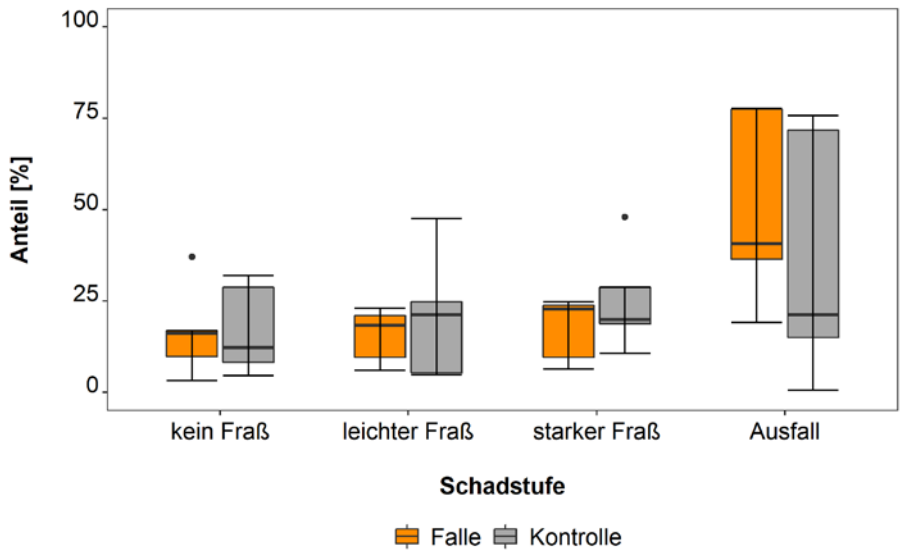

Abbildung 47: Anteile der Schadstufen des Fraßes durch *Hylobius abietis* und *Hylobius pinastri* an gepflanzter Nadelbaumverjüngung am 06.10.2022 auf Flächen mit (= Falle) und ohne (= Kontrolle) modifizierten Nordlander-Fallen im Versuchsgebiet Rosenthal am 06.10.2022, n = 5

Zu oben beschriebenen Ergebnis tragen allerdings maßgeblich die Kontrollflächen 1 und 5 bei, die sich stark von den anderen Flächen unterschieden. Die Verjüngungspflanzen wiesen hier einen deutlich größeren Wurzelhalsdurchmesser auf und kamen zudem viel zahlreicher vor. Werden diese beiden Flächen von der Auswertung ausgeschlossen, zeichnen sich wie erhofft stärkere Schäden auf den Kontrollflächen ab, allerdings ist auch dieser Trend nicht signifikant (Abbildung 48).

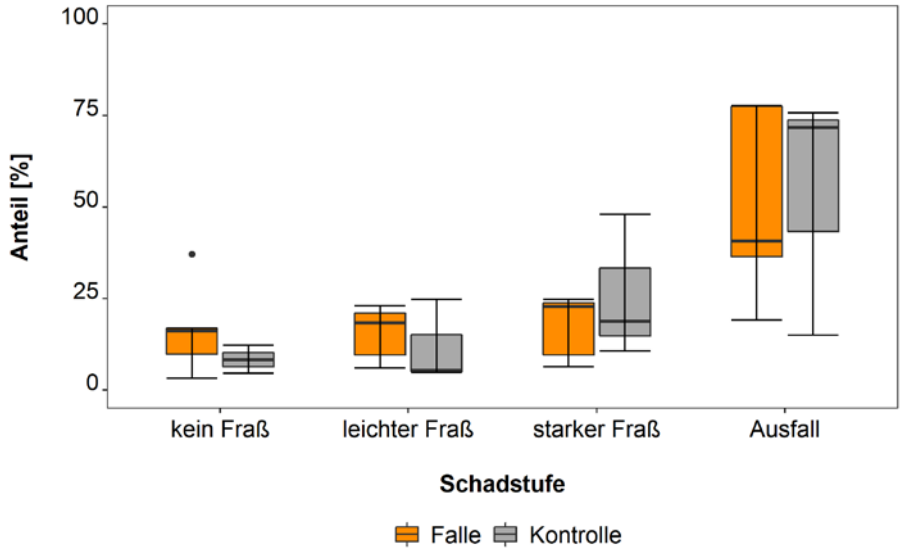

Abbildung 48: Anteile der Schadstufen des Fraßes durch *Hylobius abietis* und *Hylobius pinastri* an gepflanzter Nadelbaumverjüngung am 06.10.2022 auf Flächen mit (= Falle) und ohne (= Kontrolle) modifizierten Nordlander-Fallen im Versuchsgebiet Rosenthal am 06.10.2022 unter Ausschluss der Kontrollflächen 1 und 5, n = 5

2.3.2.3.6. Massenfangversuch Schellerhau

Ein zweiter Massenfangversuch wurde im Forstbezirk Bärenfels im Revier Schellerhau durchgeführt. Versuchsdesign und -durchführung entsprachen dem im Revier Rosenthal, jedoch wurde ein anderes Schadboniturverfahren gewählt. Bei diesem erfolgte an drei über dem Versuchszeitraum verteilten Aufnahmetagen (25.05., 22.07., 31.08.) eine stichprobenartige Aufnahme der Vitalität der Verjüngung auf allen zehn Flächen. Dafür wurde ein diagonales Transekt über die Flächen gelegt und alle Pflanzen innerhalb dieses Transekts gekennzeichnet. Ziel war es, pro Fläche mindestens 50 Pflanzen zu bonitieren.

Im Ergebnis zeigten die Fangzahlen von insgesamt 10.829 Individuen von *Hylobius abietis* einen anderen zeitlichen Verlauf als im Revier Rosenthal. Während dort noch bis in den Juli hinein hohe Fangzahlen zu verzeichnen waren, wurde im Revier Schellerhau der Wert von 1.000 Individuen pro Leerung bereits Anfang Juli unterschritten (Abbildung 49). Insgesamt 78,5 % des Gesamtfangs wurden bereits bis Anfang Juni getätigt, weshalb ab Juni mit einem deutlich geringerem Fraßgeschehen auf den Fallenflächen zu rechnen war.

Bei den gefangenen Individuen handelte es sich dabei zu 100 % um die Art *Hylobius abietis*, was auf starke regionale Unterschiede in der Verbreitung von *Hylobius pinastri* hinweist. Es wurden lediglich 127 Laufkäfer gefangen, was einen durchschnittlichen Beifang von 4,2 Individuen/Falle/Saison ergibt und damit mit dem im Massenfangversuch Pfeffenhausen erreichten Wert vergleichbar ist. Die ökologische Verträglichkeit der modifizierten Nordlander-Falle zeigt sich somit erneut.

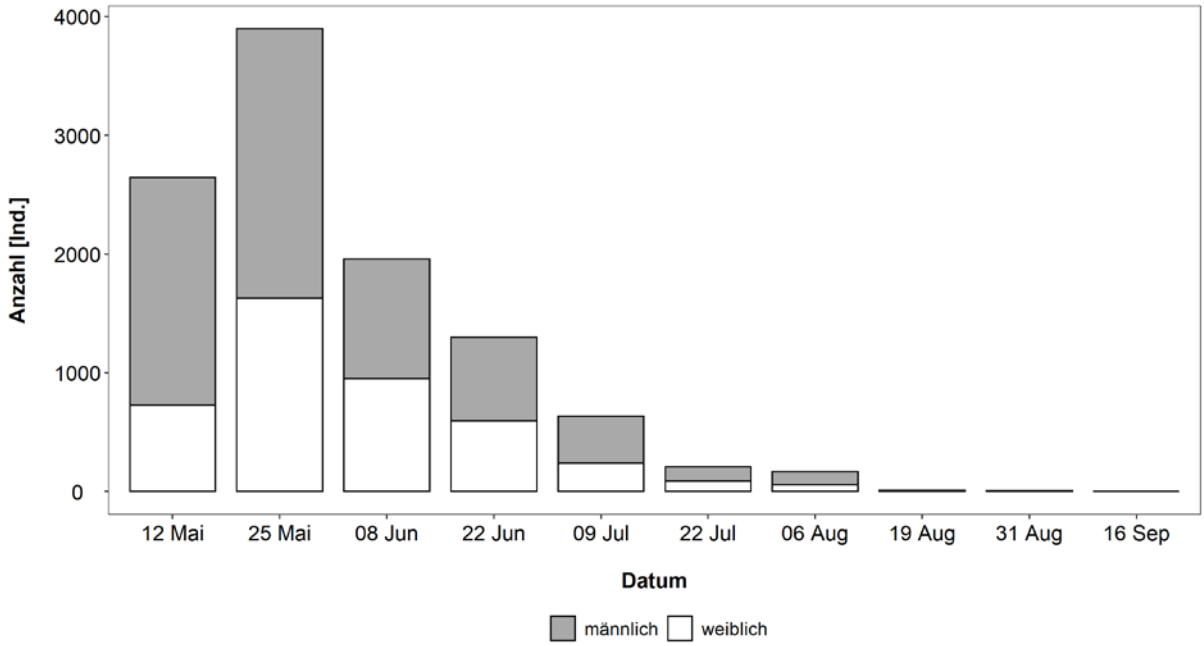

Abbildung 49: Zeitlicher Verlauf der absoluten Fangzahlen von *Hylobius abietis* in modifizierten Nordlander-Fallen im Versuchszeitraum vom 29.04.-16.09.2022 im Versuchsgebiet Schellerhau

Das Verfahren der mehrfachen stichprobenartigen Inventur mit eindeutig markierten Pflanzen erwies sich als praktikabler und aussagekräftiger als die einmalige Vollaufnahme am Ende der Vegetationsperiode. Die Boniturpflanzen sind besser auffindbar und die Beobachtung der zeitlichen Entwicklung des Fraßgeschehens lässt zusätzliche Schlussfolgerungen zu. So zeigte sich im Revier Schellerhau eine zeitliche Variation in der Fraßintensität zwischen den Fallen- und den Kontrollflächen (Abbildung 50). Zum ersten Boniturtermin im Mai waren deutlich mehr Bäume auf den Fallenflächen befressen. Dieses Ergebnis stützt die bereits bezüglich des Massenfangversuchs in Rosenthal formulierte These, dass es zu einer zusätzlichen Aggregation von Individuen auf der Fläche durch die Lockstoffe in den Fallen kommt. Die Zahl der durch *Hylobius abietis* bedingten Pflanzenausfälle nimmt jedoch im Lauf der Vegetationsperiode auf den Kontrollflächen stärker zu als auf den Fallenflächen. Bei Letzteren bleibt diese Zahl über die gesamte Vegetationsperiode hinweg konstant niedrig. Hierbei handelt es sich allerdings lediglich um Tendenzen, da eine statistische Signifikanz nicht nachgewiesen werden konnte. Dennoch ist es in Schellerhau offenbar gelungen, die Population von *Hylobius abietis* auf den Flächen lokal so stark abzuschöpfen, dass der fraßbedingte Ausfall von Verjüngung auf den Fallenflächen im Mittel auf 10,7 % beschränkt werden konnte. Eine Absenkung der Population konnte so bereits im Juni erreicht werden, während die Fangzahlen im Revier Rosenthal zu dieser Zeit noch hoch waren. Hier zeigt sich offensichtlich eine Effektivitätsschwelle der modifizierten Nordlander-Falle, deren Wirkgrenze in Extremsituationen wie in Rosenthal überschritten wird, wenn durch das Vorhandensein einer großen Menge an Brut- und Entwicklungsmaterial mit einer permanenten Zuwanderung von neuen Individuen zu rechnen ist.

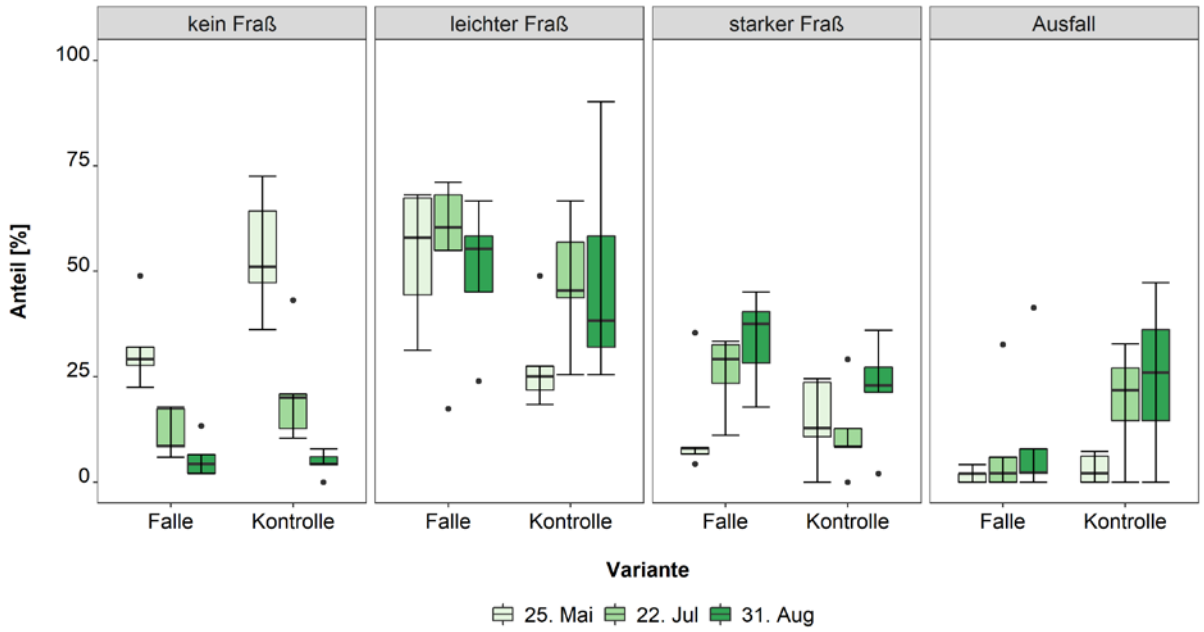

Abbildung 50: Anteile der Schadstufen des Fraßes durch *Hylobius abietis* an gepflanzter Nadelbaumverjüngung an den drei Aufnahmetagen auf Flächen mit (= Falle) und ohne (= Kontrolle) modifizierten Nordlander-Fallen im Versuchsgebiet Schellerhau, n = 5

2.3.2.4. Versuchsjahr 2023

Im letzten Versuchsjahr wurde im Rahmen einer Projektverlängerung ein abschließender Versuch zum Vergleich der beiden im Projekt entwickelten Fallentypen für *Hylobius abietis*, der modifizierten Nordlander-Falle und der Auflagefalle, mit dem kommerziell erhältlichen WitaTrap®-Rüsselkäferfangrohr durchgeführt. Dafür wurde das bewährte Falleninsel-Versuchsdesign nach Wehnert (2014) auf den Flächen im Revier Schellerhau angewandt, die bereits im Vorjahr für den Massenfangversuch genutzt wurden (Abbildung 51). Versuchsaufbau und -aktivierung erfolgten am 25.04.2023, die erste Leerung jedoch aufgrund fehlender Aktivität von *Hylobius abietis* erst am 11.05.2023. Als Lockstoffe wurden wiederum in allen drei Fallentypen Ethanol und (-)-α-Pinen in offenen Polypropylen-Dosen (4 cm Durchmesser, 80 ml Fassungsvermögen, 50 ml Füllmenge) verwendet und bei jeder Leerung erneuert.

Abbildung 51: Einzelne Falleninsel des Fallentypenvergleichs im Versuchsgebiet Schellerhau, links: WitaTrap®-Rüsselkäferfangrohr, rechts oben: modifizierte Nordlander-Falle, rechts unten: Auflagefalle

Im Ergebnis zeigte sich eine sehr deutliche und statistisch signifikante Überlegenheit der modifizierten Nordlander-Falle beim Fang von *Hylobius abietis*. Im Durchschnitt wurden in dieser Falle ca. 70 % aller Individuen einer Falleninsel gefangen (Gesamtfangzahl = 1.540 St.), während dieser Wert bei der WitaTrap®-Falle nur ca. 22 % (Gesamtfangzahl = 190 St.) und bei der Auflagefalle ca. 8 % (Gesamtfangzahl = 548 St.) betrug. Auch die Unterschiede zwischen den beiden letztgenannten Fallentypen stellen sich dabei statistisch signifikant dar.

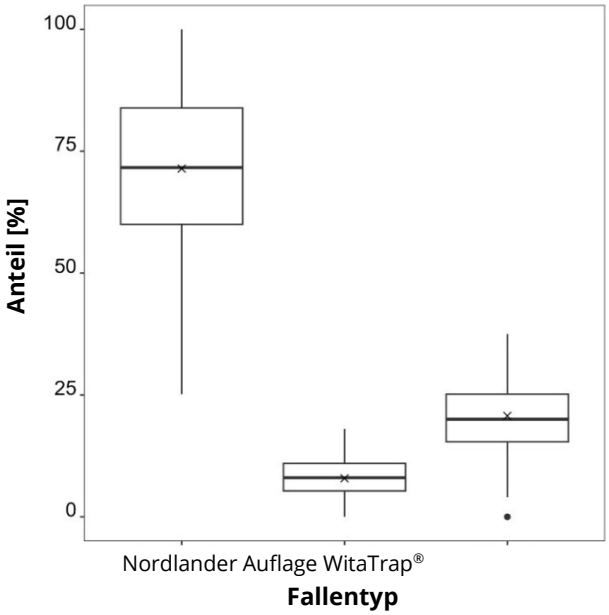

Abbildung 52: Fanganteile von *Hylobius abietis* je Falleninsel und Leerungsdatum in Abhängigkeit vom Fallentyp im Versuchszeitraum vom 25.04.-02.08.2023 im Versuchsgebiet Schellerhau, n = 30

Die Geschlechterverteilung von *Hylobius abietis* innerhalb der Fallentypen war ungefähr ausgeglichen, wobei in der modifizierten Nordlander- und der Auflagefalle mit durchschnittlich 52 % jeweils geringfügig mehr Männchen gefangen wurden. Es lagen jedoch keine signifikanten Unterschiede vor.

2.3.2.5. Fazit zur Zielart *Hylobius abietis*

In den vier Projektjahren wurden in zwölf Versuchen insgesamt 33.710 Individuen der Zielart *Hylobius abietis* gefangen und zahlreiche vielversprechende Ergebnisse erzielt, die mit einem erheblichen Erkenntnisgewinn bezüglich Populationsökologie, Lebensweise und Management einhergehen. Mit der modifizierten Nordlander-Falle wurde eine Bodenfalle entwickelt, die äußerst zuverlässig und selektiv Individuen von *Hylobius abietis* fängt und ein hohes Maß an ökologischer Verträglichkeit aufweist. Zudem ist die Konstruktion äußerst praxistauglich und wurde bereits in das Waldschutzmanagement einiger Forstbetriebe integriert. Allerdings besteht noch entscheidender Forschungsbedarf hinsichtlich der Gestaltung effektiver Massenfänge und der Anzahl und Anordnung der Fallen auf den gefährdeten Flächen sowie der Optimierung der Lockstoffe. Hervorzuheben ist dabei insbesondere die Notwendigkeit praxistauglicher Dispenser mit hohen Abgaberaten. Die Entwicklung einer Auflagefalle ohne Einbringung in den Boden sowie eines neuartigen Fangbehälters sind als absolute Neuheiten zu betrachten. Auch wenn Erstere geringere Fangerfolge als die in den Boden einzugrabende modifizierte Nordlander-Falle bringt, stellt sie dennoch eine Option für flachgründige und skelettreiche Standorte dar. Die Erkenntnisse der Versuche dienen damit sowohl der Forschung als auch der Praxis als Grundlage für weiterführende Studien. Diese sind unbedingt notwendig, um gerade in der gegenwärtigen Phase mit schwerwiegenden Schäden durch *Hylobius abietis* valide insektizidfreie oder kombinierte Verfahren zu implementieren. Dem großen Bedarf der forstlichen Praxis nach alternativen Lösungsansätzen für die Problematik von Verjüngungsschäden durch den Fraß von *Hylobius abietis* kann durch die folgenden Handlungsempfehlungen entsprochen werden:

- Verwendung der modifizierten Nordlander-Falle mit der Lockstoffkombination Ethanol und (-)-α-Pinen als Monitoringinstrument
- vorgelagerter Massenfang vor einer Bepflanzung von Freiflächen und dadurch Verkürzung der Schlagruhe auf ein Jahr
- Positionierung der Fallen am Rand der zu schützenden Flächen
- Verwendung stärkerer Pflanzensortimente, da diese eine höhere Kompensationsfähigkeit gegenüber Fraß durch *Hylobius abietis* zeigte

3. Erzielte Ergebnisse - Teilprojekt 2, Arbeitspaket 2.2

3.1. Einleitung

Innerhalb der Projektlaufzeit wurden im Teilprojekt 2 insgesamt 14 Versuche in zwei verschiedenen Versuchsgebieten durchgeführt (Tabelle 4): in Brandenburg in einem Kiefernaltbestand im Revier Weißhaus (3 Versuche) sowie in Sachsen im Tharandter Wald in einem Rotbuchenbestand (3 Versuche) und im Lehr- und Forschungswildgehege der TU Dresden (2 Versuche) im Revier Hetzdorf und in Fichtenbeständen im Revier Naundorf (6 Versuche, davon einer in Zusammenarbeit mit TP 1, siehe 2.3.1.2.4). Aufgrund des Umfangs der Ergebnisse werden im Folgenden nur diejenigen dargestellt, die von direkter Relevanz für die Zielstellungen im Teilprojekt sind und sich auf die Hauptzielarten *Ips typographus*, *Ips sexdentatus* und *Xylosandrus germanus* in den Jahren 2020-2022 bzw. *Trypodendron lineatum* im Jahr 2023 und wichtige Nebenzielarten beziehen.

3.2. Freilandfallenversuche

3.2.1. Einleitung

Mittels eines seit vielen Jahren erfolgreich angewandten Versuchsdesigns wurden in den vier Projektjahren verschiedenste Substanzen auf ihre Eignung für einen Einsatz in der Regulation von waldschädlichen Borkenkäferarten getestet. Die Auswahl der Substanzen orientierte sich dabei einerseits an laborbasierten Ergebnissen und Empfehlungen unseres Projektpartners an der UGÖ sowie andererseits an Erkenntnissen aus der Literatur und eigenen früheren Beobachtungen und Versuchen. Ziel war es, aus den Ergebnissen dieser Fallenversuche im Freiland Empfehlungen für einen Einsatz bestimmter Substanzen in der Praxis zur insektizidfreien Abwehr von Borkenkäferarten in Beständen der drei Hauptbaumarten in Deutschlands Wäldern abzuleiten.

3.2.2. Material und Methodik

3.2.2.1. Versuchsdesign

Für die Versuche wurden die standardmäßig im Borkenkäfermanagement in Deutschland eingesetzten Theysohn®-Schlitzfallen verwendet und durch den Verschluss der Fangladenabläufe mit Silikonpaste zu Totfangfallen modifiziert (Abbildung 53). Dies gewährleistet, dass keine Organismen aus den Fangladen entkommen können, vor der Artbestimmung zersetzt oder in der Fanglade durch Prädatoren erbeutet werden und schließt die Abgabe von Stressvolatilen durch die gefangenen Insekten aus, die ggf. die Falle anfliegende Organismen ablenken könnten. Als Fang- und Konservierungsflüssigkeit in den Fangladen wurde gesättigte Benzoesäurelösung genutzt und mit einer geringen Menge eines handelsüblichen Spülmittels versetzt, um die Oberflächenspannung zu reduzieren und ein möglichst rasches Versinken der gefangenen Organismen zu garantieren.

Abbildung 53: Theysohn®-Schlitzfalle mit herausgezogener Fanglade (links) und kreisförmige Anordnung von sechs Theysohn®-Schlitzfallen zu einer Falleninsel (rechts)

Der Aufbau der Versuche orientierte sich am Falleninseldesign von Wehnert (2014), bei dem die Fallen kreisförmig angeordnet und diese Inseln im Sinne statistischer Wiederholungen mehrfach aufgebaut werden (Abbildung 53). Der Fallenabstand innerhalb des Kreises einer Insel beträgt dabei 5 m, der Abstand zwischen den Falleninseln ca. 50 m. Mit diesen Abständen können einerseits eine gegenseitige Beeinflussung innerhalb einer Insel sowie zwischen verschiedenen Inseln ausgeschlossen, aber gleichzeitig ausreichend ähnliche Umweltbedingungen für alle Testvarianten innerhalb der Falleninseln gewährleistet werden. Außerdem wurde auf einen ausreichenden Abstand der Versuchsaufbauten zu den Bestandesrändern geachtet, um Randeffekte auszuschließen. Die Anzahl der Fallen je Insel wurde durch die Anzahl der im Einzelversuch zu testenden Substanzen bestimmt und lag zwischen fünf und sieben Stück, da sich eine Anzahl über sieben Stück pro Falleninsel als versuchstechnisch ungünstig erwiesen hat. Um die für eine statistische Analyse und ausreichend hohe Aussagekraft notwendige Anzahl an Wiederholungen zu gewährleisten, wurden in jedem Einzelversuch jeweils fünf Falleninseln mit denselben Testvarianten betrieben.

Die Aktivierung der Fallen orientierte sich an den Schwärmzeiten der jeweiligen Zielinsekten der einzelnen Versuche in Verbindung mit den Witterungsbedingungen. Nach Aktivierung wurden die Fallen im ca. zweiwöchigen Rhythmus geleert, bis sechs Leerungen pro Versuch erreicht waren. In einzelnen Fällen kam es vor allem aufgrund von Kälteeinbrüchen im Frühjahr zu einer Verlängerung des Leerungszeitraums. Aufgrund der Transformation der absoluten Fangzahlen in prozentuale Anteile hatte dies aber keinerlei Einfluss auf die statistische Auswertung der Daten.

3.2.2.2. Semiochemikalien

Zu Vergleichszwecken wurde in alle Fallenversuche als Testvariante der Standardlockstoff für die jeweilige Hauptzielart integriert (Tabelle 6). Die Ausbringung der als Flüssigkeit vorliegenden Stoffe Pheroprax® (*Ips typographus*/Gemeine Fichte) und Ethanol (*Xylosandrus germanus*/Rotbuche) erfolgte in zwei Glaskapillaren (Hirschmann® ringcaps 100/200 µl) je Falle, während die Foliendispenser von Sexowit® (*Ips sexdentatus*/Gemeine Kiefer) und Linosan® (*Trypodendron lineatum*/Gemeine Fichte) halbiert und neu eingeschweißt wurden. Eine Übersicht der in den vier Projektjahren getesteten für Borkenkäfer potenziell repellenten Einzelsubstanzen gibt Tabelle 7. Da es Ziel war, Standardlockstoffe und potenziell repellente Stoffe im Verhältnis von ca. 1:2 auszubringen, wurden die wässrigen Stoffe mit vier Glaskapillaren je Falle angewendet bzw. mit jeweils zwei Kapillaren, wenn es sich um eine Kombination aus zwei Stoffen handelte. Für die öligen Stoffe konnten aufgrund deren Viskosität keine Kapillaren verwendet werden, sondern es kamen die kommerziell erhältlichen Langlock-Dispenser mit der Dosierkappe für eine hohe Abgaberate zum Einsatz. Um die Wirkung der potenziellen Repellentien in den Fallenversuchen nachweisen zu können, wurde diese jeweils in Kombination mit dem zielartspezifischen Standardlockstoff ausgebracht, da ansonsten ein Nichtfang der Zielinsekten grundsätzlich nicht nur in der Repellenz der eingesetzten Substanzen, sondern auch in einem Nichtvorhandensein dieser begründet sein könnte. In allen Versuchen im ersten sowie in der Hälfte der Versuche im zweiten Projektjahr wurde außerdem eine Nullvariante, d. h. eine unbeköderte Falle in die Versuche integriert. Da diese für die Zielsetzung der Versuche bzw. deren Aussagekraft jedoch nicht relevant war, wurde auf diese Variante zugunsten der Testung einer weiteren potenziell repellenten Substanz verzichtet.

Tabelle 6: Übersicht der in den Freilandfallenversuchen eingesetzten Standardlockstoffe

Substanz	Beschreibung	Dosierung/Dispenser
Ethanol	Standardlockstoff für *Xylosandrus germanus*, Pflanzenstressvolatil und Attraktivstoff für Borkenkäfer (Kimmerer und Kozlowski 1982, Reding et al. 2017)	2 Kapillaren
Linosan®	Standardlockstoff für *Trypodendron lineatum*, enthält u. a. Lineatin (Bestandteil des Aggregationspheromons der Art) und α-Pinen (Wirtsbaumvolatil)	½ Foliendispenser
Pheroprax®	Standardlockstoff für *Ips typographus*, enthält cis-Verbenol, Ipsdienol und 2-Methyl-3-buten-3-ol (Bestandteile des Aggregationspheromons der Art)	2 Kapillaren
Sexowit®	Standardlockstoff für *Ips sexdentatus*, enthält cis-Verbenol, Ipsdienol und 2-Methyl-3-buten-3-ol (Bestandteile des Aggregationspheromons der Art)	½ Foliendispenser

Tabelle 7: Übersicht der in den Freilandfallenversuchen getesteten für Borkenkäfer potenziell repellenten Einzelsubstanzen (NHV = Non-Host-Volatil/Nichtwirtsbaumvolatil, NHabV = Non-Habitat-Volatil/lebensraumfremdes Volatil) (Fortsetzung der Tabelle auf Seite 67)

Substanz Abkürzung	**Beschreibung**	**Dosierung/Dispenser (Versuchsjahr)**
(-)-α-Pinen	dominantes Monoterpen von Nadelbaumarten und Hauptbestandteil der Emissionen von Harzen, wirkt attraktiv auf wichtige Arten von Borkenkäferantagonisten (Schroeder 2003) und zeigte 2021 eine repellente Wirkung auf *Ips typographus* im Rahmen von Versuchen des Teilprojekts 1	offene Polypropylen-Dose mit Ø 4 cm und 40 ml Füllmenge (2022)
Bärlauch-extrakt	NHabV, pflanzliches Extrakt des Bärlauchs (*Allium ursinum*), einer Zeigerpflanze für Laubwaldgesellschaften mit antibakterieller und fungizider Wirkung (Ivanova et al. 2009), positive Vorergebnisse aus dem Projekt bioProtect (Helbig und Heber 2020, Helbig und Müller 2021)	4 Kapillaren (2021)
cis-3-Hexenyl-acetat	NHV/NHabV, Grünblattduftstoff und Kennzeichen für Laubwaldhabitate bzw. stark ausgeprägte krautige Bodenvegetation sowie Akteur in der pflanzeneigenen Abwehr von Schadorganismen (Frontini et al. 2022), VOC-Analysennachweis durch UGÖ 2020 in Bärlauch und Waldmeister	4 Kapillaren (2020) 2 Kapillaren (2021/23)
Cumarin	NHabV, kennzeichnender Inhaltsstoff von Waldmeister (*Galium odoratum*), einer Zeigerpflanze für Laubwaldgesellschaften, mit insektizider Wirkung (Hussain et al. 2018), VOC-Analysennachweis durch UGÖ 2020	4 Kapillaren (2021)
Decanal	NHV, Bestandteil der Volatilmuster von Laubbaumarten (Rachow 2019) und ätherischer Öle mit bakterizider Wirkung (Hert 2018, Liu et al. 2012), nachgewiesen in vergleichenden VOC-Analysen von Tot- und Lebendfangfallen für *Ips typographus* durch UGÖ 2020, Ergebnisse lassen repellente Wirkung vermuten	4 Kapillaren (2021) 1 Langlock (2022/23)
Essigsäure	NHV, Fermentationsprodukt der natürlichen Zersetzung von Holz sowie pilzlich bedingter Abbauprozessen (Kesselmeier und Staudt 1999), kennzeichnet potenziell ungeeignetes, da zu stark zersetztes Brutmaterial, durch UGÖ 2020 und 2021 im Labor als repellent für *Xylosandrus germanus* getestet	2 Kapillaren (2020/22/23) 2 Langlocks (2021/22)
Estragol	NHabV, Bestandteil mehrerer ätherischer Öle, u. a. von Estragon (*Artemisia dracunculus*) (Prasse et al. 2018) und Borkenkäferrepellent (Hobson 1993), durch UGÖ 2021 im Labor als repellent für *Ips typographus* getestet	4 Kapillaren (2022)
Eukalyptusöl	NHabV, ätherisches Öl von *Eucalyptus* spec. mit repellenter und insektizider Wirkung (Batish et al. 2008)	1 Langlock (2020/22/23)
cis-3-Hexen-1-ol	NHV/NHabV, Grünblattduftstoff und Kennzeichen für Laubwaldhabitate bzw. stark ausgeprägte krautige Bodenvegetation sowie Akteur in der pflanzeneigenen Abwehr von Schadorganismen (Hamilton et al. 2009), VOC-Analysennachweis durch UGÖ 2020 in Bärlauch und Waldmeister	2 Kapillaren (2021/23)

Korianderöl	NHabV, ätherisches Öl von *Coriandrum sativum*, mit repellenter und insektizider Wirkung (Islam et al. 2009, Sriti Eljazi et al. 2017), enthält u. a. Terpinen, welches durch UGÖ 2020 als repellent für *Ips typographus* getestet wurde	1 Langlock (2021)
Myrcen	NHabV, u. a. in Salbei und Rosmarin (*Salvia* spec.) enthalten, durch UGÖ 2020 im Labor repellent auf *Ips typographus* getestet und nach Francke et al. (1995) durch diese Art bei Stress emittiert	4 Kapillaren (2021)
1-Octen-3-ol	NHV, charakteristisches Volatil von (Schimmel-)Pilzen mit insektizider Wirkung (Cui et al. 2021), kennzeichnet potenziell ungeeignetes, da zu stark zersetztes Brutmaterial, positive Vorergebnisse aus dem Projekt bioProtect (Helbig und Müller 2021)	2 Kapillaren (2020/22/23)
Oreganoöl	NHabV, ätherisches Öl von *Origanum vulgare* mit repellenter und insektizider Wirkung (Mudrončeková et al. 2019) und durch UGÖ 2020 im Labor als repellent für *Ips typographus* getestet	1 Langlock (2020/22)
Retterspitz äußerlich*	Mischung u. a. aus mehreren NHabV, welche sich in Versuchen im Rahmen des Projekts als repellent oder tendenziell repellent zeigten und/oder in der Literatur als Insektenrepellent beschrieben werden	4 Kapillaren (2021)
Salbeiöl	NHabV, ätherisches Öl von *Salvia officinalis* mit insektizider Wirkung (Nedić et al. 2014), enthält nach Analysen der UGÖ u. a. Humulen, Myrcen und Terpinen, welche alle durch UGÖ 2020 im Labor als repellent für *Ips typographus* getestet wurden und nach Francke et al. (1995) durch diese Art bei Stress emittiert werden	1 Langlock (2021/22)
γ-Terpinen	NHabV, u. a. in Salbei-, Koriander- und Zitronenöl enthalten, insektizide Wirkung (Diksha et al. 2023), durch UGÖ 2020 im Labor als repellent für *Ips typographus* getestet und nach Francke et al. (1995) durch diese Art bei Stress emittiert	4 Kapillaren (2021)
Veratrol	NHV, Abbauprodukt verschiedener Naturstoffe z. B. Lignin und mit der Holzzersetzung im Rahmen der Buchenkomplexkrankheit assoziiert (Holighaus und Schütz 2006), nach Wehnert (2014) ein Nichtwirtsbaumvolatil bzw. baumbürtiger Ablenkstoff mit repellenter Wirkung auf verschiedene Borkenkäferarten	4 Kapillaren (2021)
Verbenon	NHV/NHabV, Antiaggregationspheromon von *Ips typographus*, und durch UGÖ 2020 als repellent getestet, aber z. B. auch in Rosmarin enthalten, im Projekt bioProtect mehrfach erfolgreich in Nadelwaldhabitaten getestet mit ersten Hinweisen auf einen repellenten Effekt auf *Xylosandrus germanus* (Helbig und Müller 2021)	4 Kapillaren (2021/22/23)
Zitronenöl	NHabV, ätherisches Öl von *Citrus limon* mit repellenter und insektizider Wirkung (Giatropoulos et al. 2012)	1 Langlock (2020) 2 Langlock (2021)

* gereinigtes Wasser, Thymol, Zitronenöl, Bergamottöl, Orangenblütenöl, Arnikatinktur, Weinsäure, Citronensäure-Monohydrat, Alaun, Hühnerei denaturiert, gehärtet, keimfrei, medizinische Seife, Macrogolglycerohydroxystearat, Ethanol

3.2.2.3. Datenauswertung und Statistik

Für die Aufnahme, Darstellung und statistische Auswertung der gewonnenen Daten wurden die Programme Microsoft Excel 2016, R 4.3.1 und RStudio 2023.09.0 mit den Packages plyr 1.8.9, ggplot2 3.5.0, tidyverse 2.0.0, ggpubr 0.6.0, pgirmess 2.0.3, PMCMRplus 1.9.10, readxl 1.4.3, dplyr 1.1.4 und ggsignif 0.6.4 verwendet.

Da fast alle Daten laut Shapiro-Wilk-Test keine Normalverteilung aufwiesen, wurden sie einheitlich mit nichtparametrischen Tests ausgewertet. Die Analyse bezüglich statistisch signifikanter Unterschiede erfolgte dabei im Fall multivariater Daten mittels Kruskall-Wallis-Test in Verbindung mit Conover-Iman-Post-Hoc-Tests, im Fall bivariater Daten mittels Mann-Whitney-U-Test. Die Post-Hoc-Tests wurden als Many-to-One-Tests durchgeführt, d. h. es erfolgte kein Vergleich aller möglichen paarweisen Kombinationen von Testvarianten, sondern es wurde jede Testvariante bestehend aus Standardlockstoff mit zugesetztem potenziellem Repellent mit dem reinen Standardlockstoff paarweise verglichen.

Die Ergebnisse bezüglich der getesteten Semiochemikalien werden als mittlerer prozentualer Anteil des Fangs der jeweiligen Zielart oder -gruppe je Testvariante je Falleninsel je Leerungstermin dargestellt, d. h., dass sowohl die einzelnen Falleninseln als auch jeder Leerungstermin als Wiederholungen angesehen werden. Die Konvertierung der absoluten in relative Zahlen bietet den Vorteil des Ausgleichs temporärer und lokaler Schwankungen von Populationsgrößen (Wehnert und Müller 2012; Wehnert 2014), birgt jedoch auch die Gefahr der Überbewertung sehr geringer Fangzahlen. Um dies zu vermeiden, erfolgte eine zielarten- bzw. -gruppenspezifische Auswahl jener Leerungstermine, an denen im jeweiligen Versuch mindestens 45 Individuen gefangen wurden. Je nach Anzahl der so ausgewählten Leerungstermine ergeben sich unter Berücksichtigung der fünf Falleninseln je Versuch Wiederholungsanzahlen zwischen 5 (nur an einem Leerungstermin wurden ausreichend Individuen gefangen) und 30 (an allen sechs Leerungsterminen wurden ausreichend Individuen gefangen) je Testvariante. In den folgenden Abbildungen sind dabei aus Gründen der Übersichtlichkeit signifikante Unterschiede zur Nullvariante nicht grafisch dargestellt und werden auch nur verbal beschrieben, von sie von Relevanz für die Interpretation der Ergebnisse bezüglich der potenziellen Repellentien sind.

Innerhalb der Fallenfänge wurden alle Borkenkäfer und bekannten Borkenkäferantagonisten bestimmt. Dies erfolgte im Allgemeinen bis zur Art, in manchen Fällen jedoch aus Zeit-, Diffizilitäts- oder Relevanzgründen nur bis zur Gattung bzw. im Fall der Histeridae (Stutzkäfer) nur bis zur Familie. Als sogenannte potenzielle Antagonisten wurden außerdem die Familien Elateridae (Schnellkäfer) und Staphylinidae (Kurzflügler) der Ordnung Coleoptera (Käfer), die Unterordnung Brachycera (Fliegen) der Ordnung Diptera (Zweiflügler), die Ordnung Hymenoptera (Hautflügler) (mit Ausnahme der staatenbildenden Arten) und die Heteroptera (Wanzen) erfasst. Für diese Taxa ist entweder bekannt, dass sie auch

Arten umfassen, die als Borkenkäferantagonisten agieren oder aufgrund ihrer Lebensweise ist bei einzelnen Arten eine Prädation von Borkenkäferentwicklungsstadien denkbar. Die Artbestimmung dieser Taxa ist aber in großen Teilen extrem schwierig und zeitaufwendig und kann mittels Expertenwissens geleistet werden. Die größte Relevanz innerhalb dieser Gruppe besitzen die Brachycera und die Hymenoptera. Auf die vollständige Darstellung der erfassten Artenspektren und Individuenzahlen in Form von Artenlisten wird aufgrund des Umfangs der Daten und der fehlenden Relevanz für die Zielstellung des Teilprojekts explizit verzichtet.

3.2.3. Ergebnisse

3.2.3.1. Borkenkäfer und deren Antagonisten an Gemeiner Fichte

Im Projektzeitraum fanden insgesamt fünf Versuche in den Jahren 2020 bis 2023 in Beständen der Gemeinen Fichte im Revier Hetzdorf im Tharandter Wald statt. Anders als bei den Versuchen in Gemeiner Kiefer und Rotbuche mussten dabei aufgrund zunehmender Schäden in den Beständen durch *Ips typographus* verschiedene Standorte genutzt werden, da die Versuche in möglichst schadfreien Beständen durchgeführt werden sollten. Des Weiteren wurden zwei Hauptzielarten bearbeitet. Die vier Versuche in den Jahren 2020 bis 2022 waren auf die Zielart *Ips typographus* ausgerichtet, wobei es im Jahr 2021 einen Haupt- und einen Nebenversuch gab. Für letzteren wurden von den Fängen nur die vier wichtigsten Arten der Borkenkäfer und Borkenkäferantagonisten bestimmt. Im Rahmen der Projektverlängerung wurde im Jahr 2023 ein weiterer Versuch mit der Zielart *Trypodendron lineatum* durchgeführt. Da dies ein Wechsel des Lockstoffs und mit Mitte März einen deutlich zeitigeren Versuchsbeginn erforderte, wird dieser Versuch im Anschluss getrennt von den anderen vier Versuchen betrachtet.

<u>Zielart *Ips typographus*</u>

Die Zielart *Ips typographus* war in allen drei Hauptversuchen in den Jahren 2020 bis 2022 mit 61.693, 35.606 und 86.361 Individuen in extrem hoher Anzahl vertreten. Zweithäufigste Art in allen drei Hauptversuchen war *Pityogenes chalcographus* (Kupferstecher oder Sechszähniger Fichtenborkenkäfer) mit 4.717, 7.165 und 2.376 Individuen. Entsprechend der gegenläufigen Entwicklungen der Individuenzahlen der beiden Arten im Jahr 2021 stellte *Ips typographus* dort nur 70 % des Gesamtfangs der Borkenkäfer und *Pityogenes chalcographus* 20 %, während diese Werte 2020 bei 91 und 7 % und 2022 bei 96 und 3 % lagen. Neben diesen beiden Hauptarten kamen in den drei Hauptversuchen noch jeweils mindestens 17 bis 34 weitere Borkenkäferarten je Versuch vor, wobei dies nur Mindestangaben sind, da die Gattungen *Crypturgus*, *Cryphalus*, *Hylastes* und *Pityophthorus* ganz oder teilweise nicht bis zur Art bestimmt wurden. Aufgrund der hohen Anzahl von Individuen der Gattung *Ips* konnte dort nur stichprobenartig eine Artkontrolle stattfinden, bei der nur

in äußerst wenigen Fällen *Ips cembrae* oder *Ips duplicatus* bestimmt wurden. In den Auswertungen sind alle *Ips*-Individuen daher der Art *typographus* zugeordnet, da die anderen beiden Arten weit unterhalb des Promillebereichs vertreten waren. Unter diesen weiteren Borkenkäferarten traten mit *Anisandrus dispar* (Ungleicher Holzbohrer), *Cyclorhipidion bodoanum*, *Ernoporicus fagi*, *Hylesinus fraxini* (Kleiner Bunter Eschenbastkäfer), *Lymantor aceris*, *Scolytus intricatus* (Eichensplintkäfer), *Scolytus multistriatus* (Kleiner Ulmensplintkäfer), *Taphrorychus bicolor* (Kleiner Buchenborkenkäfer), *Trypodendron domesticum* (Buchennutzholzborkenkäfer), *Xyleborinus saxesenii* (Kleiner Holzbohrer), *Xyleborus monographus* (Gehöckerter Eichenholzbohrer) und *Xylocleptes bispinus* (Waldrebenborkenkäfer) auch mehrere laubbaumbesiedelnde Arten mit bis zu 9 Individuen je Versuch sowie mit *Xylosandrus germanus* eine nadel- und laubbaumbesiedelnde Art mit bis zu 49 Individuen je Versuch auf.

Im Nebenversuch 2021, in dem nur die eingangs genannten vier Arten bestimmt wurden, fanden sich 29.579 Individuen von *Ips typographus* und 1.715 Individuen von *Pityogenes chalcographus*.

Die Verteilung der beiden häufigsten Borkenkäferarten *Ips typographus* und *Pityogenes chalcographus* auf die Testvarianten in den drei Hauptversuchen zeigt Abbildung 54 (linke und mittlere Spalte). Im Versuch 2020 wurde dabei mit drei der getesteten fünf potenziellen Repellentien auch tatsächlich eine höchst signifikante Fangreduktion im Vergleich zur reinen Lockstoffvariante erzeugt. Diese umfassten Eukalyptusöl, Octenol-Essigsäure und Oreganoöl ($p = 0{,}000$) und führten auf Basis der absoluten Zahlen zu einer Fangreduktion von 62, 40 und 45 %. Bezüglich *Pityogenes chalcographus* zeigte sich ein ähnliches Ergebnis für Eukalyptus- ($p = 0{,}000$) und Oreganoöl ($p = 0{,}002$) mit einer Fangreduktion von 74 und 57 %. Im Versuch 2021 erzeugte lediglich die Kombination der beiden Grünblattduftstoffe Hexenylacetat und Hexenol dieses erwünschte Ergebnis bei *Ips typographus* ($p = 0{,}005$, Fangreduktion = 41 %), während Bärlauchextrakt ($p = 0{,}002$) und Terpinen ($p = 0{,}000$) zu einer unerwünschten hoch bzw. höchst signifikanten Fangsteigerung führten. *Pityogenes chalcographus* reagierte 2021 sogar auf vier der fünf getesteten potenziellen Repellenzien mit einer hoch bzw. höchst signifikanten Fangsteigerung. Lediglich die Kombination der beiden Grünblattduftstoffe hatte keinen Einfluss auf das Fangergebnis im Vergleich zur reinen Lockstoffvariante. Allerdings konnten im nicht grafisch dargestellten Nebenversuch 2021 mit dem Stoff Decanal eine signifikante Fangreduktion für *Ips typographus* ($p = 0{,}023$) um 27 % und für *Pityogenes chalcographus* mit den Stoffen Decanal, Korianderöl und Salbeiöl eine höchst signifikante Fangreduktion um 37, 95 und 89 % erzielt werden ($p = 0{,}000$). Im Versuch 2022 konnte für *Ips typographus* wiederum mit vier der fünf getesteten potenziellen Repellentien das gewünschte Ergebnis einer Fangreduktion erzielt werden, die hoch signifikant für das mit einer höheren Abgaberate als im Vorjahr eingesetzte Decanal ($p = 0{,}006$) und höchst signifikant für alpha-Pinen, Eukalyptusöl-

Decanal und Eukalyptusöl-Oreganoöl ausfiel (p = 0,000). Dabei wurden im Vergleich zur reinen Lockstoffvariante 29 % bzw. zwischen 56 und 75 % weniger Individuen gefangen. Ein unerwünschtes Ergebnis wurde dagegen mit einer hoch signifikanten Fangsteigerung durch die Variante mit Estragol erzeugt (p = 0,005). Für *Pityogenes chalcographus* zeigte sich im Versuch 2022 ein sehr ähnliches Bild. Mit alpha-Pinen, Decanal, Eukalyptusöl-Decanal und Eukalyptusöl-Oreganoöl konnten höchst signifikante Fangreduktionen im Vergleich zur reinen Lockstoffvariante erreicht werden (p = 0,000), die absolut gesehen zwischen 71 und 91 % lagen. Estragol hatte diese Wirkung nicht, erzeugte anders als bei *Ips typographus* aber auch keine signifikante Fangsteigerung, sondern eine tendenzielle Fangreduktion.

Bei den weiteren Borkenkäferarten ist für den Versuch 2020 *Hylastes cunicularius* (Schwarzer Fichtenbastkäfer) zu erwähnen, der mit 506 Individuen die dritthäufigste Art darstellte. Analog zu *Ips typographus* und *Pityogenes chalcographus* zeigten sich auch für diese Art die geringsten Fanganteile im Vergleich zur reinen Lockstoffvariante in den Varianten mit Eukalyptusöl (8 %) und Oreganoöl (9 %). Im Versuch 2021 stellten die Gattungen *Crypturgus* (1.202 Individuen) und *Cryphalus* (1.129 Individuen) das dritt- bzw. vierthäufigste Taxon, die vermutlich hauptsächlich durch *Crypturgus cinereus* bzw. *Cryphalus piceae* und *Cryphalus abietis* vertreten waren. Bei *Crypturgus* spec. fällt unter der ansonsten gleichmäßigen Verteilung zwischen den Testvarianten (5-12 % des Gesamtfangs), inklusive der Nullvariante, der massive Peak in der Variante mit Terpinen auf, in der 52 % des Gesamtfangs nachgewiesen wurden. Ähnliches zeigte sich für *Cryphalus* spec. mit zwei auffälligen Peaks in den Varianten Hexenylacetat-Hexenol (51 %) und Bärlauchextrakt (41 %) unter ansonsten gleichmäßiger Verteilung (1-4 % des Gesamtfangs). Im Versuch 2022 sind es die Gattungen *Crypturgus* (792 Individuen) und *Hylastes* (236 Individuen), die das dritt- bzw. vierthäufigste Taxon darstellten. Hier ist für *Crypturgus* spec. mit 57 % des Gesamtfangs ein deutlicher Peak für die Variante mit Decanal sowie mit 21 % ein schwächer ausgeprägter Peak für die Variante mit alpha-Pinen zu erkennen, während in den restlichen Testvarianten zwischen 3 und 10 % des Gesamtfangs zu verzeichnen war. Für *Hylastes* spec. waren die geringsten Anteile in den Varianten mit Eukalyptusöl-Oreganoöl (9 %) und Eukalyptusöl-Decanal (11 %), während die Anteile für die anderen Testvarianten zwischen 17 und 23 % lagen.

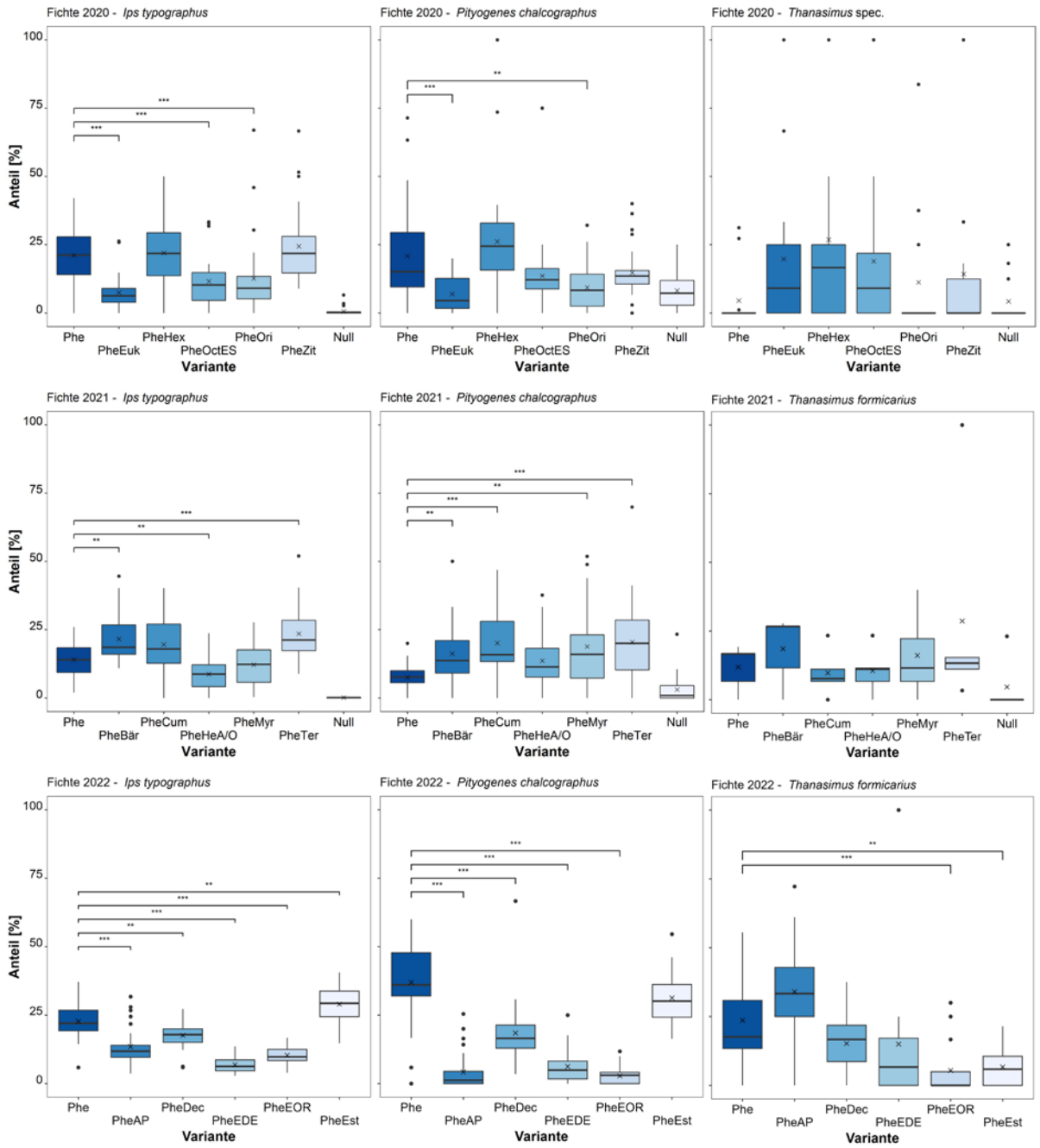

Abbildung 54: Anteile der Hauptzielart *Ips typographus* (linke Spalte) und der zweithäufigsten Borkenkäferart *Pityogenes chalcographus* (mittlere Spalte) sowie der wichtigsten Gattung bzw. Art der Borkenkäferantagonisten (rechte Spalte) je Falleninsel und Leerungsdatum in Abhängigkeit von der Testvariante, n = 10-30, ** = hoch signifikanter Unterschied mit p<=0,010, *** = höchst signifikanter Unterschied mit p<=0,001, Testvarianten: Phe = Pheroprax®; 2020: Euk = Eukalyptusöl, Hex = Hexenylacetat, Oct = Octenol, ES = Essigsäure, Zit = Thymianöl; 2021: Bär = Bärlauchextrakt, Cum = Cumarin, HexA/O = Hexenylacetat und Hexenol, Myr = Myrcen, Ter = Terpinen; 2022: AP = alpha-Pinen, Dec = Decanal, EDE = Eukalyptusöl und Decanal, EOR = Eukalyptusöl und Oreganoöl, Est = Estragol

Im Bereich der Borkenkäferantagonisten zeigte sich in den drei Hauptversuchen ausgehend von 682 Individuen im Jahr 2020 eine deutliche Steigerung der Anzahl auf 2.252 Individuen im Jahr 2021 und 2.068 Individuen im Jahr 2022. Diese wurden von mindestens 22 bis 27 unterschiedlichen Arten je Jahr gestellt. Da die Gattungen *Cerylon* und *Epuraea* sowie die Familie Histeridae, hauptsächlich vertreten durch *Paromalus parallelepipedus*, nicht bis zur Art bestimmt wurden, stellt diese Angabe eine Mindestanzahl dar. Die beiden Hauptzielarten *Thanasimus femoralis* und *Thanasimus formicarius* waren in allen drei Versuchen vertreten, allerdings mit stark schwankenden Individuenzahlen und einem unterschiedlichen Verhältnis zueinander. So stellte *Thanasimus femoralis* im Versuch 2020 mit 111 Individuen (16 % des Gesamtfangs der Borkenkäferantagonisten) und im Versuch 2022 mit 703 Individuen (34 % des Gesamtfangs) jeweils die zweithäufigste Art dar, während er im Versuch 2021 mit 25 Individuen (1 % des Gesamtfangs) lediglich auf Platz 9 der Artenliste stand. *Thanasimus formicarius* wurde dagegen in allen drei Versuchen mit 71, 194 und 218 Individuen jeweils als dritthäufigste Art nachgewiesen und nahm Anteile zwischen 10 und 13 % am Gesamtfang der Borkenkäferantagonisten ein.

Die statistische Auswertung für die beiden *Thanasimus*-Arten konnte in Abhängigkeit von den Individuenzahlen und den in Abschnitt 3.2.2.3 erläuterten Festlegungen für den Versuch 2020 nur für *Thanasimus* spec., für den Versuch 2021 für *Thanasimus formicarius* und für den Versuch 2022 für beide Arten erfolgen. Die Ergebnisse zur Verteilung auf die Testvarianten zeigt Abbildung 54 (rechte Spalte). Auf Gattungsebene ist dabei für den Versuch 2020 keine signifikante Reaktion erkennbar. Deskriptiv betrachtet zeigte sich jedoch für *Thanasimus femoralis* eine deutliche Präferenz für die Variante mit Oreganoöl, in der 73 % des Gesamtfangs der Art verzeichnet wurden. *Thanasimus formicarius* wies in dieser Variante dagegen mit nur 4 % den geringsten Anteil auf, während mit 21 und 23 % des Gesamtfangs der Art die höchsten Anteile in der reinen Lockstoffvariante und in der Variante mit Hexenol erfasst wurden. Im Versuch 2021 zeigte die statistische Auswertung keine signifikante Reaktion von *Thanasimus formicarius* auf die Testvarianten. Etwa 6 % des Gesamtfangs wurden in der Nullvariante nachgewiesen, auf die restlichen Varianten fielen jeweils zwischen 13 und 18 % des Gesamtfangs. Für den Versuch 2022 ergibt die statistische Auswertung für *Thanasimus femoralis* ebenfalls keine signifikanten Reaktionen. Auf die Testvarianten verteilen sich zwischen 10 % (alpha-Pinen) und 21 % (Estragol) des Gesamtfangs der Art. Im Gegensatz dazu reagierte *Thanasimus formicarius* mit einer hoch bzw. höchst signifikanten Fangreduktion auf die Varianten mit Estragol ($p = 0{,}006$) und Eukalyptusöl-Oreganoöl ($p = 0{,}001$).

Auch im Nebenversuch 2021 traten *Thanasimus femoralis* und *Thanasimus formicarius* mit jeweils 55 und 199 Individuen auf und zeigten damit analog zum Hauptversuch 2021 ein zu den beiden anderen Versuchsjahren umgekehrtes Verhältnis. Die Individuenzahlen ermöglichten nur eine statistische Auswertung von *Thanasimus formicarius* mit einem n von

10 und ergaben keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen den Testvarianten. Auf Basis der absoluten Fangzahlen zeigte sich jedoch sowohl für *Thanasimus formicarius* als auch für *Thanasimus femoralis* eine tendenzielle Repellenz von Decanal (9 % bzw. 4 % des Gesamtfangs der jeweiligen Art. Die höchsten Anteile von *Thanasimus formicarius* wurden in der Variante mit Korianderöl (34 %) festgestellt, die von *Thanasimus femoralis* in Retterspitz Äußerlich (49 %).

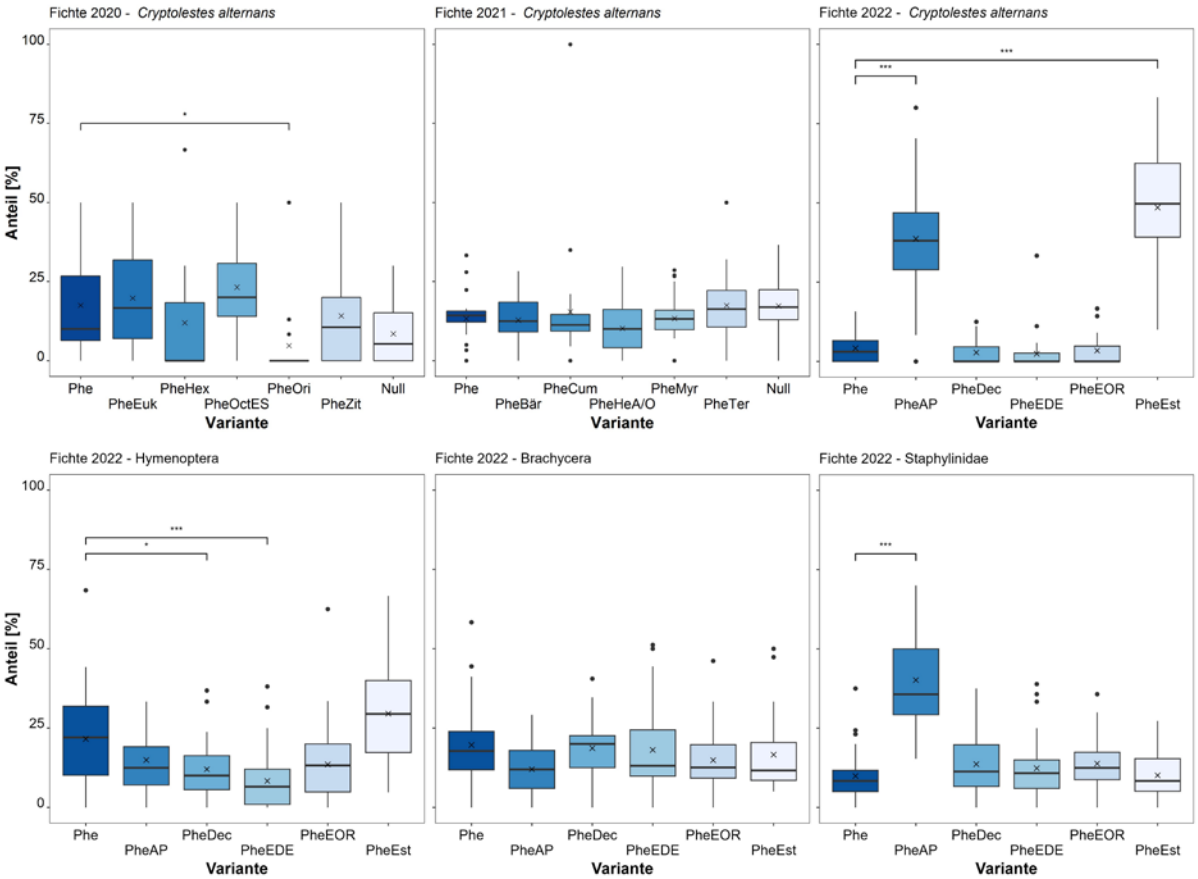

Abbildung 55: Anteile der häufigsten Borkenkäferantagonistenart *Cryptolestes alternans* (obere Reihe) und ausgewählter Gruppen der erfassten potenziellen Borkenkäferantagonisten (untere Reihe) je Falleninsel und Leerungsdatum in Abhängigkeit von der Testvariante, n = 15-30, * = signifikanter Unterschied mit p<=0,05, ** = hoch signifikanter Unterschied mit p<=0,010, *** = höchst signifikanter Unterschied mit p<=0,001, Testvarianten: Phe = Pheroprax®; 2020: Euk = Eukalyptusöl, Hex = Hexenylacetat, Oct = Octenol, ES = Essigsäure, Zit = Thymianöl; 2021: Bär = Bärlauchextrakt, Cum = Cumarin, HexA/O = Hexenylacetat und Hexenol, Myr = Myrcen, Ter = Terpinen; 2022: AP = alpha-Pinen, Dec = Decanal, EDE = Eukalyptusöl und Decanal, EOR = Eukalyptusöl und Oreganoöl, Est = Estragol

Häufigste Art bei den Borkenkäferantagonisten waren jedoch nicht die Vertreter der Gattung *Thanasimus*, sondern in allen drei Hauptversuchen der zur Familie Laemophloeidae (Halsplattkäfer) gehörende *Cryptolestes alternans* mit 210, 1.505 und 764 Individuen und Anteilen zwischen 31 und 67 % am Gesamtfang der Borkenkäferantagonisten. Die Verteilung auf die Testvarianten ist in Abbildung 55 (obere Reihe) dargestellt. Dabei zeigte sich 2020 eine signifikante Fangreduktion um 83 % für die Variante mit Oreganoöl (p = 0,034), 2021 keinerlei signifikante Reaktionen auf die getesteten potenziellen Borkenkäferrepellentien und 2022 höchst signifikante Fangsteigerungen durch alpha-Pinen und Estragol (p = 0,000), wo im Durchschnitt die 10-fache Menge an Individuen im Vergleich zur reinen Lockstoffvariante gefangen wurden. Erwähnenswert ist außerdem das Auftreten von *Nemozoma elongatum*, einer Art der Familie Trogossitidae (Jagdkäfer). Mit 39 Individuen nahm diese Art im Versuch 2020 nur Platz 9 auf der Artenliste, stieg dann aber in ihrem zahlenmäßigen Auftreten deutlich an und war mit 267 Individuen im Versuch 2021 zweithäufigste und mit 111 Individuen im Versuch 2022 vierthäufigste Art der Borkenkäferantagonisten. Die deskriptive Betrachtung der Verteilung der Art auf die Testvarianten in den beiden Versuchen mit höheren Individuenzahlen lässt keine signifikanten Reaktionen vermuten. Mit 32 % am Gesamtfang wurde der höchste Anteil in der Variante mit Bärlauchextrakt verzeichnet, während die anderen Testvarianten, inklusive der Nullvariante, jeweils zwischen 7 und 14 % aufwiesen. Im Versuch 2022 wurde mit 31 % der höchste Anteil des Gesamtfangs in der Variante mit Decanal nachgewiesen, während die anderen Testvarianten jeweils zwischen 11 und 21 % enthielten.

Bei den potenziellen Borkenkäferantagonisten (siehe Abschnitt 3.2.2.3) stiegen die nachgewiesenen Individuenzahlen dieser Gruppe in den drei Hauptversuchen jährlich von 3.268 im Jahr 2020 über 3.633 im Jahr 2021 auf 6.237 Individuen im Jahr 2022 an. Die Hymenoptera stellten dabei sowohl im Jahr 2020 als auch 2022 mit 33 % und 60 % den größten Anteil am Gesamtfang. Bemerkenswert ist dabei die ausgesprochen hohe Individuenzahl von 3.735 Individuen im Versuch 2022, die Ursache für den erwähnten Anstieg der Individuenzahlen der potenziellen Antagonisten in diesem Jahr ist. Im Versuch 2021 waren die Hymenoptera dagegen mit 536 Individuen und einem Anteil von 15 % am Gesamtfang nur dritthäufigstes Taxon. Eine große Rolle spielten auch die Brachycera, die mit 22 % und 16 % in den Jahren 2020 und 2022 das zweithäufigste Taxon darstellten. Im Versuch 2021 stieg deren Anzahl auf 1.458 Individuen an, was einem Anteil von 40 % am Gesamtfang entspricht und sie zum häufigsten Taxon im Versuch machte.

Die statistische Auswertung der erfassten Taxa der potenziellen Borkenkäferantagonisten zeigte bezüglich deren Reaktion auf die Testvarianten bis auf zwei Ausnahmen keinerlei signifikante Wirkung. Beispielhaft ist in Abbildung 55 (untere Reihe, mittig) die Verteilung der Brachycera auf die Testvarianten im Versuch 2022 abgebildet. Die einzigen beiden

Ausnahmen in allen drei Hauptversuchen betrafen die Hymenoptera und die Staphylinidae im Versuch 2022. So zeigte sich für die Hymenoptera eine signifikante Fangreduktion für die Variante mit Decanal (p = 0,028) und eine höchst signifikante Fangreduktion für die Variante mit Eukalyptusöl-Decanal (p = 0,000) im Vergleich zur reinen Lockstoffvariante. Für die Staphylinidae wurde dagegen eine höchst signifikante Fangsteigerung für die Variante mit alpha-Pinen nachgewiesen (p = 0,000), was dem baumartenübergreifenden Trend für mehrere Antagonisten und potenziellen Antagonisten entspricht.

Zielart *Trypodendron lineatum*

Im Versuch 2023 wurden insgesamt 35.142 Individuen aus der Unterfamilie der Borkenkäfer nachgewiesen, an denen die Zielart *Trypodendron lineatum* einen Anteil von 43 % einnahm. Daneben kamen mindestens weitere 16 Arten vor. Diese Angabe ist eine Mindestangabe, da die Gattungen *Cryphalus*, *Crypturgus*, *Hylastes* und *Pityophthorus* nicht bis zur Art bestimmt wurden. Erwartungsgemäß ist ein Großteil der aufgetretenen Borkenkäfer den nadelbaumbesiedelnden Arten zuzuordnen. Lediglich vier Arten sind Laubbaumbesiedler: *Anisandrus dispar*, *Xyleborinus saxesenii* und *Xyleborus monographus*, die aber nur mit 1-9 Individuen auftraten sowie der mit der Hauptzielart eng verwandte *Trypodendron domesticum* (Laubnutzholzborkenkäfer). Dieser reagiert ebenfalls auf das Lockstoffpräparat Linosan® und wurde dementsprechend in einer höheren Anzahl, mit 371 Individuen, erfasst. Zu erwähnen ist außerdem *Xylosandrus germanus*, der zu den wenigen Arten gehört, die sowohl Nadel- als auch Laubbäume besiedeln. Betroffen sind davon vor allem Gemeine Fichte, Rotbuche und die Eichen (Galko et al. 2018, Schmidt 2004). Die Art wurde im Versuch mit 324 Individuen nachgewiesen, was einem Anteil am Gesamtfang der Borkenkäfer von 0,9 % entspricht.

Die Verteilung von *Trypodendron lineatum* auf die Testvarianten zeigt Abbildung 56 (obere Reihe, links). Mit vier der getesteten potenziellen Repellentien konnte dabei eine Fangreduktion im Vergleich zur reinen Lockstoffvariante erzielt werden. Diese fiel für Decanal signifikant (p = 0,027), für Hexenylacetat-Hexenol, Octenol-Essigsäure und Thymianöl höchst signifikant aus (p = 0,000). Zwei der Substanzen erzeugten dabei eine Fangreduktion von mindestens 50 % auf Basis der absoluten Fangzahlen: Octenol-Essigsäure (61 %) und Thymianöl (57 %). Eukalyptusöl und Verbenon hatten dagegen keinen Einfluss auf das Fangergebnis. Die Reaktion der verwandten, aber laubbaumbesiedelnden Art *Trypodendron domesticum* ist grundsätzlich ähnlich gewesen, weist aber zwei wesentliche Unterschiede auf (Abbildung 56, obere Reihe, mittig). So wurde sowohl mit Eukalyptusöl als auch mit Verbenon eine höchst signifikante Fangreduktion erzeugt (p = 0,000). Des Weiteren konnten alle fünf Substanzen, die zu einer Fangreduktion im Vergleich zur Lockstoffvariante führten, den Fang um mindestens 50 % reduzieren. Das Maximum wurde dabei mit Eukalyptusöl (90 %) und Thymianöl (91 %) erreicht.

Weitere auffällige Ergebnisse aus dem Bereich der nadelbaumbesiedelnden Borkenkäfer zeigten sich für die Gattung *Cryphalus*, die mit 17.630 Individuen die Hälfte des Gesamtfangs der Borkenkäfer stellte und vermutlich ausschließlich mit den beiden Arten *Cryphalus piceae* und *Cryphalus abietis* vertreten war. Die statistische Analyse der Fangdaten ergab mit einer Ausnahme für alle getesteten potenziellen Repellentien eine signifikante bis höchst signifikante Fangreduktion (p = 0,016-0,000) mit bis zu 98 % auf Basis der absoluten Fangzahlen im Vergleich zur reinen Lockstoffvariante (Abbildung 56, obere Reihe, rechts). Einzige Ausnahme war die gegenteilige Reaktion auf die Kombination der Grünblattduftstoffe Hexenylacetat und Hexenol, die zu einer höchst signifikanten Fangsteigerung führte (p = 0,000). In diesen Fallen wurde mit insgesamt 11.178 Individuen die 14-fache Menge der Fallen mit der reinen Lockstoffvariante gefangen. Es könnte vermutet werden, dass die vorzugsweise Besiedlung von Baumkronen, d. h. dem Ort mit der höchsten Grünblattduftstoffemission am Baum, Ursache dafür ist. Dafür würde auch sprechen, dass sich bei *Pityogenes chalcographus*, der im Versuch mit 70 Individuen nachgewiesen wurde und ebenfalls vorzugsweise Kronenholz besiedelt, ein ähnliches Bild zeigte. Auf Basis der absoluten Zahlen wurde mit einem Anteil von 39 % am Gesamtfang der Art die meisten Individuen in den Fallen mit der Grünblattduftstoffkombination gefangen. Die statistische Auswertung ergab sogar trotz der geringen Wiederholungsanzahl von 5 eine hoch signifikante Fangsteigerung im Vergleich zur reinen Lockstoffvariante (p = 0,005) (Abbildung 56, untere Reihe rechts). Für das dritthäufigste Taxon nach *Cryphalus* spec. und *Trypodendron lineatum*, *Hylurgops palliatus* (Gelbbrauner Fichtenbastkäfer), der mit 757 Individuen nachgewiesen wurde, zeigte sich auf Basis der absoluten Fangzahlen mit einem Anteil von 45 % am Gesamtfang ein deutliches Maximum in der Variante mit Eukalyptusöl. In der statistischen Auswertung stellte sich dieses jedoch trotz einer Wiederholungsanzahl von 15 als nicht signifikant dar (p = 0,186) (Abbildung 56, untere Reihe, links). Als letzte Borkenkäferart ist in Abbildung 56 (untere Reihe, mittig) außerdem noch die Verteilung von *Xylosandrus germanus* auf die Testvarianten dargestellt. Mit vier der getesteten potenziellen Repellentien konnte eine signifikante bis höchst signifikante Fangreduktion im Vergleich zur reinen Lockstoffvariante erzielt werden (p = 0,047-0,000). Die stärkste Fangzahlreduktion wurde dabei mit Hexenylacetat-Hexenol (91 %) und Thymianöl (93 %) erreicht.

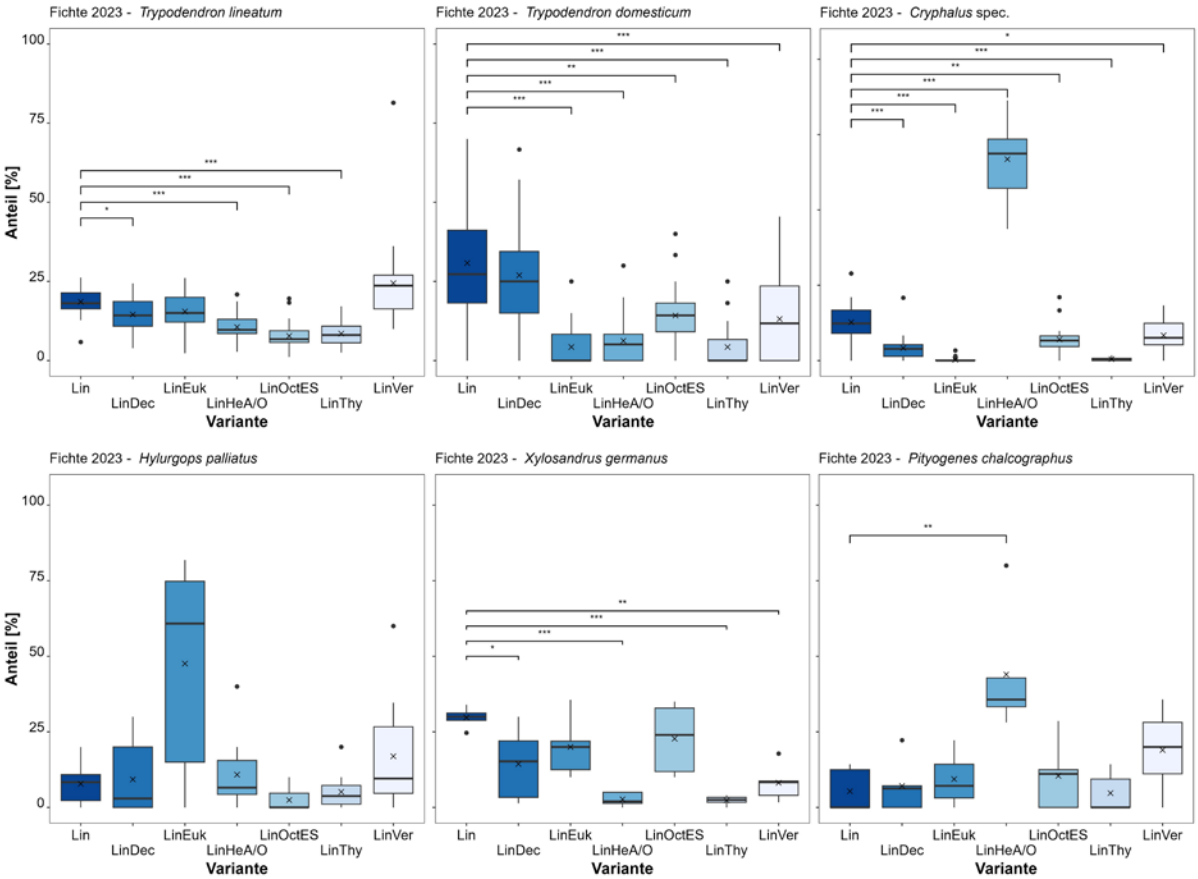

Abbildung 56: Anteile der Hauptzielart *Trypodendron lineatum* und der verwandten laubbaumbesiedelnden Art *Trypodendron domesticum* sowie weiterer häufiger bzw. auffälliger Borkenkäferarten je Falleninsel und Leerungsdatum in Abhängigkeit von der Testvariante, n = 5-25, * = signifikanter Unterschied mit p<=0,05, ** = hoch signifikanter Unterschied mit p<=0,010, *** = höchst signifikanter Unterschied mit p<=0,001, Testvarianten: Lin = Linosan®; 2020: Dec = Decanal, Euk = Eukalyptusöl, HexA/O = Hexenylacetat und Hexenol, Oct = Octenol, ES = Essigsäure, Thy = Thymianöl, Ver = Verbenon

Die Borkenkäferantagonisten waren im Versuch 2023 mit 719 Individuen aus mindestens 18 Arten vertreten. Die tatsächliche Artanzahl liegt dabei höher, da die Familie Histeridae (106 Individuen) sowie die Gattungen *Cerylon* (2 Individuen) und *Epuraea* (19 Individuen) nicht bis zur Art bestimmt wurden. Häufigste Art mit 240 Individuen und einem Anteil von 33 % am Gesamtfang der Antagonisten war *Cryptolestes alternans*. Auf Basis der absoluten Zahlen zeigte sich das Minimum des Fangs mit 13 % in der Variante mit Thymianöl, das Maximum mit 57 % in der Variante mit Octenol-Essigsäure. Die statistische Auswertung, die aufgrund der in Abschnitt 3.2.2.3 erläuterten Festlegungen nur mit einem n von 5 stattfinden konnte, zeigt für Octenol-Essigsäure eine hoch signifikante Fangsteigerung im Vergleich zur reinen Lockstoffvariante (p = 0,006) (Abbildung 57, links). Für die zweithäufigste Art, *Thanasimus formicarius*, die mit 210 Individuen nachgewiesen wurde, zeigte sich in der statistischen Analyse, die ebenfalls nur mit einem n von 5 durchgeführt werden

konnte, keine signifikante Reaktion auf die eingesetzten potenziellen Borkenkäferrepellentien (Abbildung 57, mittig). Absolut gesehen wurden mit 8 % des Gesamtfangs die wenigsten Individuen in der Variante mit Eukalyptusöl und mit 21 % des Gesamtfangs die meisten Individuen in der reinen Lockstoffvariante gefangen.

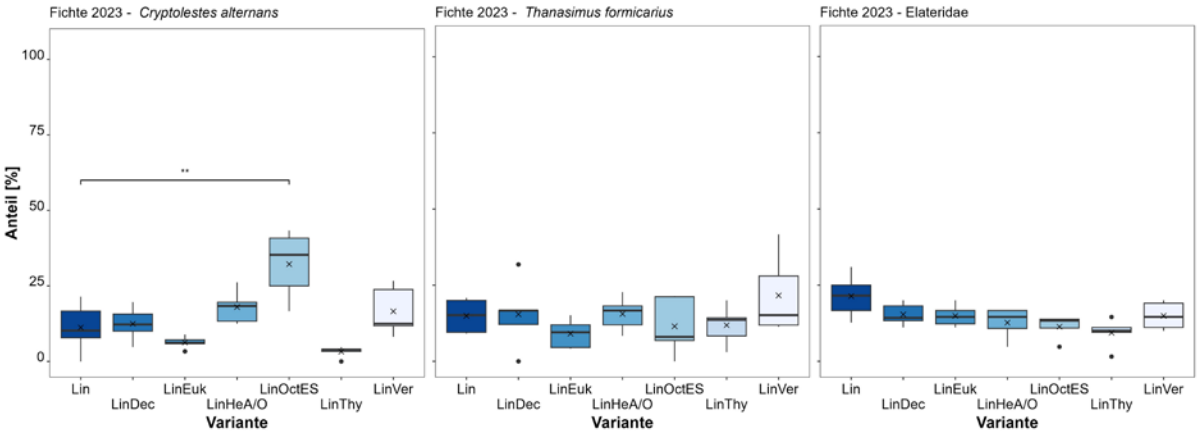

Abbildung 57: Anteile der beiden häufigsten Borkenkäferantagonisten *Cryptolestes alternans* und *Thanasimus formicarius* sowie des häufigsten Taxons der erfassten potenziellen Borkenkäferantagonisten je Falleninsel und Leerungsdatum in Abhängigkeit von der Testvariante, n = 5, ** = hoch signifikanter Unterschied mit p<=0,010, Testvarianten: Lin = Linosan®; 2020: Dec = Decanal, Euk = Eukalyptusöl, HexA/O = Hexenylacetat und Hexenol, Oct = Octenol, ES = Essigsäure, Thy = Thymianöl, Ver = Verbenon

Auffällig im Versuch 2023 war die mit 455 Individuen sehr niedrige Anzahl an potenziellen Borkenkäferantagonisten, welche zu 53 % von der Familie Elateridae gestellt wurde. Diese war relativ gleichmäßig über die Testvarianten verteilt. Die statistische Analyse, die jedoch auch nur mit einem n von 5 durchgeführt werden konnte, ergab keine signifikanten Unterschiede (p = 1,000) (Abbildung 57). Auch die Verteilungen der anderen erfassten Taxa lassen keine signifikanten Unterschiede vermuten.

3.2.3.2. Borkenkäfer und deren Antagonisten an Gemeiner Kiefer

Im Projektzeitraum fanden insgesamt drei Versuche in den Jahren 2020 bis 2022 in einem Bestand der Gemeinen Kiefer an einem Standort im Revier Weißhaus in der Nähe von Tröbitz statt. Die Hauptzielart *Ips sexdentatus* war in allen drei Versuchsjahren mit 8.516, 5.048 und 5.444 Individuen in hoher Anzahl vorhanden und stellte zwischen 86 und 95 % des Gesamtfangs der Borkenkäfer dar. Neben *Ips sexdentatus* wurden je Versuch weitere 20 bis 30 Borkenkäferarten erfasst, wobei diese Angaben Mindestzahlen darstellen, da die Gattungen *Crypturgus*, *Cryphalus*, *Hylastes* und *Pityophthorus* nicht oder teilweise nicht bis zur Art bestimmt wurden. Bis auf insgesamt sechs Arten sind diese weiteren Borkenkäfer den Nadelbaumbesiedlern zuzuordnen. Als laubbaumbesiedelnde Arten wurden

Hylesinus fraxini, *Lymantor aceris*, *Scolytus intricatus*, *Scolytus multistriatus*, *Xyleborus dryographus* (Gekörnter Nutzholzborkenkäfer) und *Xyleborinus saxesenii* erfasst, welche hauptsächlich mit den Wirtsbaum- bzw. straucharten Esche, Eiche, Haselnuss und Ulme assoziiert sind, aber nur mit maximal 4 Individuen je Versuch erfasst wurden.

Eine Übersicht der Fangergebnisse für *Ips sexdentatus* in Abhängigkeit von der Testvariante zeigt Abbildung 58 in der linken Spalte. Dabei konnte im Versuch 2020 mit drei der fünf getesteten potenziellen Repellentien eine zielgemäße höchst signifikante Fangreduktion im Vergleich zur reinen Lockstoffvariante erzielt werden (p = 0,000). Diese betrug auf Basis der absoluten Fangzahlen 54 % für die Variante mit Octenol-Essigsäure, 47 % für Eukalyptusöl und 42 % für Oreganoöl. Im Versuch 2021 konnte eine Fangreduktion dagegen nur mit einer Substanz, mit Myrcen, erreicht werden (p = 0,000) und betrug 42 %. Auch im Versuch 2022 erzielten wiederum drei Substanzen eine Fangreduktion. Die Kombination aus Octenol, Essigsäure und Eukalyptusöl, eine Mischung aus Substanzen, die 2020 sehr gute Ergebnisse erzeugten sowie die Kombination aus Octenol, Essigsäure und Salbeiöl, welches 2021 erfolgreich für *Pityogenes chalcographus* getestet wurde, führten zu einer höchst signifikanten (p = 0,000), der erstmalige Test von Decanal zu einer hoch signifikanten Reduktion (p = 0,005). Auf Basis der absoluten Fangzahlen betrug die Reduktion 46 bzw. 45 % sowie 35 %. Dagegen wurde mit dem Einsatz einer hohen Konzentration von alpha-Pinen ein nicht dem Ziel des Teilprojekts entsprechendes Ergebnis erreicht. Während diese hohe Konzentration sowohl bei einem Versuch im Teilprojekt 1 als auch bei dem Versuch in diese Teilprojekt bei *Ips typographus* zu einer signifikanten Fangreduktion führte, verursachte es hier eine Fangsteigerung um 73 %, obwohl das stärker in Gemeiner Fichte als in Gemeiner Kiefer enthaltene (-)-alpha-Pinen verwendet wurde.

Weitere nennenswerte bzw. auffällige Fangergebnisse bei den nadelbaumbesiedelnden Borkenkäfern zeigten sich im Versuch 2020 bezüglich der Arten *Hylastes attenuatus* und *Pityophthorus pubescens*, die nach *Ips sexdentatus* die zweit- bzw. dritthäufigste Arten waren, jedoch insgesamt mit 171 bzw. 68 Individuen in erheblich geringeren Zahlen nachgewiesen wurden. Für *Hylastes attenuatus* konnte dennoch eine statistische Analyse durchgeführt werden, wobei die Anzahl der Wiederholungen mit 5 als sehr gering einzuschätzen ist. Wie in Abbildung 59 (obere Reihe, links) ersichtlich, erzeugte Eukalyptusöl hier im Gegensatz zu *Ips sexdentatus* eine signifikante (p = 0,028) und Zitronenöl eine tendenzielle Fangsteigerung. Dagegen wurden von *Pityophthorus pubescens* 81 % des Gesamtfangs in der Variante mit Octenol-Essigsäure nachgewiesen, was eine Affinität für stärker zersetztes Holz vermuten lässt. Aufgrund der geringen Individuenzahlen der beiden Arten und keinen bekannten Schadensmeldungen sind diese Ergebnisse für die positive Bewertung der genannten Stoffe bezüglich *Ips sexdentatus* jedoch nicht abträglich. Im Versuch 2021 stellte mit *Ips acuminatus* (Sechszähniger Kiefernborkenkäfer) ein enger Verwandter von

Ips sexdentatus die zweithäufigste Art mit insgesamt 132 Individuen dar, welcher mit Anteilen zwischen 11 und 18 % relativ gleichmäßig über alle Testvarianten im Versuch verteilt war. Im Versuch 2022 war *Ips acuminatus* mit 166 Individuen die dritthäufigste Art und zeigte eine klare Präferenz für alpha-Pinen (45 % des Gesamtfangs), während Decanal offensichtlich eine repellente Reaktion verursachte (1,8 % des Gesamtfangs). Des Weiteren zeigt der Vergleich zwischen den Varianten mit einer Kombination aus Octenol, Essigsäure und Eukalyptusöl (3,6 % des Gesamtfangs) mit der Variante mit einer Kombination aus Octenol, Essigsäure und Salbeiöl (23 % des Gesamtfangs), dass offensichtlich auch vom Eukalyptusöl eine repellente Reaktion erzeugt wird. Die statistische Auswertung für diese Art konnte jedoch aufgrund der im Abschnitt 3.2.2.3 erläuterten Festlegungen nur mit einem einzigen Leerungsdatum, d. h. mit einem n von 5 erfolgen und ergab vermutlich aufgrund dieses sehr geringen Stichprobenumfangs keine statistisch signifikanten Unterschiede (p = 0,008-1,000) (Abbildung 59, obere Reihe, mittig). Auch für die Gattung *Crypturgus*, die nicht bis zur Art bestimmt, aber vermutlich zu einem erheblichen Teil von nur einer Art gestellt wurde und mit insgesamt 439 Individuen das zweithäufigste Taxon im Versuch 2022 war, fingen sich auffällige 47 % in der Variante mit alpha-Pinen, während in den anderen Varianten nur zwischen 9 und 11 % des Gesamtfangs verzeichnet wurden. Dasselbe Bild zeigte sich noch deutlicher für *Orthotomicus longicollis* (Langhalsiger Kiefernborkenkäfer), der 2022 mit 137 Individuen die vierthäufigste Art war. Insgesamt wurden 77 % des Gesamtfangs in den Fallen mit alpha-Pinen getätigt, während in den anderen Varianten nur zwischen 1,5 und 11 % gefangen wurden. Dieser Unterschied ist statistisch höchst signifikant (p = 0,000) (Abbildung 59, obere Reihe, rechts). Es ist zu vermuten, dass alleine der Einsatz von alpha-Pinen zu der im Vergleich zu den Vorjahren (15 bzw. 7 Individuen) deutlichen Steigerung der Gesamtfangzahl dieser Art führte. *Orthotomicus longicollis* wurde erst 1981 erstmals in Deutschland nachgewiesen und kommt nur sehr lokal in den östlichen Bundesländern vor. Obwohl sie als seltene faunistische Besonderheit bezeichnet wird, zeigen sich als bisher unbekanntes Phänomen für Mitteleuropa seit 2007 kleinflächige Massenvermehrungen mit absterbenden Altkiefern in Ostsachsen (Sobczyk et al. 2023). Bemerkenswert ist abschließend der Nachweis der nichtheimischen, aus Nordamerika stammenden Art *Gnathotrichus materiarius*, die in allen drei Jahren, jedoch nur mit jeweils nur 2, 1 und 7 Individuen gefangen wurden. Nach Herting (1979) scheint die polyphag an Nadelbaumarten vorkommende Art in Mitteleuropa die Gemeine Kiefer als Wirtsbaum zu bevorzugen. Im Rahmen der Versuche im Teilprojekt konnten jedoch in den Versuchen in Gemeiner Fichte in den Jahren 2020 bis 2024 ebenfalls jeweils zwischen 2 und 6 Individuen nachgewiesen werden.

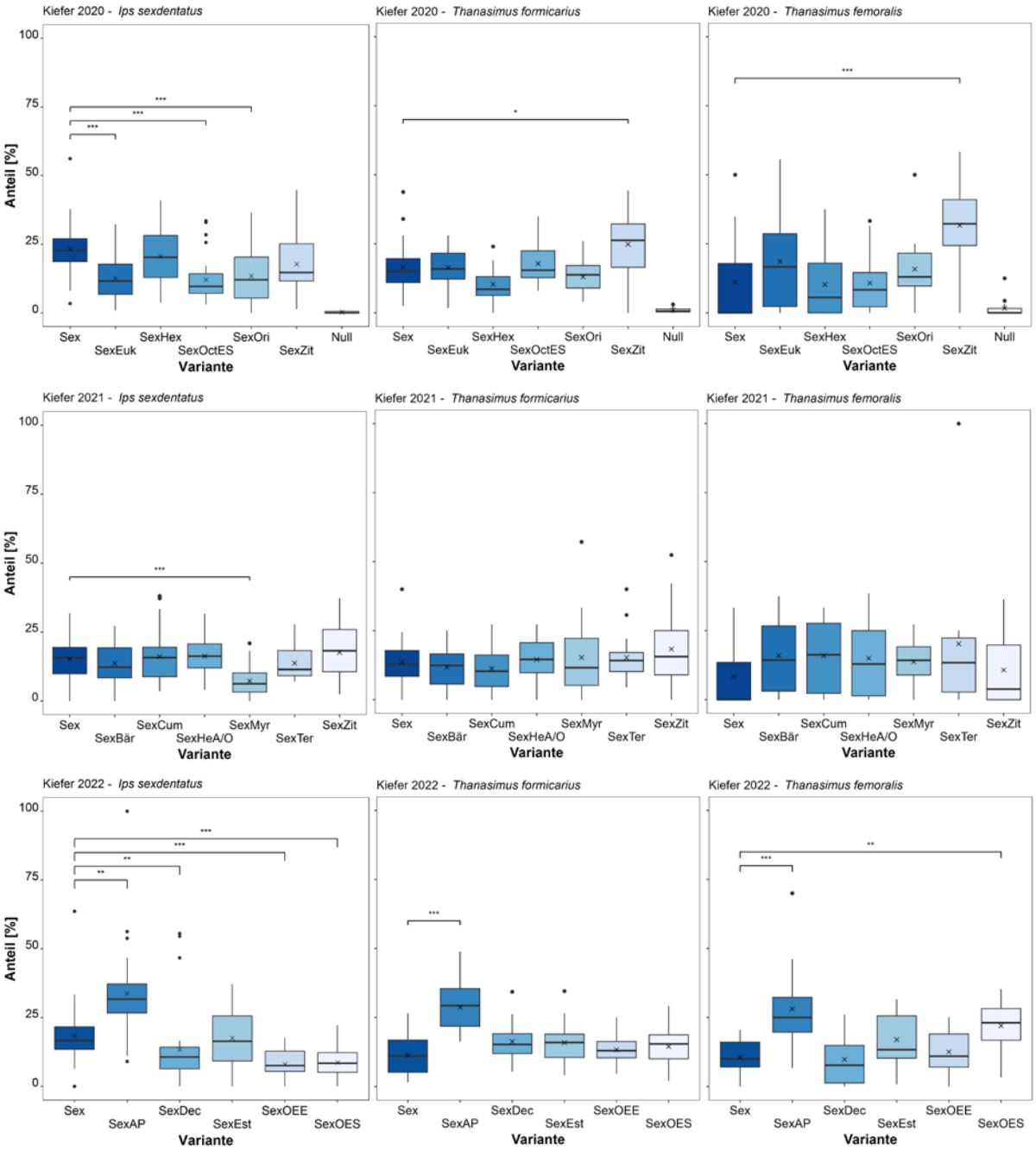

Abbildung 58: Anteile der Hauptzielart *Ips sexdentatus* (linke Spalte) und der häufigsten Antagonistenarten *Thanasimus formicarius* (mittlere Spalte) und *Thanasimus femoralis* (rechte Spalte) je Falleninsel und Leerungsdatum in Abhängigkeit von der Testvariante, n = 10-30, ** = hoch signifikanter Unterschied mit p<=0,010, *** = höchst signifikanter Unterschied mit p<=0,001, Testvarianten: Sex = Sexowit®; 2020: Euk = Eukalyptusöl, Hex = Hexenylacetat, Oct = Octenol, ES = Essigsäure, Ori = Oreganoöl, Zit = Zitronenöl; 2021: Bär = Bärlauchextrakt, Cum = Cumarin, HexA/O = Hexenylacetat + Hexenol, Myr = Myrcen, Ter = Terpinen, Zit = Zitronenöl; 2022: AP = alpha-Pinen, Dec = Decanal, Est = Estragol, OEE = Octenol + Essigsäure + Eukalyptusöl, OES = Octenol + Essigsäure + Salbeiöl

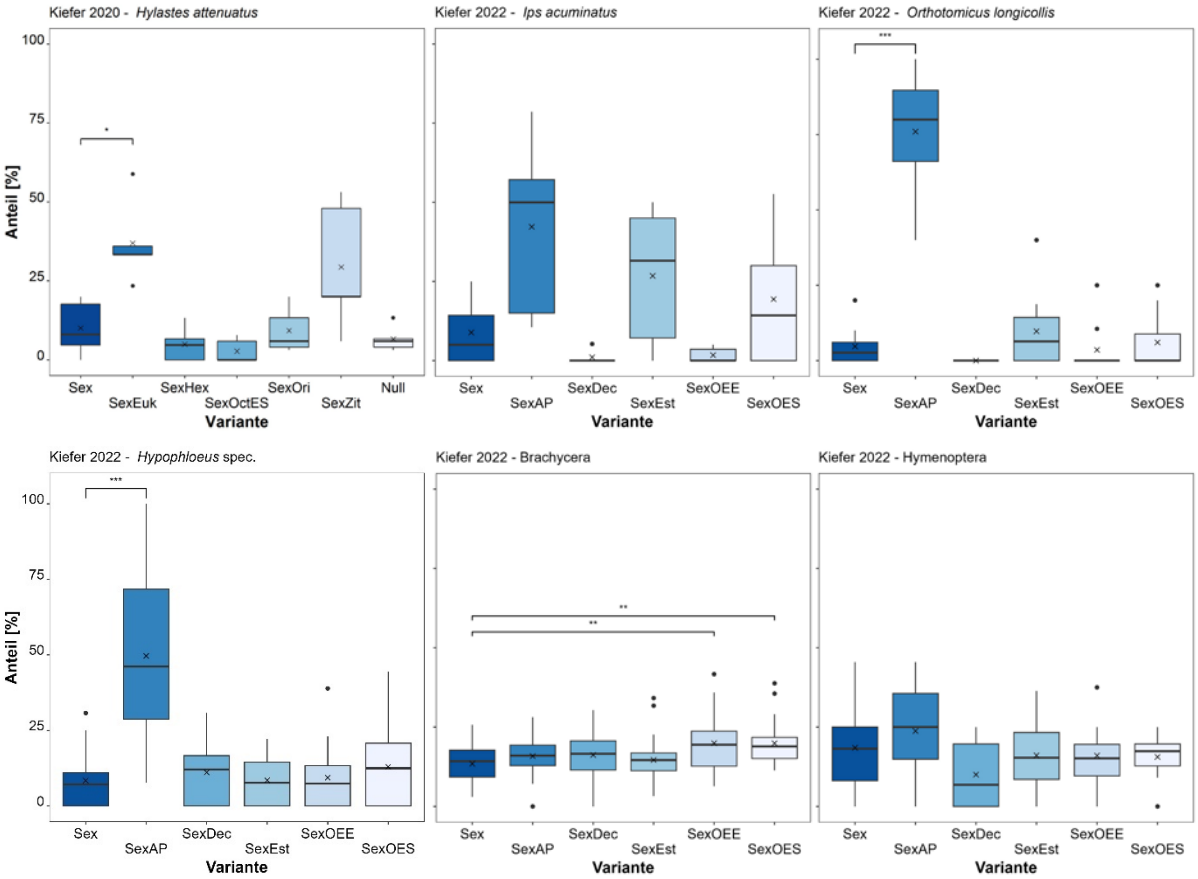

Abbildung 59: Anteile weiterer auffälliger Borkenkäferarten (obere Reihe) und Borkenkäferantagnisten bzw. potenzieller Antagonisten (untere Reihe) je Falleninsel und Leerungsdatum in Abhängigkeit von der Testvariante, n = 5-30, * = signifikanter Unterschied mit p<=0,05, ** = hoch signifikanter Unterschied mit p<=0,01, *** = höchst signifikanter Unterschied mit p<=0,001, Testvarianten: Sex = Sexowit®; 2020: Euk = Eukalyptusöl, Hex = Hexenylacetat, Oct = Octenol, ES = Essigsäure, Ori = Oreganoöl, Zit = Zitronenöl; 2022: AP = alpha-Pinen, Dec = Decanal, Est = Estragol, OEE = Octenol + Essigsäure + Eukalyptusöl, OES = Octenol + Essigsäure + Salbeiöl

Im Bereich der Antagonisten war in allen drei Versuchen die Gattung *Thanasimus* mit den beiden Arten *Thanasimus formicarius* und *Thanasimus femoralis* mit Anteilen zwischen 75 und 95 % am Gesamtfang der Gruppe am häufigsten. Innerhalb der Gattung überwog dabei *Thanasimus formicarius* in den Jahren 2020 und 2021 mit ca. 90 % deutlich, während im Jahr 2022 der Anteil von *Thanasimus femoralis* stark anstieg und *Thanasimus formicarius* nur noch 57 % des Gesamtfangs der Gattung stellte. Neben den beiden *Thanasimus*-Arten wurden je Versuch noch weitere 26 bis 28 Borkenkäferantagonistenarten erfasst, wobei diese Angaben Mindestzahlen darstellen, da die Gattungen *Cerylon*, *Cryphalus*, *Crypturgus* und *Hypophloeus* sowie die Familie Histeridae ganz oder teilweise nicht bis zur Art bestimmt wurden.

Die Fangergebnisse der beiden *Thanasimus*-Arten in Abhängigkeit von der Testvariante zeigen die mittlere und rechte Spalte in Abbildung 58. Während das Versuchsziel bezüglich der Borkenkäferarten die Fangreduktion darstellt, sollen die eingesetzten Substanzen

möglichst keine den Fang reduzierende Wirkung auf die Borkenkäferantagonistenarten haben bzw. idealerweise sogar eine attrahierende Wirkung aufweisen, da damit eine zweite schützende Komponente beim Einsatz der jeweiligen Substanz z. B. im Holzpolterschutz gegeben wäre. Wie in der genannten Abbildung ersichtlich, hatte in den drei Versuchen keine der getesteten Substanzen eine negative Auswirkung auf die beiden *Thanasimus*-Arten. Gut erkennbar am Versuch 2020, in dem noch eine Nullvariante mit einbezogen war, ist die bekannte Lockwirkung von Sexowit® auf die beiden Arten, die die Pheromonbestandteile ihrer Beutetierart für deren Lokalisierung nutzen. Dazu konnte im Jahr 2020 außerdem mit Zitronenöl für beide Arten und im Jahr 2022 mit der Kombination aus Octenol, Essigsäure und Salbeiöl für *Thanasimus femoralis* sogar noch signifikante bis höchst signifikante Fangsteigerungen im Vergleich zur reinen Lockstoffvariante erzielt werden, die im Durchschnitt auf Basis der absoluten Zahlen der 1,8- bis 3,6-fachen Fangmenge entsprechen. Der ebenfalls höchst signifikanten Fangsteigerung bei beiden Arten durch den Einsatz von alpha-Pinen im Versuch 2022 ist im Hinblick auf die Lockwirkung der Substanz auf *Ips sexdentatus* jedoch keine Praxisrelevanz beizumessen.

Dritthäufigste Antagonistenart im Versuch 2020 mit 48 Individuen war *Rhizophagus depressus* (Flacher Wurzelglanzkäfer), der die Varianten mit Eukalyptusöl (38 % des Gesamtfangs) und Zitronenöl (25 % des Gesamtfangs) bevorzugte, die auch bei Betrachtung aller weiteren nachgewiesenen Borkenkäferantagonistenarten als Gruppe präferiert wurden. Im Versuch 2021 stellte *Paromalus parallelepipedus* mit 39 Individuen die dritthäufigste Art im Bereich der Antagonisten dar. Fast ein Drittel davon wurden in der Variante mit Terpinen nachgewiesen. Repellente Reaktionen zeigten sich nicht. Im Versuch 2022 fällt die Gattung *Hypophloeus* auf, die mit vier Arten und insgesamt 318 Individuen nachgewiesen wurde, während in den Versuchen in den beiden Vorjahren nur insgesamt 37 bzw. 53 Individuen auftraten. Sowohl getrennt nach Arten als auch als Gattung betrachtet, zeigt sich der höchste Fanganteil in der Variante mit alpha-Pinen. Die statistische Auswertung der Gattung ergibt für diese Substanz sogar eine höchst signifikante Fangsteigerung im Vergleich zur reinen Sexowit®-Variante ($p = 0{,}000$) (Abbildung 59, untere Reihe, links).

Die Anzahl der in den Versuchen erfassten potenziellen Borkenkäferantagonisten stieg innerhalb der drei Versuchsjahre von 2.868 über 3.843 auf 10.236 Individuen. In allen drei Versuchen überwogen dabei die Elateridae mit Anteilen am Gesamtfang der Gruppe zwischen 30 und 58 % sowie die Brachycera mit Anteilen zwischen 26 und 47 %. Bei den Brachycera erzeugte keine der zugegebenen Substanzen signifikant reduzierte Fangzahlen im Vergleich zur reinen Lockstoffvariante. In den Versuchen 2020 und 2022 wurde sogar eine hoch signifikante Fangsteigerung durch Oreganoöl ($p = 0{,}005$) sowie durch die Kombinationen Octenol-Essigsäure-Eukalyptusöl und Octenol-Essigsäure-Salbeiöl festgestellt ($p = 0{,}006/0{,}002$) (Abbildung 59, untere Reihe, mittig). Bei ausschließlicher Betrach-

tung der ersten beiden Fangperioden im Versuchszeitraum 2020 gilt dies auch für Zitronenöl, mit dem überragende 75 % des Gesamtfangs getätigt wurden. Dieses Phänomen geht allerdings in den folgenden vier Fangperioden 2020 vollständig verloren bzw. dreht sich teilweise sogar ins Gegenteil. Bezüglich der Elateridae wurde dagegen im Versuch 2021 für die Kombination der beiden Grünblattduftstoffe Hexenylacetat und Hexenol (p = 0,021) sowie im Versuch 2022 für alpha-Pinen und die beiden Varianten mit Octenol und Essigsäure eine signifikante bzw. höchst signifikante Fangreduktion erzeugt (p = 0,003-0,031). Da sich innerhalb der Familie Elateridae jedoch nur wenige Arten als Larve im Holz entwickeln und sich räuberisch ernähren, besteht kaum eine Relevanz als potenzielle Borkenkäferantagonisten. Anders stellt sich das für die Ordnung der Hymenoptera da, welche auch zahlreiche teils hochspezialisierte Parasitoide umfasst. Hier zeigte sich in allen drei Versuchen weder ein signifikant negativer noch positiver Einfluss der Testvarianten auf die Fangzahlen, die sich in den drei Jahren konstant zwischen 255 und 269 bewegten. Beispielhaft ist in Abbildung 59 (untere Reihe, rechts) die Verteilung für den Versuch 2022 dargestellt, bei der sich die Anteile auf Basis der absoluten Fangzahlen bei den sechs Testvarianten zwischen 15 und 24 % bewegten.

3.2.3.3. Borkenkäfer und deren Antagonisten an Rotbuche

Im Projektzeitraum fanden insgesamt drei Versuche in den Jahren 2020 bis 2022 in einem Bestand der Rotbuche am Landberg im Revier Hetzdorf im Tharandter Wald statt. Die Hauptzielart *Xylosandrus germanus* war in allen drei Versuchsjahren mit 34.485, 10.243 und 6.394 Individuen in teils ungewöhnlich hoher Anzahl vorhanden und stellte zwischen 83 und 95 % des Gesamtfangs der Borkenkäfer dar. Die ausgeprägte Dominanz von *Xylosandrus germanus* führte dazu, dass die zweithäufigste bzw. 2022 dritthäufigste Borkenkäferart *Xyleborinus saxesenii* nur Anteile zwischen 3 und 8 % am Gesamtfang der Borkenkäfer einnahm. Neben diesen beiden Arten wurden je Versuch weitere 18 bis 21 Borkenkäferarten erfasst, wobei diese Angaben Mindestzahlen darstellen, da die Gattungen *Cryphalus*, *Crypturgus* und *Hylastes* ganz oder teilweise nicht bis zur Art bestimmt wurden. Auffällig im Artenspektrum der Borkenkäfer war die nicht unerhebliche Anzahl nadelbaumbesiedelnder Arten, die zudem teilweise hohe Individuenzahlen aufwiesen. Versuchsübergreifend waren dies die folgenden mindestens 18 Arten: *Cryphalus* spec., *Crypturgus* spec., *Gnathotrichus materiarius*, *Hylastes* spec. u. a. mit *Hylastes attenutatus*, *Hylastes brunneus* (Brauner Kiefernbastkäfer) und *Hylastes cunicularius*, *Hylurgops palliatus*, *Ips acuminatus*, *Ips typographus*, *Orthotomicus laricis* (Vielzähniger Kiefernborkenkäfer), *Pityogenes chalcographus*, *Pityophthorus* spec. u. a. mit *Pityophthorus pityographus* (Gefurchter Fichtenborkenkäfer) und *Pityophthorus pubescens*, *Polygraphus poligraphus* (Doppeläugiger Fichtenbastkäfer), *Tomicus piniperda* (Großer Waldgärtner) und *Trypodendron lineatum*. Erwähnenswert ist dabei der Nachweis von *Hylurgops palliatus* als vierthäufigste Art im Versuch 2020 (134 Individuen ≙ 0,4 % des Gesamtfangs) und das kontinuierliche Auftreten

von *Pityophthorus pityographus* in allen drei Versuchen, der sein individuenreichstes Vorkommen mit 696 Individuen im Versuch 2021 und den höchsten Anteil am Gesamtfang der Borkenkäfer mit 7 % im Versuch 2022 zeigte. Obwohl das Gebiet um den Landberg von ausgedehnteren Rotbuchenbeständen geprägt ist, führt vermutlich die allgemeine Nadelbaumprägung des Tharandter Walds und die nichtsdestotrotz unmittelbar angrenzenden Fichtenbestände zu diesem Phänomen. Dabei wird auch die allgemeine Lockwirkung des eingesetzten Ethanols auf Borkenkäfer, insbesondere auf stark sekundäre Arten sowie Arten, die sich ausschließlich an Wirtsbaumvolatilen orientieren und kein arteigenes Pheromon besitzen, eine Rolle gespielt haben.

Eine Übersicht der Fangergebnisse für *Xylosandrus germanus* in Abhängigkeit von der Testvariante zeigt Abbildung 60 in der linken Spalte. Erkennbar ist, dass mit fast allen in den drei Versuchen getesteten für Borkenkäfer potenziellen Repellentien auch tatsächlich eine repellente Reaktion in Form von hoch bis höchst signifikanten Fangreduktionen im Vergleich zur reinen Lockstoffvariante erzielt werden konnte (p=0,000-0,003). Die stärkste Fangreduktion je Versuch erzeugten dabei auf Grundlage der absoluten Zahlen Oreganoöl mit 31 % im Jahr 2020, Verbenon mit 82 % im Jahr 2021 und die Kombination aus Essigsäure und Verbenon mit 94 % im Jahr 2022. Weitere Substanzen, die eine Reduktion um mindestens 50 % erzeugten, waren Essigsäure (55 %), die Kombination aus Eukalyptus- und Oreganoöl (59 %) und Decanal (72 %). Lediglich der Grünblattduftstoff Hexenylacetat und Octenol-Essigsäure im Versuch 2020 sowie alpha-Pinen im Versuch 2022 erbrachten keine signifikante Fangreduktion von *Xylosandrus germanus*. Im R-Output sind jedoch alle drei Substanzen aufgrund von p-Werten zwischen 0,053 und 0,074 als „tendenziell signifikant“ markiert. Hier wäre zu testen, ob eine höhere Abgaberate der Stoffe ein eindeutig signifikantes Ergebnis erzeugen würde. Auch für die zweithäufigste Borkenkäferart *Xyleborinus saxesenii* konnten mehrere Substanzen mit repellenter Wirkung nachgewiesen werden (Abbildung 60, mittlere Spalte). Zu den Substanzen, die eine Fangreduktion um mindestens 50 % erzeugten, zählten dabei Oreganoöl (56 %), Verbenon (59 %), alpha-Pinen (74 %), Zitronenöl (79 %), Eukalyptusöl plus Oreganoöl (82 %) und Eukalyptusöl (83 %).

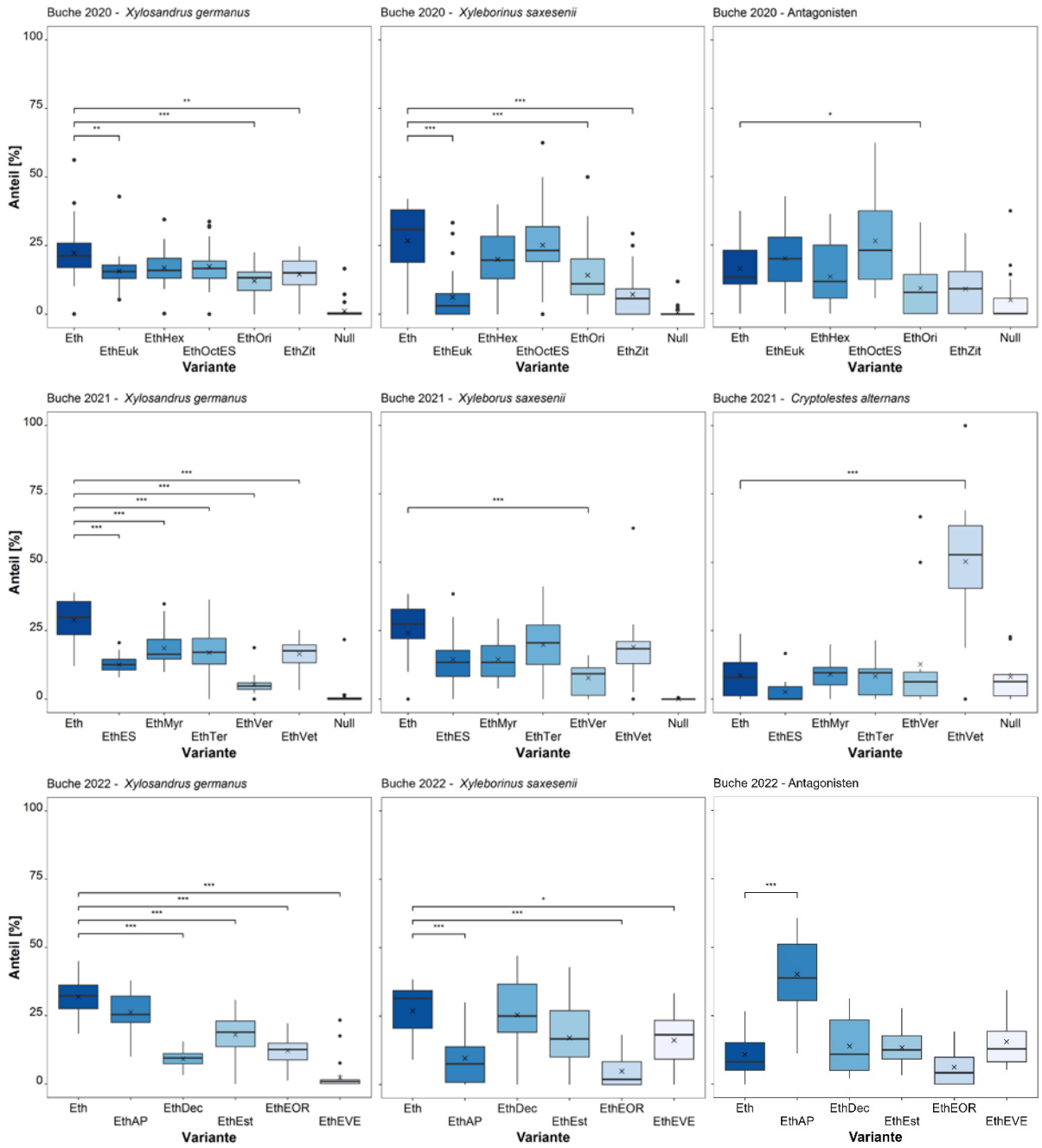

Abbildung 60: Anteile der Hauptzielart *Xylosandrus germanus* (linke Spalte), der zweihäufigsten Borkenkäferart *Xyleborinus saxesenii* (mittlere Spalte) und der Gruppe der Antagonisten bzw. der häufigsten Antagonistenart *Cryptolestes alternans* (rechte Spalte) je Falleninsel und Leerungsdatum in Abhängigkeit von der Testvariante, n = 15-30, * = signifikanter Unterschied mit p<=0,05, ** = hoch signifikanter Unterschied mit p<=0,01, *** = höchst signifikanter Unterschied mit p<=0,001, Testvarianten: Eth = Ethanol; 2020: Euk = Eukalyptusöl, Hex = Hexenylacetat, Oct = Octenol, ES = Essigsäure, Ori = Oreganoöl, Zit = Zitronenöl; 2021: ES = Essigsäure, Myr = Myrcen, Ter = Terpinen, Ver = Verbenon, Vet = Veratrol; 2022: AP = alpha-Pinen, Dec = Decanal, Est = Estragol, EOR = Eukalyptusöl + Oreganoöl, EVE = Essigsäure + Verbenon

Weitere nennenswerte bzw. auffällige Fangergebnisse bei den laubbaumbesiedelnden Borkenkäfern zeigten sich im Versuch 2020 bezüglich der dritthäufigsten Art *Ernoporicus fagi*. Von den insgesamt 163 Individuen wurde über die Hälfte in der Variante mit Zitronenöl verzeichnet und damit hoch signifikant mehr als in der reinen Lockstoffvariante (p = 0,004) (Abbildung 61, links). Die ebenfalls vorwiegend an Rotbuche vorkommende und mit 105 Individuen nachgewiesene Art *Taphrorychus bicolor* war dagegen gleichmäßiger über die Testvarianten verteilt, wobei mit 28 % am Gesamtfang die Variante mit Hexenylacetat präferiert wurde. *Ernoporicus fagi* war auch im Versuch 2022 nach den beiden Hauptarten die dritthäufigste laubbaumbesiedelnde Borkenkäferart mit insgesamt 58 Individuen. Der geringste Anteil von 7 % am Gesamtfang wurde dabei in der Variante mit Decanal und der höchste Anteil mit 34 % am Gesamtfang in der Variante mit Eukalyptus- und Oreganoöl nachgewiesen. Im Versuch 2021 waren nach *Xylosandrus germanus* und *Xyleborinus saxesenii* die beiden nächsthäufigsten laubbaumbesiedelnden Arten *Anisandrus dispar* und *Trypodendron domesticum*, welche jedoch lediglich mit jeweils 31 Individuen nachgewiesen wurden. Schwerpunktmäßig wurde *Anisandrus dispar* in der Variante mit Terpinen (42 % des Gesamtfangs) und *Trypodendron domesticum* in der Variante mit Veratrol (39 %) nachgewiesen.

Die Gesamtanzahl der in den Versuchen erfassten Borkenkäferantagonisten schwankte von 417 Individuen im Jahr 2020, über 964 Individuen im Jahr 2021 zu 613 Individuen im Jahr 2022 und wies mit mindestens 27 bis 28 Arten je Versuch eine hohe Diversität auf. Die Angabe der Artendiversität kann dabei nur als Mindestangabe erfolgen, da die Familie Histeridae (v. a. gestellt von Arten der Gattungen *Paromalus* und *Platysoma*) und die Gattungen *Cerylon*, *Epuraea* und *Hypophloeus* ganz oder teilweise nicht bis zur Art bestimmt wurden. Steter Bestandteil im Spektrum der Antagonisten war *Cryptolestes alternans*, der mit 86 bzw. 341 Individuen in den Jahren 2020 und 2021 die häufigste und im Jahr 2022 mit 86 Individuen die zweithäufigste Art der Gruppe der Antagonisten darstellte. Dabei nahm er Anteile am Gesamtfang der Gruppe zwischen 21 und 35 % ein.

Das festgestellte artenreiche Spektrum der Borkenkäferantagonisten im Rotbuchenbestand und die Tatsache, dass im Gegensatz zur Gruppe der Borkenkäfer keine deutliche Dominanz einzelner Arten vorlag, so dass die im Abschnitt 3.2.2.3 erläuterten Festlegungen nur in zwei Fällen und dort auch nur mit der sehr geringen Wiederholungsanzahl von 5 erfüllt wird, führte zu einer statistischen Auswertung der Antagonisten für die Versuche 2020 und 2022 als Gesamtgruppe (Abbildung 60, rechte Spalte, oben und unten). Dabei wurde im Versuch 2020 eine signifikant repellente Wirkung durch Oreganoöl erzeugt (p = 0,005). Auf Basis der absoluten Fangzahlen betrug die Fangreduktion 33 % im Vergleich zur reinen Lockstoffvariante. Das Ergebnis wurde dabei maßgeblich durch die Verteilung der häufigsten Art, *Cryptolestes alternans*, bestimmt. Im Gegensatz dazu konnte im Versuch 2022 bei der Variante mit alpha-Pinen für die Gruppe der Antagonisten eine höchst

signifikante Fangsteigerung verzeichnet werden (p = 0,000). In diesen Fallen wurden fast viermal so viele Antagonisten nachgewiesen wie in den Fallen der reinen Lockstoffvariante. Anders als im Versuch 2020 gilt dieses Gruppenergebnis gleichzeitig auch für mehrere der erfassten Einzelarten bzw. -taxa. Für den Versuch 2021 ermöglichte das individuenreiche Auftreten von *Cryptolestes alternans* eine Einzelauswertung. Bezüglich der Wirkung der eingesetzten für Borkenkäfer potenziell repellenten Substanzen fällt dabei in Abbildung 60 (rechte Spalte, mittig) die mit der Variante mit Veratrol erzeugte höchst signifikante Fangsteigerung im Vergleich zur reinen Lockstoffvariante auf (p = 0,000), die auf Basis der absoluten Fangzahlen mehr als das Fünffache beträgt. Mit 1,8 % fiel der Anteil am Gesamtfang der Art in der Variante mit Essigsäure am geringsten aus, stellte sich aber als statistisch nur tendenziell signifikant dar (p = 0,059). Dass 8,5 % des Gesamtfangs in der Nullvariante nachgewiesen wurden, während die Anteile bei den anderen mit Substanzen versehenen Varianten zwischen 9 und 11 % lagen, lässt eine relative Unabhängigkeit der Art vom Lockstoff Ethanol vermuten. Die 2021 für *Cryptolestes alternans* festgestellte Lockwirkung von Veratrol zeigte sich ebenfalls für weitere Antagonistenarten, darunter mit *Salpingus planirostris* (Gemeiner Scheinrüssler, 88 Individuen, davon 25 % in der Variante mit Veratrol) und *Rhizophagus bipustulatus* (Zweifleckiger Rindenglanzkäfer, 77 Individuen, davon 34 % in der Variante mit Veratrol) auch die zweit- und dritthäufigste Art im Versuch, sowie die Arten *Paromalus parallelepipedus* (53 Individuen, davon 68 % in der Variante mit Veratrol), *Synchita variegata* (24 Individuen, davon 96 % in der Variante mit Veratrol) und *Rhizophagus parvulus* (13 Individuen, davon 62 % in der Variante mit Veratrol). Auch die beiden Arten *Notolaemus unifasciatus* und *Placonotus testaceus*, die jeweils nur mit einem einzigen Individuum nachgewiesen wurden, fanden sich in dieser Variante.

Erwähnenswert sind außerdem das Vorkommen der wichtigen Borkenkäferantagonisten *Nemozoma elongatum*, *Thanasimus formicarius* und *Thanasimus femoralis*. Anders als die *Thanasimus*-Arten kann *Nemozoma elongatum* aufgrund seiner Größe und seines Habitus Borkenkäfern und deren Larven nur in deren Gängen in der Rinde bzw. im Holz nachstellen. Als Hauptbeutearten werden dabei *Pityogenes chalcographus* in Gemeiner Fichte und *Taphrorychus bicolor* in Rotbuche angesehen (Baier 1994, Dippel 1991). In allen drei Versuchen in Rotbuche überwog von den drei genannten Arten *Nemozoma elongatum* mit Individuenzahlen von 13, 51 und 46 Stück, während *Thanasimus formicarius* nur mit 7, 17 und 27 Stück und *Thanasimus femoralis* nur im Jahr 2022 mit 18 Stück nachgewiesen wurde. *Nemozoma elongatum* bevorzugte dabei vor allem die reine Lockstoffvariante mit Ethanol sowie die Varianten mit Veratrol und Estragol. *Thanasimus formicarius* wurde 2020 schwerpunktmäßig in der Variante mit Eukalyptusöl nachgewiesen und 2021 in den Varianten mit Verbenon und Veratrol. Am auffälligsten fiel die Verteilung im Versuch 2022 aus, wo jeweils 78 % des Gesamtfangs dieser Art und von *Thanasimus femoralis* in der Variante mit alpha-Pinen verzeichnet wurden.

Die Anzahl der nachgewiesenen potenziellen Borkenkäferantagonisten war in den drei Jahren und Versuchen relativ konstant und betrug 2.452, 2.366 und 3.025 Individuen. Von den erfassten Taxa waren es die Stapyhlinidae und die Brachycera, die jeweils am häufigsten vorkamen. Die einzige Ausnahme davon zeigte sich im Versuch 2020, in dem noch mehr Individuen der Hymenoptera verzeichnet wurden. Während für die Brachycera (625-1.016 Individuen) in keinem der drei Versuche eine signifikante Reaktion festgestellt wurde, konnte dagegen für die Staphylinidae (632-1.076 Individuen) in allen drei Versuchen eine Fangsteigerung erzielt werden, die für alpha-Pinen hoch signifikant (p = 0,003) und für Octenol-Essigsäure, Essigsäure, Veratrol und Essigsäure-Verbenon höchst signifikant (p = 0,000) im Vergleich zur reinen Lockstoffvariante ausfiel (z. B. Versuch 2021: Abbildung 61, mittig). Für die Hymenoptera zeigte sich in den Versuchen 2020 (647 Individuen) und 2021 (320 Individuen) keine signifikante Reaktion, während im Versuch 2022 (222 Individuen) eine signifikante Fangsteigerung durch Essigsäure-Verbenon im Vergleich zur reinen Lockstoffvariante verzeichnet wurde (p = 0,028) (Abbildung 61, rechts).

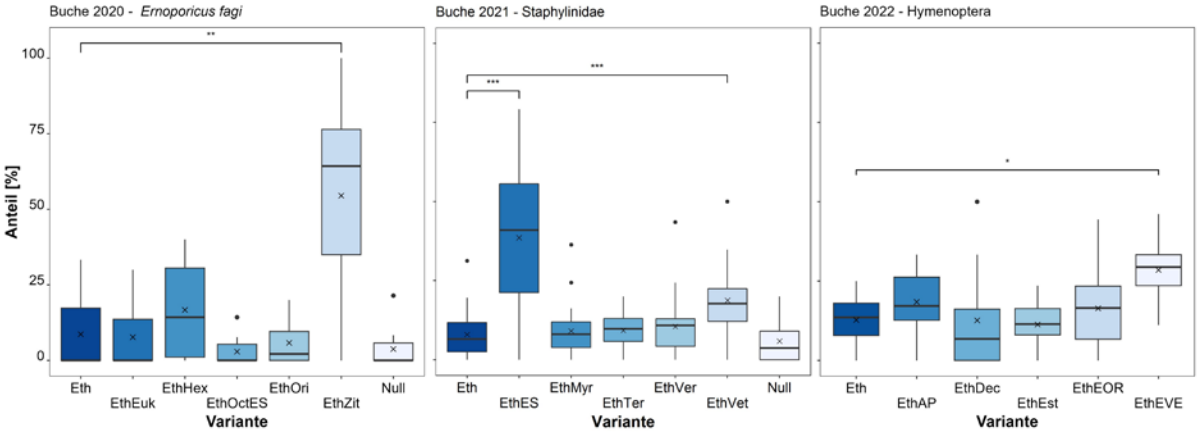

Abbildung 61: Anteile einer weiteren auffälligen Borkenkäferarten (links) und zwei ausgewählter Taxa der potenziellen Antagonisten (mittig und rechs) je Falleninsel und Leerungsdatum in Abhängigkeit von der Testvariante, n = 10-25, * = signifikanter Unterschied mit p<=0,05, ** = hoch signifikanter Unterschied mit p<=0,01, *** = höchst signifikanter Unterschied mit p<=0,001, Testvarianten: Eth = Ethanol; 2020: Euk = Eukalyptusöl, Hex = Hexenylacetat, Oct = Octenol, ES = Essigsäure, Ori = Oreganoöl, Zit = Zitronenöl; 2021: ES = Essigsäure, Myr = Myrcen, Ter = Terpinen, Ver = Verbenon, Vet = Veratrol; 2022: AP = alpha-Pinen, Dec = Decanal, Est = Estragol, EOR = Eukalyptusöl + Oreganoöl, EVE = Essigsäure + Verbenon

3.2.3.4. Fazit

Die im Rahmen der elf Freilandfallenversuche getesteten potenziellen Repellentien für Borkenkäfer zeigten in vielen Fällen die angestrebte Wirkung. Eine Übersicht der Substanzen, die eine signifikante Fangreduktion erzeugten und sich damit für einen Einsatz in Verfahren zur insektizidfreien Regulierung von Borkenkäfern eignen, gibt Tabelle 8. Diese enthält Aussagen für die vier für das Teilprojekt definierten Hauptzielarten sowie für weitere drei relevante Arten der Borkenkäfer, die häufig auftraten und ggf. gegenwärtig oder zukünftig eines Managements bedürfen könnten. Ebenfalls werden Aussagen zur Effektivität der Substanzen in Form der Höhe der erzielten Fangreduktion getroffen. Hier muss berücksichtigt werden, dass diese Angaben nur einen grundsätzlichen Trend aufzeigen und Entscheidungsprozesse unterstützen sollen, jedoch versuchsspezifisch ermittelt wurden und abhängig von zahlreichen externen Faktoren sind. Die Empfehlungen für *Trypodendron domesticum* stammen aus dem Versuch in einem Bestand der Gemeinen Fichte im Jahr 2023, bei dem aufgrund der Verwendung des für alle Arten der Gattung attraktiven Lockstoffs Linosan® neben der Zielart *Trypodendron lineatum* auch die laubbaumbesiedelnde Art *Trypodendron domesticum* in einer statistisch auswertbaren Anzahl erfasst wurde. Zu erwähnen ist auch, dass zwar in den vorausgegangenen Abschnitten in einigen Fällen zu den Angaben in Tabelle 8 kontroverse, d. h. fangsteigernde Reaktionen weiterer Borkenkäferarten beschrieben werden, diese jedoch aus aktueller Sicht pauschal keine Relevanz für die Empfehlung der Substanzen bezüglich der ausgewählten Arten besitzen.

Wie die Übersicht zeigt, geht von den getesteten ätherischen Ölen häufig eine sehr gute Wirkung aus. Dies gilt vor allem für Eukalyptusöl. Auch Thymianöl zeigte sehr vielversprechende Ergebnisse, wurde jedoch nur im letzten Projektversuch an einer einzigen Hauptzielart getestet. Stetig gute Ergebnisse lieferten auch Decanal und die Kombination der beiden Zersetzungmarker Octenol und Essigsäure. Die artübergreifende Reaktion auf Decanal war dabei ein überraschend positives Ergebnis. Die Ursache für die Wirkung kann bisher mit Hilfe der Literatur nur ansatzweise erklärt werden. Die Erprobung höherer Abgaberaten in zukünftigen Versuchen ist empfehlenswert. Dies gilt ebenfalls für Octenol, das bisher nur in äußerst geringen Abgaberaten getestet wurde, bei dem aber zu vermuten ist, dass höhere Abgaberaten eine deutliche Steigerung der repellenten Wirkung verursachen. Unerwartet war auch die repellente Reaktion der nadelbaumbesiedelnden Arten *Ips typographus* und *Pityogenes chalcographus* auf alpha-Pinen, stellt diese Substanz doch einen wichtigen Bestandteil im Volatilspektrum ihrer Wirtsbaumarten dar. Die Integration von alpha-Pinen in die Versuche des Teilprojekts 2 basierte lediglich auf einem Ergebnis des Teilprojekts 1, was im Teilprojekt 2 bestätigt werden konnte. Auf Basis der Ergebnisse ist außerdem Verbenon uneingeschränkt empfehlenswert, das als Antiaggregationspheromon von *Ips typographus* nachweislich auch auf ein weites Spektrum ande-

rer Borkenkäferarten diese Reaktion in deutlicher Ausprägung hervorruft. Die einzige unerwartete Ausnahme von dieser Regel zeigte sich für *Trypodendron lineatum*, der sogar mit einer tendenziellen Fangsteigerung reagierte. Diese Wirkung wiesen auch Lindgren und Miller (2002) nach, jedoch nur in einem von drei Versuchen. In den anderen beiden zeigte sich keine Reaktion von *Trypodendron lineatum* auf Verbenon. In Bezug auf Verbenon muss allerdings berücksichtigt werden, dass es im Vergleich zu den anderen Substanzen mit sehr hohen Beschaffungskosten verbunden ist. Zusammenfassend zeigt die Übersicht in Tabelle 8, dass zwar grundsätzlich eine artspezifische Auswahl der Repellentien für einen Einsatz erfolgen muss, in vielen Fällen aber aufgrund der artübergreifenden Wirkung der Substanzen mehrere Zielarten mit derselben Substanz abgewehrt werden können.

In Ergänzung zu Tabelle 8 sind in Tabelle 9 Substanzen dargestellt, die aus aktueller Sicht für einen Einsatz in der Regulierung von Borkenkäfern nicht empfohlen werden können. Diese umfassen sowohl Substanzen, auf die in den Fallenversuchen keine Reaktion erfolgte, als auch solche, die eine nicht der Zielsetzung des Teilprojekts entsprechende fangsteigernde Reaktion hervorriefen. Die letztgenannten Substanzen sollten jedoch entsprechend der Zielstellung des Teilprojekts 1 in zukünftige Versuche zur Erprobung potenziell fangsteigernder Additive für einen Massenfang von *Ips typographus* und *Pityogenes chalcographus* einbezogen werden. Unerwartet war dabei die fangsteigernde Wirkung von Bärlauchextrakt, da sich im Rahmen eines Versuchs im bereits abgeschlossenen Waldklimafonds-Projekt bioProtect vielversprechende Tendenzen zeigten. Hier sollten weitere Versuche mit den bestimmten Einzelsubstanzen, z. B. Diallyldisulfid und Dipropyldisulfid bzw. deren Kombination durchgeführt werden, um den Ethanolanteil, den das Extrakt beinhaltet und der attrahierend wirken könnte, zu vermeiden. Dabei sollte insbesondere auch auf eine Kreuzwirkung auf *Xylosandrus germanus* geachtet werden, für den im Rahmen von bioProtect eine hohe Attraktivität von Bärlauchextrakt nachgewiesen wurde. Weiterer Forschungsbedarf besteht ebenfalls hinsichtlich der Grünblattduftstoffe, die bereits ansatzweise gute Ergebnisse gezeigt haben und im Fall von *Xylosandrus germanus* in Gemeiner Fichte sogar eine Fangreduktion von über 90 % bewirkten. Insgesamt zeigen die Ergebnisse dabei aber deutlich, dass die gewünschte repellente Wirkung nur durch eine Kombination verschiedener Grünblattduftstoffe erreicht werden kann. Der Zusatz weitere derartiger Stoffe, z. B. Hexanal oder cis-3-Hexanal, zur bereits getesteten Kombination aus cis-3-Hexenylacetat und cis-3-Hexen-1-ol, erscheint sehr vielversprechend.

Auf Basis der Tabelle 9 fällt außerdem auf, dass die im Rahmen der laborbasierten Verhaltensversuche der Arbeitsgruppe an der UGÖ als repellent ermittelten Substanzen diese Eigenschaft in vielen Fällen bei einem Einsatz im Freiland nicht zeigten und sich offenbar die in einem geschlossenen Raum ermittelten Ergebnisse nur schlecht auf offene Systeme übertragbar lassen. So zeigte sich z. B. im Labor auch eine repellente Wirkung leicht erhöhter Konzentrationen von Ethanol, während für das Freiland bekannt ist, dass

von Ethanol, insbesondere von hohen Konzentrationen, eine hohe Lockwirkung auf *Xylosandrus germanus* ausgeht, was u. a. auch im Rahmen der Versuche im Projekt DETMON (FKZ 2220NR080B) an der Professur für Waldschutz bestätigt wurde (siehe Zwischenbericht DETMON für 2021, Abbildung 2). Als Alternative zur Testung neuer potenzieller Repellentien würde sich z. B. das in Abschnitt 3.3 vorgestellte Verfahren anbieten.

Nicht in Tabelle 8 und Tabelle 9 integriert wurden die in den vorausgegangenen Abschnitten beschriebenen Reaktionen der Borkenkäferantagonisten, da unabhängig von deren Richtung in keinem Fall eine nachhaltig negative Auswirkung auf diese Organismen zu erwarten ist. In den meisten Fällen wurden durch die getesteten Substanzen keine signifikanten Einflüsse auf die Fangzahlen der Antagonisten verzeichnet. In einigen Fällen zeigte sich sogar eine fangsteigernde Wirkung z. B. bei alpha-Pinen und den Kombinationen mit Octenol und Essigsäure. Bei einem Einsatz dieser Substanzen als Repellentien im Rahmen einer Regulierung von Borkenkäfern würde die Attraktivität für Borkenkäferantagonisten noch eine zweite regulierende Komponente hinzufügen. In einzelnen Fällen wurde jedoch auf einzelne Antagonistenarten auch die für die Borkenkäferarten angestrebte repellente Wirkung erzeugt. Da es jedoch dadurch zu keiner Abtötung von Individuen kommt und keine großmaßstäbliche Auswirkung der beobachteten Repellenz auf Antagonistenpopulationen zu erwarten ist, haben diese Ergebnisse keine Relevanz für den Einsatz der in Tabelle 8 empfohlenen Substanzen. In Abhängigkeit von der Zielsetzung eines Einsatzes besteht allerdings die Möglichkeit, zusätzlich auch auf diese Komponente zu achten.

Tabelle 8: Übersicht empfehlenswerter Repellentien für die Regulation ausgewählter häufiger Borkenkäferarten (AR = Abgaberate, siehe Tabelle 7; Artentrennung durch gestrichelte Linie = Testung desselben Substanzportfolios, Artentrennung durch durchgezogene Linie = Testung verschiedener Substanzportfolios)

Zielart	**Repellentstoffe mit einer signifikante Fangreduktion von**			
	≥ 90 %	**≥ 75 %**	**≥ 50 %**	**< 50 %**
Gemeine Fichte				
Ips typographus		Eukalyptusöl-Decanal	alpha-Pinen Eukalyptusöl Eukalyptusöl-Oreganoöl	Decanal (niedrige + hohe AR) Hexenylacetat-Hexenol Octenol-Essigsäure Oreganoöl
Pityogenes chalcographus	Eukalyptusöl-Decanal Eukalyptusöl-Oreganoöl Korianderöl Salbeiöl (89 %)	alpha-Pinen Eukalyptusöl (74 %)	Decanal (hohe AR) Oreganoöl	Decanal (niedrige AR)
Trypodendron lineatum			Octenol-Essigsäure Thymianöl	Decanal Hexenylacetat-Hexenol
Xylosandrus germanus	Hexenylacetat-Hexenol Thymianöl			Decanal Verbenon
Gemeine Kiefer				
Ips sexdentatus			Octenol-Essigsäure	Decanal Eukalyptusöl Myrcen Octenol-Essigsäure-Eukalyptusöl Octenol-Essigsäure-Salbeiöl Oreganoöl

Fortsetzung Tabelle 8:

Zielart	Repellentstoffe mit einer signifikante Fangreduktion von			
	≥ 90 %	≥ 75 %	≥ 50 %	< 50 %
Rotbuche				
Trypodendron domesticum	Eukalyptusöl Thymianöl	Hexenylacetat-Hexenol	Octenol-Essigsäure Verbenon	
Xyleborinus saxesenii		Eukalyptusöl Eukalyptusöl-Oreganoöl Zitronenöl	alpha-Pinen Oreganoöl Verbenon	Essigsäure-Verbenon
Xylosandrus germanus	Essigsäure-Verbenon	Verbenon	Decanal Essigsäure Eukalyptusöl-Oreganoöl	Estragol Eukalyptusöl Myrcen Oreganoöl Terpinen Veratrol Zitronenöl

Tabelle 9: Aus aktueller Sicht nicht empfehlenswerte Substanzen für die Regulation ausgewählter häufiger Borkenkäferarten (Legende siehe Tabelle 8)

Zielart	**Substanzen ohne Wirkung**	**Substanzen mit fangsteigernder Wirkung**
Gemeine Fichte		
Ips typographus	Cumarin Hexenylacetat Korianderöl Myrcen Salbeiöl Zitronenöl	Bärlauchextrakt Estragol Terpinen
Pityogenes chalcographus	Estragol Hexenylacetat Hexenylacetat-Hexenol Octenol-Essigsäure Zitronenöl	Bärlauchextrakt Cumarin Myrcen Terpinen
Trypodendron lineatum	Eukalyptusöl Verbenon	
Xylosandrus germanus	Eukalyptusöl Octenol-Essigsäure	
Gemeine Kiefer		
Ips sexdentatus	Bärlauchextrakt Cumarin Estragol Hexenylacetat Hexenylacetat-Hexenol Terpinen Zitronenöl (niedrige AR) Zitronenöl (hohe AR)	alpha-Pinen
Rotbuche		
Trypodendron domesticum	Decanal	
Xyleborinus saxesenii	Decanal Essigsäure Estragol Hexenylacetat Myrcen Octenol-Essigsäure Terpinen Veratrol	
Xylosandrus germanus	alpha-Pinen Hexenylacetat Octenol-Essigsäure	

3.3. Verhaltensversuche

3.3.1. Material und Methodik

Als Lückenschluss zwischen den laborbasierten Versuchen der UGÖ und den Freilandversuchen mit Fanghölzern der OGF wurde ein Ökoversuch konzipiert, in dem im Freiland, jedoch in Aerarien unter kontrollierten Bedingungen die Besiedlung von Fichtenstammholzabschnitten durch *Ips typographus* in Abhängigkeit von einer Behandlung mit Repellenzien getestet wurde. Die Aerarien befanden sich dazu in einem einseitig offenen Unterstand und beinhalteten jeweils ein Paar frischer und unbesiedelter Fichtenstammholzabschnitte mit einer Länge von 60 cm. Einer der beiden Abschnitte wurde mit in den Fallenversuchen als repellent getesteten Eukalyptusöl behandelt, während der andere Abschnitt unbehandelt blieb (Abbildung 62).

Abbildung 62: Aerarium mit einem unbehandelten und einem mit Eukalyptusöl behandelten Stammholzabschnitt der Gemeinen Fichte

Der Versuch wurde 2021 erstmals durchgeführt und 2022 mit einem verbesserten Versuchsdesign wiederholt. Dabei erfolgte eine Verdopplung des Stichprobenumfangs und die Applikationsmenge des Eukalyptusöls sowie die Anzahl der Testindividuen je Aerarium wurden erhöht (Tabelle 10). Die flächige tropfnasse Ausbringung des Eukalyptusöls entsprach dabei dem bei einer Insektizidapplikation angewandten Standard. Außerdem wurde auf identische Lichtbedingungen für die beiden Holzabschnitte eines Testpaars geachtet, da sich dieser Einfluss im Versuch 2021 als entscheidend herausgestellt hatte.

Tabelle 10: Vergleich der wesentlichen Versuchsparameter der Ökoversuche 2021 und 2022

Parameter	**2021**	**2022**
Stichprobenumfang [St.]	10	20
Testindividuen/Aerarium [St.]	20	50
Eukalyptusöl/Stammabschnitt	1 Sprühstoß an allen vier Seiten jeweils unten, mittig und oben mit handelsüblichem Essig-und-Öl-Sprüher (ca. 3 ml/Stammabschnitt)	flächige tropfnasse Sprühung mit Hand-Sprühgerät von GLORIA mit 1,25 l Füllinhalt (ca. 100 ml/Stammabschnitt)
Ausrichtung des Testpaars zum Licht	teilweise ungleichmäßig	gleichmäßig

Beide Versuche fanden im Juli des jeweiligen Jahres statt. Acht Tage nach dem Einsetzen der Individuen von *Ips typographus* wurden die auf der Rindenoberfläche erkennbaren Einbohrlöcher mit Hilfe von farbigen Nadeln markiert und gezählt sowie tote Individuen gezählt und entfernt. Nach insgesamt fünf Wochen wurden die Stammabschnitte dann entrindet und die Anzahl und Größe der ausgebildeten Brutbilder aufgenommen. Im ersten Versuch wurde dabei auch die Lichtsituation am Einzelstammabschnitt erfasst, da einige Paare quer (→ beiden Stammabschnitten wurde der Parameter „Licht“ zugeordnet) und einige längs (→ dem zur offenen Seite zeigendem Stammabschnitt wurde der Parameter „Licht“, dem zur geschlossenen Seite zeigenden Stammabschnitt der Parameter „Schatten“ zugeordnet) zur offenen Seite des Unterstands standen. Für das menschliche Auge waren die Lichtunterschiede marginal.

3.3.2. Ergebnisse

Eine Übersicht der Versuchsergebnisse aus dem Jahr 2021 gibt Tabelle 6. Absolut gesehen zeigte sich bei den mit Eukalyptus behandelten Stammabschnitten im Mittel in allen Fällen eine geringere Anzahl an Einbohrlöchern und angelegten Brutbildern als bei den unbehandelten Stammabschnitten, allerdings wurde gleichzeitig ein noch stärkerer Einfluss der Lichtsituation auf die Besiedlung der Stämme durch *Ips typographus* erfasst. So wurden die etwas stärker belichteten Stämme etwa doppelt so stark besiedelt wie die etwas schwächer belichteten, wobei sich der Unterschied auch statistisch signifikant darstellte. Die Daten werden daher in Tabelle 11 zusätzlich auch getrennt nach den beiden Ausprägungen der Lichtsituation dargestellt. Die statistische Analyse zeigte hinsichtlich der Behandlung mit Eukalyptusöl keine statistisch gesicherten Unterschiede. Der p-Wert von 0,065 im Fall des Vergleichs der beiden Varianten bei ausschließlicher Betrachtung der stärker belichteten Stämme liegt jedoch sehr nah an der Signifikanzgrenze und es kann angenommen werden, dass sich hier bei einem größeren Stichprobenumfang ein statistischer Unterschied ergeben hätte.

Tabelle 11: Ergebnisse des Ökoversuchs im Jahr 2021 zur Besiedlung von mit Eukalyptusöl behandelten und unbehandelten Fichtenstammabschnitten durch *Ips typographus* unter Berücksichtigung der Lichtsituation (a = Erstaufnahme ohne Entrindung acht Tage nach der Behandlung, b = Schlussaufnahme mit Entrindung 34 Tage nach Behandlung, p-Wert: Mann-Whitney-U-Test, fettgedruckter p-Wert: statistisch signifikanter Unterschied, n = Anzahl an Stammabschnitten)

Variante		**Mittlere Anzahl an Einbohrlöchern[a] [St.]**	**p**	**Mittlere Anzahl an Brutbildern[b] [St.]**	**p**	**n [St.]**
behandelt		3,3	0,579	3,4	0,315	10
unbehandelt		3,5		4,5		10
Licht		4,1	**0,030**	4,7	0,067	13
Schatten		2,1		2,6		7
Licht	behandelt	3,8	0,571	3,8	0,065	8
	unbehandelt	4,6		6,2		5
Schatten	behandelt	1,5	0,571	2,0	1,000	2
	unbehandelt	2,4		2,8		5

Bei dem Versuch 2022 mit verbessertem Versuchsdesign wurden an den mit Eukalyptusöl behandelten 20 Stammabschnitten insgesamt nur 5 Brutbilder und an den unbehandelten 20 Stammabschnitten 19 Brutbilder durch die jeweils 1.000 Individuen von *Ips typographus* angelegt. Während die statistische Analyse im Vorjahr vermutlich aufgrund des geringen Stichprobenumfangs keinen statistisch signifikanten Unterschied ergab, zeigte sich nun ein eindeutiger signifikanter Unterschied in der Besiedlung von mit Eukalyptusöl behandelten und nicht behandelten Stammholzabschnitten der Gemeinen Fichte.

Nichtsdestotrotz verwundert die insgesamt geringe Anzahl an Brutbildern im Versuch. Hier ist zu vermuten, dass das Eukalyptusöl aufgrund seiner hohen Dosierung in Verbindung mit den zwar luftdurchlässigen, aber dennoch geschlossenen Aerarien die z. B. von Batish et al. (2008) beschriebene insektizide Wirkung entfaltet hat. Dementsprechend wurden auch bei der Erstaufnahme im Durchschnitt 36 tote *Ips-typographus*-Individuen je Aerarium vorgefunden, was 72 % der eingesetzten Individuen je Aerarium entspricht, während dieser Wert im Vorjahr mit deutlich geringerer Behandlungsmenge nur 37 % betrug. Auch wurde im Versuch 2022 bei den mit Eukalyptusöl behandelten Stammabschnitten mit 83 % ein deutlich höherer Anteil an Brutbildern im unteren Stammabschnittsbereich, häufig direkt am unteren Rand, ausgebildet, während dieser Anteil bei den unbehandelten Stammabschnitten nur 69 % betrug. Im Vorjahr war dieser Anteil bei beiden Behandlungsvarianten mit 67 und 63 % ungefähr gleich ausgeprägt gewesen. Es ist zu vermuten, dass der untere Rand der Stammabschnitte, die stehend mit dem Eukalyptusöl

besprüht wurden, am ehesten von einer Ölapplikation verschont geblieben sind. Eine weitere Auffälligkeit im Vergleich zum Versuch im Vorjahr zeigte sich im Verhältnis zwischen der Anzahl der Einbohrlöcher bei der Erst- und der Anzahl der ausgebildeten Brutbilder bei der Schlussaufnahme. So wurden an den insgesamt 40 Stammabschnitten 54 Einbohrlöcher erfasst, aber nur 24 Brutbilder ausgebildet. Zusätzlich wurden 22 Muttergänge begonnen, deren Länge im Schnitt 2,8 cm betrug, bei denen es jedoch zu keiner Brutanlage kam. Im Vergleich dazu wurden im Versuch 2021 mit einer deutlich geringeren Behandlungsmenge an den insgesamt 20 Stammabschnitten 68 Einbohrlöcher bei der Erst- und 79 Brutbilder bei der Schlussaufnahme erfasst. Eine Ausbildung von Muttergängen ohne weitere Brutanlage kam nicht vor.

Zu erwähnen ist außerdem, dass sich in beiden Versuchen die mittlere Größe der ausgebildeten Brutbilder zwischen den behandelten und unbehandelten Stammabschnitten nicht signifikant unterschieden (2021: behandelt = 70,8 cm², unbehandelt = 64,1 cm², p = 0,314; 2022: behandelt = 73,8 cm², unbehandelt = 68,6 cm², p = 0,477). Kommt es also zu einer erfolgreichen Eiablage, ist die Entwicklung der Larven unter der Rinde durch das auf die Rindenoberfläche aufgetragene Eukalyptusöl nicht beeinträchtigt.

Tabelle 12: Ergebnisse des Ökoversuchs im Jahr 2022 zur Besiedlung von mit Eukalyptusöl behandelten und unbehandelten Fichtenstammabschnitten durch *Ips typographus* (a = Erstaufnahme ohne Entrindung acht Tage nach der Behandlung, b = Schlussaufnahme mit Entrindung 35 Tage nach Behandlung, p-Wert: Mann-Whitney-U-Test, fettgedruckter p-Wert: statistisch signifikanter Unterschied, n = Anzahl an Stammabschnitten)

Variante	**Anzahl an Einbohrlöchern[a] [St.]**			**Anzahl an Brutbildern[b] [St.]**			**n [St.]**
	Ø	**∑**	**p**	**Ø**	**∑**	**p**	
behandelt	0,90	18	0,130	0,25	5	**0,039**	20
unbehandelt	1,80	36		0,95	19		20

3.3.3. Fazit

Das erprobte Verfahren mit Stammholzabschnitten könnte in Zukunft genutzt werden, um Vortests mit neuen potenziellen Repellentien für ein Borkenkäfermanagement durchzuführen, welche dann unter erheblich naturnäheren Bedingungen als im Labor stattfinden, gleichzeitig aber auch weniger Aufwand und Zeit als Freilandfallen- oder -fangholzversuche in Anspruch nehmen würden. Das Verfahren ließe sich dabei auf andere Baum- und Borkenkäferarten sowie andere Semiochemikalien übertragen, muss aber ggf. in seiner Durchführung daran angepasst werden. Beim Einsatz von Substanzen, die nicht nur repellent, sondern auch insektizid wirken können, wie das getestete Eukalyptusöl, ist bei

einem auf den positiven Vortest folgenden Einsatz in der Praxis im Freiland davon auszugehen, dass fast ausschließlich die repellente Eigenschaft des Eukalyptusöls zum Tragen kommt.

4. Verwertung

a) Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen

Im Rahmen des Projekts wurden keine Erfindungen oder Schutzrechte angemeldet. Hinsichtlich der Verwendung der Nordlander-Falle als Grundlage für die Modifikationen innerhalb des Projekts wurde bei Göran Nordlander angefragt, inwiefern die von ihm in den zwei Publikationen von 1986 und 1987 beschriebene Falle patentrechtlich geschützt ist. Laut seiner Aussage verfügt dieses Modell über keinen patentrechtlichen Schutz und kann so uneingeschränkt genutzt und modifiziert werden.

b) Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende

Die im Projektzeitraum durchgeführten Versuche und erzielten Ergebnisse stellen einen wichtigen Fortschritt im Bereich der naturnahen insektizidfreien Bekämpfung und Regulation von waldschädigenden Borkenkäfer- und Rüsselkäferarten dar. Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse sind neuartige oder weiterentwickelte Managementoptionen in Wirtschafts- und Nichtwirtschaftswäldern anwendbar, die sowohl die ökonomischen wie auch ökologischen Schäden durch Borkenkäfer- und Rüsselkäferbefall reduzieren. Der Schutz und Erhalt der Vitalität, biologischen Vielfalt und Anpassungsfähigkeit der Wälder wird dabei insbesondere mittel- bis langfristig ein wichtiger wirtschaftlicher Faktor in Deutschland sein.

Die Anwendung der in Teilprojekt 1 entwickelten bzw. optimierten Fangverfahren für *Ips typographus* und *Hylobius abietis* mit Fokus auf einem Massenfang und der in Teilprojekt 2 ermittelten Substanzen, die bei *Ips typographus*, *Ips sexdentatus*, *Xylosandrus germanus*, *Trypodendron lineatum* und anderen Borkenkäfern repellente Reaktionen hervorrufen, zielt sowohl auf den direkten Schutz von Waldbeständen und deren natürliche und künstliche Verjüngung als auch von wertvollen Rohholzsortimenten. Diese Verfahren sind auch auf Flächen anwendbar, auf denen der Einsatz von Insektiziden z. B. durch naturschutz-, wasserschutz- oder zertifizierungsrechtliche Bestimmungen ausgeschlossen ist, d. h. auch in Wäldern in Schutzgebieten wie z. B. Nationalparken, von denen im Fall einer Massenvermehrung von Waldschadorganismen eine Gefahr für angrenzende Wirtschaftswaldflächen bestehen kann. Der Nützlingsschutz wird dabei nicht nur durch den Verzicht auf den Einsatz von Insektiziden, sondern auch durch spezielle Konstruktionseigenschaften der Fallen erzielt, die eine hohe Selektivität bedingen.

Zusammenfassend können diese Verfahren dazu beitragen, die wirtschaftlichen Verluste in Wäldern durch Borkenkäfer und Rüsselkäfer zu verringern, wodurch nicht nur der Erhalt der Waldfläche, sondern auch deren Produktivität gesichert und gefördert wird.

Das Interesse an alternativen insektizidfreien Waldschutzverfahren ist bei Waldbesitzenden und anderen Lobbygruppen sehr groß, was zahlreiche Anfragen im Rahmen der Projektbearbeitung bestätigen. Die vorgestellten Verfahren erweitern das Spektrum der zur Verfügung stehenden Möglichkeiten im Borkenkäfer- und Rüsselkäfermanagement, womit sowohl die stark rückläufigen Zulassungen von Insektiziden kompensiert und die Möglichkeit einer Anwendung in Schutzgebieten gegeben als auch der steigenden Diversifizierung der Zielsetzungen von Waldbesitzenden Rechnung getragen wird.

Durch die Entwicklung von Monitoringfallen hin zu Massenfangfallen wird der Kreis der potenziellen Käuferschaft und damit auch die wirtschaftlichen Erfolgsaussichten deutlich erhöht. Massenfangtaugliche Fallen für *Ips typographus* und *Hylobius abietis* existieren bisher nicht, sodass durch deren Entwicklung ein neues Marktsegment im Waldschutz eingeführt, das insbesondere im Hinblick auf die zu erwartende Zunahme von Insektenkalamitäten im Zuge der globalen Klimaveränderungen von Bedeutung sein wird. Dasselbe gilt für die erfolgreich erprobten Borkenkäferrepellentien, die ebenfalls bisher auf dem Markt nicht existieren, aber genauso wie Borkenkäferlockstoffe kommerziell in direkt in den Wald ausbringbaren Fertigdispensern angeboten werden können. Durch die hohe Servicefreundlichkeit der Verfahren ist es weiterhin möglich, bisherige personelle wie finanzielle Aufwendungen für Waldschutzmaßnahmen zu verringern. Die entwickelten Verfahren lassen sich außerdem auf weitere Waldschadorganismen übertragen.

Eine zukünftige Kombination der im Teilprojekt 1 entwickelten Fallenfangverfahren mit den im Teil-projekt 2 ermittelten Repellentstoffen im Rahmen von Push-Pull-Verfahren eröffnen zudem neuartige und innovative insektizidfreie Möglichkeiten des Managements von waldschutzrelevanten Zielinsekten und bieten ebenfalls wirtschaftliche Chancen.

Als potenzielle Anbieter für derartige Fallensysteme und Dispenser kommen Forstfachhandel wie z. B. die Flügel GmbH in Frage, als potenzielle Anbieter für die fachgerechte Durchführung dieser Waldschutzverfahren in der Praxis private Forstdienstleistungsbetriebe wie z. B. die Ostdeutsche Gesellschaft für Forstplanung mbH (jetzt OGF GmbH). Zu den potenziellen Nutzergruppen gehören vor allem die Landesforstbetriebe, größere private Forstbetriebe wie z. B. die Hatzfeldt-Wildenburg´sche Verwaltung in Brandenburg oder private Zusammenschlüsse wie Forstbetriebsgemeinschaften und Waldbesitzerverbände.

Eine Übersicht der wirtschaftlichen Verwertungsmöglichkeiten bietet Tabelle 13.

Tabelle 13: Wirtschaftliche Erfolgsaussichten der Verwertung der im Teilvorhaben 1 des Projekts ReBek erzielten Ergebnisse und Erkenntnisse

Verwertung	**Instrumente**	**Zeithorizont**
Nachhaltigere Bewirtschaftung von Wäldern durch Reduzierung des Insektizideinsatzes im Borkenkäfer- und Rüsselkäfermanagement	Veröffentlichungen, Internetauftritt, Informationsmaterial, Handlungsempfehlungen, Fachkonferenzen, Netzwerkbildung mit Industrie und Wissenschaft, Beratungsleistungen, öffentlich Exkursionen, Folgeprojekte, Ausbildung von wissenschaftlichem Nachwuchs	kurz- bis langfristig
Möglichkeit eines Borkenkäfer- und Rüsselkäfermanagements auch in Gebieten, in denen der Einsatz von Insektiziden verboten ist		kurz- bis langfristig
Erhalt von Wirtschaftswald- und Nichtwirtschaftswaldflächen und deren Ökosystemleistungen inklusiv Sicherung des Ertrags aus Wirtschaftswäldern sowie Schutz und Erhalt an Schutzgebiete angrenzender Wirtschaftswaldflächen		mittel- bis langfristig
Steigerung des Verständnisses der Bedeutung und Regulation von Schadinsekten in Wäldern sowie Schaffung von Bewusstsein für bisher oft noch unbeachtete potenzielle Schadorganismen wie *Hylobius abietis*		kurz- bis langfristig
Erweiterung der Produktpalette für ein effektives, flächenangepasstes Borkenkäfer- und Rüsselkäfermanagement		mittel- bis langfristig
Sicherung von Arbeitsplätzen bzw. Schaffung neuer Arbeitsplätze und Märkte		langfristig
Kommerzielle Massenproduktion von Rüsselkäferfallen bestehend aus Grundkörper, Fangbehälter und Lockstoffträger sowie kommerzielle Produktion von Borkenkäferrepellentiendispensern analog zur bisherigen Produktion von Borkenkäferlockstoffdispensern		langfristig
Zucht und Vertrieb von Borkenkäferantagonisten		langfristig

c) Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende

Die Ergebnisse und Erkenntnisse des Projekts ReBek stellen eine wichtige Basis für zukünftige Forschungs- und Entwicklungsarbeiten auf den Gebieten der Nutzung massenfangtauglicher Fallensysteme und des Einsatzes von Repellentstoffen im Rahmen von naturnahen insektizidfreien Waldschutzverfahren zum Management von Borkenkäfern und Rüsselkäfern dar. Sie erweitern die Kompetenzen und die Basis zukünftiger Forschungstätigkeiten der Professur für Waldschutz der TU Dresden. Wissenslücken und neue Forschungsansätze können so schnell identifiziert und in Folgeprojekten unter Nutzung der umfangreichen methodischen Erfahrungen und der erfolgten Netzwerk-bildung zu Wissenschaft und Praxis effektiv bearbeitet werden. Damit wird nicht nur der Bekanntheitsgrad der Arbeitsgruppe, sondern auch deren Beständigkeit und Konkurrenzfähigkeit gestärkt. In diesem Zusammenhang bietet sich auch eine breite Basis für die Qualifizierung

von wissenschaftlichem Nachwuchs, einerseits im Rahmen von studentischen Belegarbeiten, die wissenschaftliche Grundkompetenzen vermitteln und von Graduierungsarbeiten, die einen erfolgreichen Abschluss von Bachelor- und Masterstudium ermöglichen, andererseits im Rahmen der Beschäftigung von Doktoranden zu Zwecken einer Promotion. So sollen auch die beiden Veröffentlichungen zu den im Teilprojekt 1 gewonnenen Daten Grundlage einer kumulativen Promotion des wissenschaftlichen Projektmitarbeiters im Teilprojekt sein. Die zukünftigen beruflichen Chancen wissenschaftlichen Nachwuchses mit Kenntnissen auf dem Gebiet des Waldschutzes werden im Hinblick auf die aktuelle Bedeutung und die Zukunftsträchtigkeit des Forschungsgebiets als sehr gut eingeschätzt.

Der Transfer der Projektergebnisse zu relevanten Nutzergruppen ist bereits durch zahlreiche schriftliche und mündliche Veröffentlichungen erfolgt (siehe Abschnitt 5 in diesem Bericht und Abschnitt 6 im Schlussbericht) und wird auch zukünftig weiterhin eine Rolle spielen. So sind bereits zwei projektbezogene wissenschaftliche Vorträge für die International Conference of Entomology vom 25. bis 30. August 2024 in Kyoto, Japan angemeldet. Weitere schriftliche und mündliche Veröffentlichungen, die auch Daten des Projekts ReBek integrieren, sind sehr wahrscheinlich.

Ebenso bietet die Übertragung der entwickelten Verfahren auf andere Waldschadinsekten großes Potential für einen wissenschaftlichen und technischen Anschluss.

Eine Übersicht der wissenschaftlich-technischen Verwertungsmöglichkeiten bietet Tabelle 14.

Tabelle 14: Wissenschaftlich-technische Erfolgsaussichten der Verwertung der im Teilvorhaben 1 des Projekts ReBek erzielten Ergebnisse und Erkenntnisse

Verwertung	**Instrumente**	**Zeithorizont**
Erweiterung der Kenntnisse der Vorhabensbeteiligten auf den Gebieten der chemischen Ökologie, naturnaher Regulation potenzieller biotischer Schadfaktoren	wissenschaftliche Veröffentlichungen, Fachkonferenzen (z. B. Tharandter Waldschutzkolloquien, Eberswalder Waldkolloquien, IUFRO-Konferenzen, DGaaE-Tagungen), Netzwerkbildung	kurz- bis mittelfristig
Schaffung von Know-How zur Kompetenzerhaltung und -mehrung	Veröffentlichungen (wissenschaftlich und populärwissenschaftlich), Fachkonferenzen, Netzwerkbildung, Folgeprojekte, Informationsmaterial, Internetauftritt	kurz- bis langfristig
Steigerung der wissenschaftlichen Konkurrenzfähigkeit	Veröffentlichungen, Fachkonferenzen, Netzwerkbildung, Folgeprojekte	mittel- bis langfristig
Heranbildung von wissenschaftlichem Nachwuchs	studentische Belegarbeiten, Graduierungsarbeiten, Folgeprojekte	kurz- bis mittelfristig

Fortsetzung Tabelle 14:

Verwertung	Instrumente	Zeithorizont
Transfer zu relevanten Nutzergruppen v. a. in der Praxis	wissenschaftliche und populärwissenschaftliche Veröffentlichungen, Fachkonferenzen, Netzwerkbildung	kurz- bis mittelfristig
Erweiterung der Kenntnisse der Vorhabensbeteiligten auf den Gebieten der chemischen Ökologie, naturnaher Regulation potenzieller biotischer Schadfaktoren	Veröffentlichungen, Fachkonferenzen, Netzwerkbildung, Internetauftritte, Informationsmaterial	kurz- bis mittelfristig
Handlungsempfehlungen zu alternativen, insektizidfreien Verfahren im Borkenkäfer- und Rüsselkäfermanagement	Veröffentlichungen, Internetauftritt, Informationsmaterial	kurzfristig

d) Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Die wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit des Projekts ReBek wird als hoch eingeschätzt. Im Rahmen der Bearbeitung haben sich mehrere Ansätze für weitere, auf Erkenntnissen des Projekts aufbauende Forschungsfragen und -ideen ergeben, die Grundlage für zukünftige Forschungsvorhaben und Kooperationen mit wissenschaftlichen Institutionen und/oder der Industrie im In- und Ausland sein können. Dies betreffen vor allem die weitere Untersuchung und Optimierung der Methodik und Wirksamkeit von Massenfangverfahren für *Hylobius abietis* mit den im Teilprojekt 1 entwickelten modifizierten Nordlander-Fallen. So müssen z. B. die ideale Positionierung der Fallen auf der zu schützenden Fläche und die notwendige Anzahl benötigter Fallen pro Hektar geklärt werden, um eine weitere Implementierung in die Praxis zu ermöglichen. Auch die Entwicklung und Formulierung eines in der Praxis einfach einsetzbaren Lockstoffdispensers, der die zeitaufwendige Ausbringung von alpha-Pinen und Ethanol in offenen Schraubdeckeldosen ersetzt, ist ein weiterer offener Punkt, der mit der Suche nach fangsteigernden Additiven, die im Projekt erfolglos geblieben ist, verbunden werden kann. Die Entwicklung von einfach handhabbaren Fertigdispensern steht auch für den Einsatz der im Teilprojekt 1 ermittelten Repellentstoffen im Borkenkäfermanagement noch aus. Forschungsbedarf besteht hier auch zu Wirkradius und Wirkdauer der ermittelten Substanzen sowie zu deren Abgaberaten und Formulierungen für eine Dispenserausbringung. Ein weiterer wichtiger Schritt ist der Test der vielversprechendsten Substanzen an in der Praxis üblichen Holzpoltern. Nicht zuletzt bieten die Optionen der Kombination der vorgestellten Verfahren zu Push-Pull-Strategien und der Übertragung der entwickelten Verfahren auf andere Waldschadorganismen großes Potenzial für einen wissenschaftlichen Anschluss. Aufgrund der aktuellen Waldschutzsituation in Deutschland und der Erwartungshaltung hinsichtlich des Auftretens von Großschadereignissen im Zuge der Klimaveränderungen ist davon auszugehen, dass auch weiterhin ein hoher Bedarf an waldschutzfachlicher Forschung besteht.

Die wirtschaftliche Anschlussfähigkeit hängt vom wissenschaftlichen und wirtschaftlichen Fortschritt z. B. hinsichtlich der Entwicklung von Fertigdispensern und der Massenproduktion und Verfügbarkeit von Fallensystemen ab. Vor allem für die modifizierte Nordlander-Falle zum insektizidfreien Fang von *Hylobius abietis* als äußerst vielversprechendes Managementinstrument ist dabei eine sehr große Nachfrage seitens Forstbaumschulen, privaten, kommunalen und staatlichen Forstverwaltungen und privaten Waldbesitzenden zu erwarten, welche sich bereits innerhalb des Projektzeitraums in Form von zahlreichen Nachfragen und Interessensbekundungen zeigte. Aber auch hinsichtlich der Praxisanwendung von Repellentstoffen zum Schutz von Rohholz vor der Besiedlung von Borkenkäfern wurde großes Interesse von Waldbesitzenden geäußert und einzelne Substanzen bereits erfolgreich im Privatwaldbesitz angewendet. Der grundsätzliche Bedarf von Verfahren zur Regulierung und Bekämpfung von Borkenkäfern, Rüsselkäfern und anderen Waldschadorganismen zum Schutz der Ressource Wald und deren vielfältigen Ökosystemleistungen wird auch in Zukunft national wie international hoch bleiben bzw. noch weiter steigen. Da einerseits die Verfügbarkeit von Insektiziden stark rückläufig ist und sich die rechtlichen Bestimmungen zu deren Ausbringung zunehmend verschärfen und andererseits gleichzeitig die grundsätzliche gesellschaftliche Akzeptanz der Anwendung von Insektiziden in Wäldern schwindet, wird nicht nur ein hoher Bedarf, sondern auch eine hohe Akzeptanz explizit insektizidfreier Waldschutzverfahren prognostiziert.

5. Erkenntnisse von Dritten

Entsprechend der hohen Aktualität der im Projekt bearbeiteten Fragestellungen und der gegenwärtig großen Bedeutung von *Hylobius abietis* und Borkenkäferarten als nationale bzw. internationale Waldschadorganismen sind im Projektzeitraum zahlreiche Veröffentlichungen publiziert worden, die sich mit den Hauptzielarten der beiden Teilprojekte beschäftigen. Eine beispielhafte Suche in einer der größten Fachdatenbanken, der Web of Science Core Collection, ergab für die Zeitraum ab 2020 bis April 2024 und die Einschränkung der Suche auf Titel und Abstract die in Tabelle 15 dargestellte Anzahl an Treffern für die Hauptzielarten des Projekts sowie die Hauptzielarten in Verbindung mit Schlagwörtern in Bezug auf die Forschungsschwerpunkte in den beiden Teilprojekten. Einige ausgewählte Arbeiten werden anschließend kurz vorgestellt.

In Bezug auf das Teilprojekt 1 und die Zielart *Hylobius abietis* wurde von Lalík et al. (2021) entsprechend der Renaissance der Art als bedeutender Waldschadorganismus ein umfassendes Review zu Ökologie und Management veröffentlicht, während der Schwerpunkt experimenteller Arbeiten im Bereich des Schadensmanagements vor allem bei der Verhinderung von Fraßschäden an Waldverjüngungspflanzen durch verschiedene chemische und mechanische Barrieren liegt (z. B. Galko et al. 2022). Nur die Veröffentlichung von Nordlander et al. (2023) beschäftigt sich wie das Teilprojekt auch mit Fallenfängen

von *Hylobius abietis*, allerdings in Bezug auf die Eignung dieser für die Vorhersage von Fraßschäden und kommt zu dem Schluss, dass Fallenfänge für diese Vorhersage nur schlecht geeignet sind. Für die Zielstellung im Teilprojekt, dem Massenfang von *Hylobius abietis*, hat dieses Ergebnis jedoch keine unmittelbare Relevanz.

Tabelle 15: Ergebnis der Suche nach den im Projekt bearbeiteten Hauptzielarten einzeln und in Verbindung mit forschungsschwerpunktbezogenen Schlagwörtern in der Fachdatenbank Web of Science Core Collection für den Zeitraum 2020 bis April 2024 unter Begrenzung auf Treffern in Titel und Abstract

Stichwort bzw. Stichwortkombination	**Anzahl der Treffer**
Hylobius abietis	36
Hylobius abietis & trap	5
Ips typographus	202
Ips typographus & trap	32
Ips typographus & semiochemical/repellent/anti-attractant	10
Ips sexdentatus	25
Ips sexdentatus & semiochemical/repellent/anti-attractant	0
Trypodendron lineatum	9
Trypodendron lineatum & semiochemical/repellent/anti-attractant	2
Xylosandrus germanus	34
Xylosandrus germanus & semiochemical/repellent/anti-attractant	3

Für die ebenfalls im Teilprojekt 1 bearbeitete Zielart *Ips typographus* führten Šramel et al. (2021) in Slowenien einen Vergleich kommerziell erhältlicher Lockstoffdispenser durch, welcher auch drei der sechs im Teilprojekt getesteten Dispenser enthielt. Der Versuch fand jedoch unter erheblich abweichender Methodik und Zielstellung statt, so dass ein direkter Vergleich der Ergebnisse kaum möglich ist. Mit Deganutti et al. (2024), Jakuš et al. (2022) und Lindmark et al. (2022) beschäftigten sich gleich drei Arbeiten mit dem Ansatz einer Push-Pull-Strategie für das Management von *Ips typographus*. Die Untersuchungen in Italien, Tschechien und Schweden decken den gesamten Nord-Süd-Gradienten Europas ab, lassen jedoch keine eindeutige und einheitliche Schlussfolgerung zu. Wie auch bezüglich des im Projekt durchgeführten Versuchs zur Push-Pull-Strategie erläutert, werden die Ergebnisse solcher Versuche durch eine außerordentlich hohe Anzahl externer Faktoren beeinflusst, deren Ausprägungen im Freiland kaum beeinflussbar, messbar und vorhersagbar sind.

In Bezug auf das Teilprojekt 2 und die Zielart *Ips typographus* sind zusätzlich zu den bereits erwähnten Veröffentlichungen zu einer Push-Pull-Strategie auch die Arbeiten von Jakuš et al. (2024) und Jirošová et al. (2022) zu erwähnen, die sich beide mit dem Einsatz von Repellentien bzw. Anti-Attraktantien beschäftigen. Dabei baut die erstgenannte Arbeit auf

die zweitgenannte auf und spannt den Bogen von Fallenversuchen, wie sie auch im Projekt durchgeführten wurden, zu einem Einsatz der Substanzen auf Bestandesebene, d. h. zum Schutz von stehenden Bäumen. In den beiden angewandten Mischungen von Repellentien waren dabei auch mehrere im Teilprojekt getestete Non-Host-Volatile wie Grünblattduftstoffe und das pilzbürtige 1-Octen-3-ol enthalten, während auf die Verwendung von Verbenon bewusst verzichtet wurde. Beide Versuchsansätze waren erfolgreich: in den mit den Repellentien beköderten Fallen konnte der Fang von *Ips typographus* um über 95 % reduziert werden und es fand keine Besiedlung der mit den Repellentien versehenen Bäumen sowie der im Umkreis von 19 bzw. 30 m stehenden unbehandelten Bäume statt. Des Weiteren ist die Arbeit von Lindmark et al. (2023) zu nennen, die mit Geranylaceton einen neuen pilzbürtigen Anti-Attraktanten bestimmen konnten, der vermutlich eine Überbesiedlung des Wirtsbaums signalisiert. Auch Moliterno et al. (2023) testeten ebenfalls im Teilprojekt angewendete Repellentien: 1,8-Cineol, ein wesentlicher Bestandteil von Eukalyptusöl, Estragol und zwei Terpineole, die mit dem im Teilprojekt verwendeten Terpinen eng verwandt sind. Schlussfolgernd werden 1,8-Cineol und Estragol als Anti-Attraktantien bestimmt und für einen Einsatz in semiochemikalienbasierten Managementverfahren für *Ips typographus* empfohlen.

Für die Zielarten *Ips sexdentatus* und *Trypodendron lineatum* erbrachte die Suche für den genannten Zeitraum keine Arbeiten mit Bezug zum Forschungsschwerpunkt des Projekts. Die Untersuchungen Dritter im Projektzeitraum beziehen sich ausschließlich auf ein Management der Arten durch den Einsatz von Lockstoffen (z. B. Knížek et al. 2022 und Borden und Stokkink 2021) und nicht wie im Projekt durch repellente Reaktionen auslösende Semiochemikalien.

Bezüglich *Xylosandrus germanus* beschäftigen sich die im Projektzeitraum veröffentlichen Arbeiten Dritter vor allem mit Fragen der Biologie und Ökologie wie z. B. der Wirtswahl, mit der Verbreitung bzw. Ausbreitung der Art in Europa, dem Monitoring und den Einsatz von Insektiziden zur Bekämpfung. Mit Hinblick auf die anders gelagerten Forschungsschwerpunkte im Projekt ist die vielzitierte Arbeit von Gugliuzzo et al. (2021) hervorzuheben, die für *Xylosandrus germanus* und zwei weitere Ambrosiakäferarten eine umfassende Übersicht sowohl traditioneller als auch innovativer Managementverfahren geben, die auch die gemeinsame Anwendung von Lock- und Repellenzstoffen im Rahmen einer Push-Pull-Strategie beinhaltet. Im Bereich der biologischen Schädlingsbekämpfung wird außerdem der Einsatz von entomopathogenen und mykoparasitischen Pilzen beschrieben. Gleichzeitig wird aber auch auf den Bedarf einer Validierung vielversprechender Ergebnisse unter Freilandbedingungen hingewiesen. Eine weitere erwähnenswerte Arbeit und die einzige, die auch den Kern des Forschungsschwerpunkts im Projekt trifft, ist die von Agnello et al. (2021), welche sich mit dem Schutz von Apfelplantagen durch den Einsatz verschiedener Repellenz- und Pflanzenabwehrstoff beschäftigten. Dabei kam u. a.

auch das im Projekt in mehreren Versuchen getestete Verbenon zur Anwendung und zeigte, analog zu den Projektergebnissen, aber hier in Kombination mit Methyl-Salicylat, welches im bereits abgeschlossenen Waldklimafonds-Projekt bioProtect getestet wurde, die beste Wirkung aller erprobten Substanzen bezüglich der Reduktion einer Besiedlung der Bäume durch *Xylosandrus germanus*.

6. Veröffentlichungen

Im Rahmen des Projekts erfolgten zahlreiche mündliche und schriftliche Veröffentlichungen der Ergebnisse und Erkenntnisse im In- und Ausland. Außerdem schlossen drei Studierende ihr Bachelor- oder Masterstudium der Forstwissenschaften der TU Dresden erfolgreich mit einer Graduierungsarbeit im Rahmen des Projekts ab. Eine weitere Masterarbeit zur Zielart *Hylobius abietis* befindet sich noch in der Bearbeitung. Der Abschluss wird im Sommersemester 2024 erfolgen. Des Weiteren sind zwei projektbezogene wissenschaftliche Vorträge von Prof. Dr. Michael Müller („Trapping *Hylobius abietis* – an alternative to the use of insecticides“) und Dr. Christiane Helbig („Options for an insecticide-free management of the black stem borer, *Xylosandrus germanus*, a non-native bark beetle in Germany“) für die International Conference of Entomology vom 25. bis 30. August 2024 in Kyoto, Japan angemeldet. Weitere mündliche und schriftliche Veröffentlichungen sind denkbar.

Wissenschaftliche Publikationen

- Heber, T.; Helbig, C. E.; Osmers, S.; Larquette, M.; Müller, M. (2023): Insektizidfreie Falle für den Großen Braunen Rüsselkäfer. AFZ-Der Wald 78 (5): 42-46.
- Heber, T.; Helbig, C. E.; Osmers, S.; Larquette, M.; Müller, M. (2024): Evaluation of trap type and attractant composition for potential mass trapping of *Hylobius abietis*. Agricultural and Forest Entomology 26 (1): 1-17.
- Heber, T.; Helbig, C. E.; Osmers, S.; Müller, M. G. (2021): Evaluation of attractant composition, application rate, and trap type for potential mass trapping of *Ips typographus* (L.). Forests 12 (12): 115-134.

Wissenschaftliche Vorträge

- Heber, T.; Osmers, S. (2022): Gotta catch'em all – Massenfang statt Insektizid im Projekt ReBek. Vortrag zur Tharandt Convention am 04. Mai 2022, Tharandt.
- Heber, T. (2022): *Hylobius abietis* - Gotta catch 'em all? Vortrag zum 4. Tharandter Waldschutzkolloquium vom 13. bis 14. Oktober 2022 in Tharandt, Deutschland.
- Heber, T. (2023): Mass trapping of the large pine weevil *Hylobius abietis* L. - Chances and challenges. Vortrag zur DGaaE-Entomologentagung vom 20. bis 23. Februar 2023 in Bozen, Italien.

- Helbig, C. (2023): Chemische Sabotage im Borkenkäfermanagement: Neue Ansätze zur Ausnutzung chemischer Kommunikation von Insekten. Vortrag zur Tagung des Deutschen Verbands Forstlicher Forschungsanstalten, Sektion Waldschutz vom 13. bis 16. März 2023 in Arnsberg, Deutschland.
- Helbig, C. (2023): Interference in bark beetle host selection: Effects of allochthonous kairomones, anti-aggregation substances and non-host volatiles on bark beetles and their antagonists. Vortrag zur IUFRO Conference vom 29. bis 31. August 2023 in Bordeaux, Frankreich.

Graduierungsarbeiten

- Nikulka, P. (2022): Untersuchung der Wirkung einer erhöhten Applikation des Standarddispensers Typosan® auf die Fangzahlen des Buchdruckers (*Ips typographus*) unter der Beachtung wichtiger Antagonisten. Bachelorarbeit. TU Dresden, Professur für Waldschutz.
- Krautz, N. (2023): Freilandversuch zur Wirkung potenziell repellenter Semiochemikalien auf den Fang von Borkenkäfern und deren Antagonisten in Schlitzfallen in einem Bestand mit Rot-Buche (*Fagus sylvatica* L.) im Tharandter Wald. Masterarbeit. TU Dresden, Professur für Waldschutz.
- Larquette, M. (2023): Vergleich der Wirkung unterschiedlicher Semiochemikalien auf den Fang des Großen Braunen Rüsselkäfers (*Hylobius abietis* L.) unter der Beachtung von Beifängen. Masterarbeit. TU Dresden, Professur für Waldschutz.
- Mörchen, L. (voraussichtlich 2024): Beurteilung der Effektivität von Nordlander-Fallen hinsichtlich der Schutzwirkung auf die Nadelholzverjüngung sowie der Fangselektivität. Masterarbeit. TU Dresden, Professur für Waldschutz.

7. Literaturverzeichnis

Agnello, A. M.; Combs, D. B.; Filgueiras, C. C.; Willett, D. S.; Mafra-Neto, A. (2021): Reduced infestation by *Xylosandrus germanus* (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae) in apple trees treated with host plant defense compounds. Journal of Economic Entomology 114 (5): 2162-2171.

Altenkirch, W.; Bogenschütz, H. (2002): Waldschutz auf ökologischer Grundlage. 86 Tabellen. Ulmer, Stuttgart (Hohenheim). 434 S.

Andersson, M. (2007): The effect on non-host volatiles on habitat location by phytophagus insects. Introductory Paper. Sveriges lantbruksuniversitet (SLU), Alnarp. Faculty of Landscape Planning, Horticulture and Agricultural Sciences. 38 S.

Baier, P. (1994): Untersuchungen zur abundanzdynamischen Relevanz der Beifänge von *Nemosoma elongatum* (L.) (Col., Ostomidae) in Chalcoprax® beköderten Flugbarrierefallen für *Pityogenes chalcographus* (L.) (Col., Scolytidae). Journal of Applied Entomology 117 (1-5): 51-57.

Baier, P.; Pennerstorfer, J.; Schopf, A. (2007): PHENIPS—A comprehensive phenology model of *Ips typographus* (L.) (Col., Scolytinae) as a tool for hazard rating of bark beetle infestation. Forest Ecology and Management 249 (3): 171-186.

Bakke, A. (1970): Evidence of a population aggregating pheromone in *Ips typographus* (Coleoptera). Scolytidae). Contributions Boyce Thompson Institute for Plant Research 24 (13): 309-310.

Bakke, A. (1976): Spruce bark beetle, *Ips typographus*: Pheromone production and field response to synthetic pheromones. Naturwissenschaften 63: 92.

Bakke, A. (1981): Inhibition of the response in *Ips typographus* to the aggregation pheromone; field evaluation of verbenone and ipsenol. Zeitschrift für Angewandte Entomologie 92 (1-5): 172-177.

Bakke, A.; Kvamme, T. (1981): Kairomone response in *Thanasimus* predators to pheromone components of *Ips typographus*. Journal of Chemical Ecology 7 (2): 305-312.

Batish, D. R.; Singh, H. P.; Kohli, R. K.; Kaur, S. (2008): Eucalyptus essential oil as a natural pesticide. Forest Ecology and Management 256 (12): 2166-2174.

Björklund, N. (2004): Movement behaviour and resource tracking in the pine weevil *Hylobius abietis*. Dissertation. Sveriges lantbruksuniversitet, Umeå.

Björklund, N. (2008): Cues for shelter use in a phytophagous insect. Journal of Insect Behavior 21: 9-23.

Björklund, N.; Nordlander, G.; Bylund, H. (2003): Host-plant acceptance on mineral soil and humus by the pine weevil *Hylobius abietis* (L.). Agricultural and Forest Entomology 5 (1): 61-66.

Borden, J. H. (1989): Semiochemicals and bark beetle populations: Exploitation of natural phenomena by pest management strategists. Ecography 12 (4): 501-510.

Borden, J. H.; Stokkink, E. (2021): Semiochemical-based integrated pest management of ambrosia beetles (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae) in British Columbia's forest industry: implemented in 1982 and still running. The Canadian Entomologist 153 (1): 79-90.

Byers, J. A. (2004): Chemical ecology of bark beetles in a complex olfactory landscape. In: Lieutier, F. (Hg.): Bark and wood boring insects in living trees in Europe. A synthesis. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht: 89-134.

Bylund, H.; Nordlander, G.; Nordenhem, H. (2004): Feeding and oviposition rates in the pine weevil *Hylobius abietis* (Coleoptera: Curculionidae). Bulletin of Entomological Research 94 (4): 307-317.

Cook, S. M.; Khan, Z. R.; Pickett, J. A. (2007): The use of push-pull strategies in integrated pest management. Annual Review of Entomology 52: 375-400.

Cui, K.; Zhang, L.; He, L.; Zhang, Z.; Zhang, T.; Mu, W. et al. (2021): Toxicological effects of the fungal volatile compound 1-octen-3-ol against the red flour beetle, *Tribolium castaneum* (Herbst). Ecotoxicology and environmental safety 208: 111597.

Day, K. R.; Nordlander, G.; Kenis, M.; Halldorson, G. (2004): General biology and life cycles of bark weevils. In: Lieutier, F., Day, K. R., Battisti, A., Grégoire, J.-C. und Evans, H. F. (Hg.): Bark and wood boring insects in living trees in Europe, a synthesis. 1. Aufl. Springer, Dordrecht: 331-349.

Deganutti, L.; Biscontin, F.; Bernardinelli, I.; Faccoli, M. (2024): The semiochemical push-and-pull technique can reduce bark beetle damage in disturbed Norway spruce forests affected by the Vaia storm. Agricultural and Forest Entomology 26 (1): 115-125.

Dickens, J. C.; Billings, R. F.; Payne, T. L. (1992): Green leaf volatiles interrupt aggregation pheromone response in bark beetles infesting southern pines. Experientia 48: 523-524.

Diksha; Singh, S.; Mahajan, E.; Sohal, S. K. (2023): Growth inhibitory, immunosuppressive, cytotoxic, and genotoxic effects of γ-terpinene on *Zeugodacus cucurbitae* (Coquillett) (Diptera: Tephritidae). Scientific reports 13 (1): 16472.

Dippel, C. (1991): Zur Biologie des Borkenkäferpredators *Nemosoma elongatum*. Naturwissenschaften 78: 473-474.

Ditz, H. M.; Nieder, A. (2016): Numerosity representations in crows obey the Weber-Fechner law. Proceedings. Biological sciences 283 (1827): 1-9.

Duduman, M. L.; Olenici, N.; Bouriaud, O.; Olenici, V. (2009): Natural volatiles impair the response of *Hylobius abietis* adults to synthetic attractants in Norway spruce clear cut areas. Annals of Forest Research 52 (1): 77-88.

Eidmann, H. H. (1997): Assessment of pine weevil numbers on clear-cut and forest sites with shelter boards and pitfall traps. Anzeiger für Schädlingskunde 70 (4): 68-72.

Elgstrand, A. (1921): An experiment with Grohmann's trap for pine weevils. Skogen 8: 225-229.

Etxebeste, I.; Pajares, J. A. (2011): Verbenone protects pine trees from colonization by the six-toothed pine bark beetle, *Ips sexdentatus* Boern. (Col.: Scolytinae). Journal of Applied Entomology 135 (4): 258-268.

Fedderwitz, F.; Björklund, N.; Ninkovic, V.; Nordlander, G. (2014): Diel behaviour and time budget of the adult pine weevil *Hylobius abietis*. Physiological Entomology 39 (2): 103-110.

Francke, W.; Bartels, J.; Meyer, H.; Schröder, F.; Kohnle, U.; Baader, E.; Vité, J. P. (1995): Semiochemicals from bark beetles: New results, remarks, and reflections. Journal of Chemical Ecology 21 (7): 1043-1062.

Frontini, A.; Bellis, L. de; Luvisi, A.; Blando, F.; Allah, S. M.; Dimita, R. et al. (2022): The green leaf volatile (Z)-3-hexenyl acetate is differently emitted by two varieties of *Tulbaghia violacea* plants routinely and after wounding. Plants 11 (23).

Galko, J.; Dzurenko, M.; Ranger, C. M.; Kulfan, J.; Kula, E.; Nikolov, C. et al. (2018): Distribution, habitat preference, and management of the invasive ambrosia beetle *Xylosandrus germanus* (Coleoptera: Curculionidae, Scolytinae) in European forests with emphasis on the West Carpathians. Forests.

Galko, J.; Gubka, A.; Vakula, J.; Brutovský, D. (2010): Comparison of catches of the spruce bark beetle (*Ips typographus* L.) (Coleoptera: Scolytidae) in pheromone traps of Canadian and European production. Central European Forestry Journal 56 (4): 337-347.

Galko, J.; Nikolov, C.; Kunca, A.; Vakula, J.; Gubka, A.; Zubrik, M. et al. (2016): Effectiveness of pheromone traps for the European spruce bark beetle. A comparative study of four commercial products and two new models. Central European Forestry Journal 62 (4): 207-215.

Giatropoulos, A.; Papachristos, D. P.; Kimbaris, A.; Koliopoulos, G.; Polissiou, M. G.; Emmanouel, N.; Michaelakis, A. (2012): Evaluation of bioefficacy of three Citrus essential oils against the dengue vector *Aedes albopictus* (Diptera: Culicidae) in correlation to their component's enantiomeric distribution. Parasitology research 111 (6): 2253-2263.

Gillette, N. E.; Munson, A. S. (2007): Semiochemical sabotage: behavioral chemicals for protection of western conifers from bark beetles. In: The Western Bark Beetle Research Group (Hg.): Proceedings of a symposium at the 2007 Society of American Foresters Conference. Unter Mitarbeit von Hayes, J. L. und Lundquist, J. E. Portland, Oregon, 23.-28. Oktober: 85-109.

Goyer, R. A.; Lenhard, G. J.; Strom, B. L. (2004): The influence of silhouette color and orientation on arrival and emergence of *Ips* pine engravers and their predators in loblolly pine. Forest Ecology and Management 191 (1-3): 147-155.

Groschke, F. (1953): Der "schwarze Nutzholzborkenkäfer", *Xylosandrus germanus* Blandf., ein neuer Schädling in Deutschland. Zeitschrift für Angewandte Entomologie 34: 297-302.

Gugliuzzo, A.; Biedermann, P. H. W.; Carrillo, D.; Castrillo, L. A.; Egonyu, J. P.; Gallego, D. et al. (2021): Recent advances toward the sustainable management of invasive *Xylosandrus* ambrosia beetles. Journal of Pest Science 94 (3): 615-637.

Hamilton, J. F.; Lewis, A. C.; Carey, T. J.; Wenger, J. C.; Borrás i Garcia, E.; Muñoz, A. (2009): Reactive oxidation products promote secondary organic aerosol formation from green leaf volatiles. Atmospheric Chemistry and Physics 9 (11): 3815-3823.

Hansen, K. (1983): Reception of bark beetle pheromone in the predaceous clerid beetle,*Thanasimus formicarius* (Coleoptera: Cleridae). Journal of Comparative Physiology 150 (3): 371-378.

Heber, T.; Helbig, C. E.; Osmers, S.; Larquette, M.; Müller, M. (2023): Insektizidfreie Falle für den Großen Braunen Rüsselkäfer. AFZ-Der Wald 78 (5): 42-46.

Heber, T.; Helbig, C. E.; Osmers, S.; Larquette, M.; Müller, M. (2024): Evaluation of trap type and attractant composition for potential mass trapping of *Hylobius abietis*. Agricultural and Forest Entomology 26 (1): 1-17.

Heber, T.; Helbig, C. E.; Osmers, S.; Müller, M. G. (2021): Evaluation of attractant composition, application rate, and trap type for potential mass trapping of *Ips typographus* (L.). Forests 12 (12): 115-134.

Helbig, C.; Heber, T. (2020): Chemical sabotage in forest health management: Effects of *Allium ursinum* L. based semiochemicals on the catches of bark beetles and their antagonists in stands of European ash (*Fraxinus excelsior* L.). Mitteilungen der Deutschen Gesellschaft für Allgemeine und Angewandte Entomologie 22: 273-277.

Helbig, C.; Müller, M. (2021): Schlussbericht zum Vorhaben: Entwicklung und Implementierung biotechnischer Verfahren der insektizidfreien Borkenkäferregulation durch Nutzung und Steuerung natürlicher Borkenkäferantagonisten als Maßnahmen zum Erhalt der biologischen Vielfalt und der damit verbundenen CO_2-Senkenfunktion der Wälder (bioProtect).

Hert, M. (2018): Qualitative und quantitative Analyse ausgewählter Zitrusöle. Diplomarbeit. Karl-Franzens-Universität Graz.

Herting, B. (1979): Ein Beitrag zur Kenntnis von *Gnathotrichus materiarius* Fitch, der Adventivart aus Nordamerika (Col. Scolytidae). Mitteilungen Entomologischer Verein Stuttgart 14: 57-87.

Hobson, K. R. (1993): Host compounds as semiochemicals for bark beetles. In: Salomon, S. M. und Hobson, K. R. (Hg.): Application of semiochemicals for management of bark beetle infestitations. Proceedings of an informal conference. Annual Meeting of the Entomological Society of America. Indianapolis: 48-51.

Holighaus, G.; Schütz, S. (2006): Odours of wood decay as semiochemicals for *Trypodendron domesticum* L. (Col., Scolytidae). Mitteilungen der Deutschen Gesellschaft für Allgemeine und Angewandte Entomologie 15: 161-166.

Huber, D. P.; Fettig, C. J.; Borden, J. H. (2021): Disruption of coniferophagous bark beetle (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae) mass attack using angiosperm nonhost volatiles: from concept to operational use. The Canadian Entomologist 153 (1): 19-35.

Hussain, M. I.; Qamar Abbas, S.; Reigosa, M. J. (2018): Activities and novel applications of secondary metabolite coumarins. Planta Daninha 36 (0).

Islam, M. S.; Hasan, M. M.; Xiong, W.; Zhang, S. C.; Lei, C. L. (2009): Fumigant and repellent activities of essential oil from *Coriandrum sativum* (L.) (Apiaceae) against red flour beetle *Tribolium castaneum* (Herbst) (Coleoptera: Tenebrionidae). Journal of Pest Science 82 (2): 171-177.

Ivanova, A.; Mikhova, B.; Najdenski, H.; Tsvetkova, I.; Kostova, I. (2009): Chemical composition and antimicrobial activity of wild garlic *Allium ursinum* of Bulgarian origin. Natural product communications 4 (8): 1059-1062.

Jakuš, R.; Blaženec, M.; OldřiVojtěch; Vojtěch, O. (2011a): Use of anti-attractants in specific conditions of protected areas. Folia Oecologica 38 (1): 46-51. Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/publication/259590289_Use_of_anti-attractants_in_specific_conditions_of_protected_areas.

Jakuš, R.; Blaženec, M.; Vojtěch, O. (2011b): Use of anti-attractants in specific conditions of protected areas. Folia Oecologica 38 (1): 46-51.

Jakuš, R.; Modlinger, R.; Kašpar, J.; Majdák, A.; Blaženec, M.; Korolyova, N. et al. (2022): Testing the efficiency of the push-and-pull strategy during severe *Ips typographus* outbreak and extreme drought in Norway spruce stands. Forests 13 (12): 2175.

Jakuš, R.; Trubin, A.; Singh, V. V.; Zabihi, K.; Jirošová, A.; Modlinger, R. et al. (2024): Spruce protection against Ips typographus with anti-attractant blend of tree-based semiochemicals: From small experimental plots to stand scales. Forests 15 (2): 356.

Jirošová, A.; Kalinová, B.; Modlinger, R.; Jakuš, R.; Unelius, C. R.; Blaženec, M.; Schlyter, F. (2022): Anti-attractant activity of (+)-trans-4-thujanol for Eurasian spruce bark beetle *Ips typographus*: Novel potency for females. Pest Management Science 78 (5): 1992-1999.

Kauth, H.; Madel, W. (1955): Über die Ergebnisse der im Schwarzwald und Hunsrück von 1952 bis 1954 durchgeführten Freilandversuche zur Anlockung des Großen Braunen Fichtenrüsselkäfers *Hylobius abietis* L., mit Lockstoffen. Journal of Applied Entomology 37: 239-244.

Kesselmeier, J.; Staudt, M. (1999): Biogenic volatile organic compounds (VOC): an overview on emission, physiology and ecology. Journal of Atmospheric Chemistry 33 (1): 23-88.

Kimmerer, T. W.; Kozlowski, T. T. (1982): Ethylene, ethane, acetaldehyde, and ethanol production by plants under stress. Forestry 69 (4): 840-847.

Kirkendall, L. R.; Faccoli, M. (2010): Bark beetles and pinhole borers (Curculionidae, Scolytinae, Platypodinae) alien to Europe. ZooKeys 56 (Spec): 227-251.

Kissel, F. (1911): Die Kisselsche Rüsselkäferfalle. Zeitschrift für wissenschaftliche Insektenbiologie 7: 23-25.

Kivimäenpää, M.; Magsarjav, N.; Ghimire, R.; Markkanen, J.-M.; Heijari, J.; Vuorinen, M.; Holopainen, J. K. (2012): Influence of tree provenance on biogenic VOC emissions of Scots pine (*Pinus sylvestris*) stumps. Atmospheric Environment 60 (D7): 477-485.

Knížek, M.; Liška, J.; Véle, A. (2022): Efficacy of synthetic lures for pine bark beetle monitoring. Journal of Forest Science 68 (1): 19-25.

Kühlhorn, J. L. (2017): Vermeidung von Beifängen durch den Einsatz eines Kragens an einer neuartigen pestizidfreien Bodenfalle für den Großen Braunen Rüsselkäfer (*Hylobius abietis* L.). Bachelor Thesis. Technische Universität Dresden, Tharandt. Institute of Silviculture and Forest Protection. 41 S.

Lalík, M.; Holuša, J.; Galko, J.; Resnerová, K.; Kunca, A.; Nikolov, C. et al. (2019): Simple is best: Pine twigs are better than artificial lures for trapping of pine weevils in pitfall traps. Forests 10 (8): 1-16.

Långström, B.; Day, K. R. (2004): Damage, control and management of weevil pests, especially *Hylobius abietis*. In: Lieutier, F., Day, K. R., Battisti, A., Grégoire, J.-C. und Evans, H. F. (Hg.): Bark and wood boring insects in living trees in Europe, a synthesis. 1. Aufl. Springer, Dordrecht: 415-444.

Lindelöw, A.; Eidmann, H. H.; Nordenhem, H. (1993): Response on the ground of bark beetle and weevil species colonizing conifer stumps and roots to terpenes and ethanol. Journal of Chemical Ecology 19 (7): 1393-1403.

Lindgren, B. S. (1983): A multiple funnel trap for scolytid beetles (Coleoptera). The Canadian Entomologist 115 (3): 299-302.

Lindgren, B. S.; Miller, D. R. (2002): Effect of verbenone on attraction of predatory and woodboring beetles (Coleoptera) to kairomones in lodgepole pine forests. Environmental Entomology 31 (5): 766-773.

Lindmark, M.; Ganji, S.; Wallin, E. A.; Schlyter, F.; Unelius, C. R. (2023): Semiochemicals produced by fungal bark beetle symbiont *Endoconidiophora rufipennis* and the discovery of an anti-attractant for *Ips typographus*. PloS one 18 (4): e0283906.

Lindmark, M.; Wallin, E. A.; Jonsson, B.-G. (2022): Protecting forest edges using trap logs – Limited effects of associated push-pull strategies targeting *Ips typographus*. Forest Ecology and Management 505: 119886.

Liu, K.; Chen, Q.; Liu, Y.; Zhou, X.; Wang, X. (2012): Isolation and biological activities of decanal, linalool, valencene, and octanal from sweet orange oil. Journal of food science 77 (11): 1156-1161.

Martín, A.; Etxebeste, I.; Pérez, G.; Álvarez, G.; Sánchez, E.; Pajares, J. (2013): Modified pheromone traps help reduce bycatch of bark-beetle natural enemies. Agricultural and Forest Entomology 15 (1): 86-97.

Matyjaszczyk, E.; Karmilowicz, E.; Skrzecz, I. (2019): How European Union accession and implementation of obligatory Integrated Pest Management influenced forest protection against harmful insects: A case study from Poland. Forest Ecology and Management 433: 146-152.

Moliterno, A. A. C.; Jakuš, R.; Modlinger, R.; Unelius, C. R.; Schlyter, F.; Jirošová, A. (2023): Field effects of oxygenated monoterpenes and estragole combined with pheromone on attraction of *Ips typographus* and its natural enemies. Frontiers in Forests and Global Change 6.

Mudrončeková, S.; Ferenčík, J.; Gruľová, D.; Barta, M. (2019): Insecticidal and repellent effects of plant essential oils against *Ips typographus*. Journal of Pest Science 92 (2): 595-608.

Müller, M. (1993): Untersuchungen zur Attraktion und Repulsion des Großen braunen Rüsselkäfers, *Hylobius abietis* L. (Coleoptera, Curculionidae). Dissertation. Technische Universität Dresden, Tharandt/Dresden. Waldbau und Waldschutz.

Müller, M.; Schua, K.; Kotte, S.; Vetter, S. (2008): Die tatsächliche Frequentierung von Borkenkäferschlitzfallen durch die Ameisenbuntkäfer Thanasimus formicarius, Thanasimus rufipes und Thanasimus pectoralis (Cleridae) sowie Borkenkäfer (Scolytidae). Allgemeine Forst- und Jagdzeitung (179): 51-56.

Nedić, N.; Kostić, M. B.; Marković, T. L.; Marković, M.; Jevtić, G.; Anđelković, B. (2014): Insecticidal activity of sage (*Salvia officinalis*) essential oil to Varroa destructor (Acarii: Varroidae) and *Apis mellifera* (Hymenoptera: Apidae). In: Petrović, M. und Popvić, Z. (Hg.): Proceedings of the International Symposium on Animal Science. Belgrad.

Neumann, A.; Müller, M. (1991): Rüsselkäferbekämpfung. Eine Bodenfalle für den Großen Braunen Rüsselkäfer, *Hylobius abietis* L. (Coleoptera: Curculionidae). Der Wald 41: 102-103.

Niemeyer, H. (1985): Field response of Ips typographus L. (Col., Scolytidae) to different trap structures and white versus black flight barriers1. Journal of Applied Entomology 99 (1-5): 44-51.

Niemeyer, H.; Schröder, T.; Watzek, G. (1983): Eine neue Lockstoff-Falle zur Bekämpfung von rinden- und holzbrütenden Borkenkäfern. Forst- und Holzwirt (38): 105-112.

Nordenhem, H.; Eidmann, H. H. (1991): Response of the pine weevil *Hylobius abietis* L. (Col., Curculionidae) to host volatiles in different phases of its adult life cycle. Journal of Applied Entomology 112 (1-5): 353-358.

Nordlander, G. (1987): A method for trapping *Hylobius abietis* (L.) with a standardized bait and its potential for forecasting seedling damage. Scandinavian Journal of Forest Research 2 (1-4): 199-213.

Nordlander, G. (1990): Limonene inhibits attraction to α-pinene in the pine weevils *Hylobius abietis* and *H. pinastri*. Journal of Chemical Ecology 16 (4): 1307-1320.

Nordlander, G.; Bylund, H.; Örlander, G.; Wallertz, K. (2010): Pine weevil population density and damage to coniferous seedlings in a regeneration area with and without shelterwood. Scandinavian Journal of Forest Research 18 (5): 438-448.

Novák, V. (1965): Ein neuer Typ von Fallen zur Bekämpfung des Rüsselkäfers *Hylobius abietis* L. Anzeiger für Schädlingskunde 38 (6): 88-90.

Olenici, N.; Duduman, M. L.; Teodosiu, M.; Olenici, V. (2016): Efficacy of artificial traps to prevent the damage of conifer seedlings by large pine weevil (*Hylobius abietis* L.) - a preliminary study. Bulletin of the Transilvania University of Braşov 9: 9-20.

Örlander, G.; Nordlander, G.; Wallertz, K.; Nordenhem, H. (2000): Feeding in the crowns of Scots pine trees by the pine weevil *Hylobius abietis*. Scandinavian Journal of Forest Research 15 (2): 194-201.

Perkins, D. L.; Jorgensen, C. L.; Rinella, M. J. (2015): Verbenone decreases whitebark pine mortality throughout a mountain pine beetle outbreak. Forest Science 61 (4): 747-752.

Prasse, A.; Zeller, K.-P.; Siehl, H.-U.; Berger, S.; Sicker, D. (2018): Estragol aus Estragon: Wohldosiert ein kulinarischer Genuss. Chemie in unserer Zeit 52 (1): 56-64.

Prokopy, R. J.; Owens, E. D. (1983): Visual detection of plants by herbivorous insects. Annual Review of Entomology 28 (1): 337-364.

Pureswaran, D. S.; Borden, J. H. (2004): New repellent semiochemicals for three species of *Dendroctonus* (Coleoptera: Scolytidae). Chemoecology 14 (2): 67-75.

Pureswaran, D. S.; Gries, R.; Borden, J. H. (2004): Antennal responses of four species of tree-killing bark beetles (Coleoptera: Scolytidae) to volatiles collected from beetles, and their host and nonhost conifers. Chemoecology 14 (2): 59-66.

Rachow, C. (2019): Infochemikalien von Stamm und Wurzel der Rot-Buche (*Fagus sylvatica* L.): Methodenentwicklung und Betrachtung des VOC-Musters. Dissertation. Georg-August-Universität Göttingen.

Ranger, C. M.; Reding, M. E.; Schultz, P. B.; Oliver, J. B.; Frank, S. D.; Addesso, K. M. et al. (2016): Biology, ecology, and management of nonnative ambrosia beetles (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae) in ornamental plant nurseries. Journal of Integrated Pest Management 7 (1): 25.

Reding, M. E.; Ranger, C. M.; Oliver, J. B.; Schultz, P. B.; Youssef, N. N.; Bray, A. M. (2017): Ethanol-injection induces attacks by ambrosia beetles (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae) on a variety of tree species. Agricultural and Forest Entomology 19 (1): 34-41.

Schlyter, F.; Löfqvist, J.; Byers, J. A. (1987): Behavioural sequence in the attraction of the bark beetle *Ips typographus* to pheromone sources. Physiological Entomology 12 (2): 185-196.

Schmidt, O. (2004): Eingeschleppte Borkenkäferarten in Bayerischen Wäldern. LWF aktuell 45: 21-22.

Schroeder, L. (2003): Differences in responses to α-pinene and ethanol, and flight periods between the bark beetle predators *Thanasimus femoralis* and *T. formicarius* (Col.: Cleridae). Forest Ecology and Management 177 (1-3): 301-311.

Schwerdtfeger, F. (1950): Investigations on the chemical control of *H. abietis*. Forstwissenschaftliches Centralblatt 69 (12): 689-703.

Schwerdtfeger, F. (1957): Die Waldkrankheiten: ein Lehrbuch der Forstpathologie und des Forstschutzes. 2. Auflage. Parey, Hamburg.

Seybold, S. J.; Bentz, B. J.; Fettig, C. J.; Lundquist, J. E.; Progar, R. A.; Gillette, N. E. (2018): Management of Western North American bark beetles with semiochemicals. Annual Review of Entomology 63: 407-432.

Seybold, S. J.; Fettig, C. J. (2020): Managing bark and ambrosia beetles (Coleoptera. Curculionidae: Scolytinae) with semiochemicals. The Canadian Entomologist 13: 1-9.

Sobczyk, T.; Matschulla, F.; Otto, L.-F. (2023): Der Langhalsborkenkäfer, *Orthotomicus longicollis* (GYLLENHAL, 1827) in Deutschland – vom Aussterben bedroht oder ein Waldschutzproblem (Coleoptera, Curculionidae, Scolytinae). Entomologische Nachrichten und Berichte (2): 157-162.

Sriti Eljazi, J.; Bachrouch, O.; Salem, N.; Msaada, K.; Aouini, J.; Hammami, M. et al. (2017): Chemical composition and insecticidal activity of essential oil from coriander fruit against *Tribolium castaenum*, *Sitophilus oryzae*, and *Lasioderma serricorne*. International Journal of Food Properties 20: 2833-2845.

Strömvall, A.-M.; Petersson, G. (1991): Conifer monoterpenes emitted to air by logging operations. Scandinavian Journal of Forest Research 6 (1-4): 253-258.

Tilles, D. A.; Eidmann, H. H.; Solbreck, B. (1988): Mating stimulant of the pine weevil *Hylobius abietis* (L.). Journal of Chemical Ecology 14 (6): 1495-1503.

Tilles, D. A.; Nordlander, G.; Nordenhem, H.; Eidmann, H. H.; Wassgren, A.-B.; Bergström, G. (1986a): Increased release of host volatiles from feeding scars: a major cause of field aggregation in the pine weevil *Hylobius abietis* (Coleoptera: Curculionidae). Environmental Entomology 15 (5): 1050-1054.

Tilles, D. A.; Sjödin, K.; Nordlander, G.; Eidmann, H. H. (1986b): Synergism between ethanol and conifer host volatiles as attractants for the pine weevil, *Hylobius abietis* (L.) (Coleoptera: Curculionidae). Journal of Economic Entomology 79 (4): 970-973.

Tømmerås, B. (1985): Specialization of the olfactory receptor cells in the bark beetle *Ips typographus* and its predator *Thanasimus formicarius* to bark beetle pheromones and host tree volatiles. Journal of Comparative Physiology 157 (3): 335-341.

Wehnert, M. (2014): Analyse und olfaktorische Steuerung bast- und holzbesiedelnder sowie diese natürlich regulierender zoophager Insekten an Laubbäumen als Grundlage für ein zukunftsfähiges und nachhaltiges Risikomanagement. Dissertation. TU Dresden. Institut für Waldbau und Waldschutz. 359 S.

Wehnert, M.; Müller, M. (2012): Allochthonous kairomones in stands of European beech (*Fagus sylvatica*) – Approach for nature-based bark beetle management with clerid beetles (*Thanasimus* spp.). Biological Control 62 (1): 16-23.

Wermelinger, B. (2004): Ecology and management of the spruce bark beetle *Ips typographus* - a review of recent research. Forest Ecology and Management (202): 67-82.

Wibe, A.; Borg-Karlson, A.-K.; Norin, T.; Mustaparta, H. (1997): Identification of plant volatiles activating single receptor neurons in the pine weevil (*Hylobius abietis*). Journal of Comparative Physiology 180 (6): 585-595.

Wibe, A.; Borg-Karlson, A.-K.; Persson, M.; Norin, T.; Mustaparta, H. (1998): Enantiomeric composition of monoterpene hydrocarbons in some conifers and receptor neuron discrimination of α-pinene and limonene enantiomers in the pine weevil, *Hylobius abietis*. Journal of Chemical Ecology 24 (2): 273-287.

Wibe, A.; Mustaparta, H. (1996): Encoding of plant odours by receptor neurons in the pine weevil (*Hylobius abietis*) studied by linked gas chromatography-electrophysiology. Journal of Comparative Physiology 179 (3): 331-344.

Wilson, I. M.; Borden, J. H.; Gries, R.; Gries, G. (1996): Green leaf volatiles as antiaggregants for the mountain pine beetle, *Dendroctonus ponderosae* Hopkins (Coleoptera: Scolytidae). Journal of Chemical Ecology 22 (10): 1861-1875.

Wood, D. L. (1982): The role of pheromones, kairomones, and allomones in the host selection and colonization behavior of bark beetles. Annual Review of Entomology 27 (1): 411-446.

Zahradník, P.; Zahradníková, M. (2015): The Efficacy of a new Pheromone Trap Setup Design, aimed for trapping *Ips typographus*(Coleoptera, Curculionidae, Scolytinae). Šumarski list 139 (3-4): 185-186. Online verfügbar unter https://hrcak.srce.hr/file/209379.

Zumr, V. (1992): Dispersal of the spruce bark beetle *Ips typographus* (L.) (Col., Scolytidae) in spruce woods. Journal of Applied Entomology 114 (1-5): 348-352.