

Untersuchungen zum Ausbreitungsverhalten des Buchdruckers (*Ips typographus*, Col., Scolytinae)

BMLFUW Forschungsprojekt Nr. 101083 (Genehmigungszahl: LE.3.2.3/0008-III/2/2015)

und

Räumliche Lockwirkung von Pheromonfallen in Abhängigkeit von Wind- und Geländebedingungen

Ergänzungsstudie zum BMLFUW Forschungsprojekt Nr. 101083

Bericht

April 2018

Projektleiter:

Univ.Prof. Dr. Axel Schopf

Wissenschaftliche Projektmitarbeiter:

Ao.Univ.Prof. Dr.phil. Erich Mursch-Radlgruber *)

Andreas Mursch-Radlgruber

Peter Baier

Josef Pennerstorfer

Universität für Bodenkultur Wien

**Department für Wald- und Bodenwissenschaften, Institut für Forstentomologie, Forstpathologie und
Forstschutz**

***) Department für Wasser-Atmosphäre-Umwelt; Institut für Meteorologie**

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	4
2	Material und Methoden	5
2.1	Untersuchungsstandorte.....	5
2.2	Markierung und Wiederfang.....	6
2.2.1	Freisetzung markierter Käfer aus eingefärbten Brutstämmen	6
2.2.2	Tagesfreilassungen markierter Buchdrucker	8
2.2.3	Fallentypen, Fallen- und Freilassungsstandorte.....	10
2.2.4	Berechnung der Wiederfangrate.....	12
2.2.4.1.	Kontrollstämme in Käfigen und Stammeklektoren	12
2.2.4.2.	Schlupfkontrolle mittels Bildanalyse	13
2.2.4.3.	Wiederfangrate bei Tagesmessungen	14
2.3	Meteorologische Parameter.....	14
2.3.1	Allgemeine Wetterdaten.....	14
2.3.2	Windmessungen.....	15
2.4	Flugmühlenexperimente	15
2.5	Modellierung der Ausbreitung des Buchdruckers (BBDS).....	17
2.5.1	Diagnostisches Strömungsmodell	17
2.5.2	Modell zur Abschätzung der Pheromonabgabe des Lockstoffdispensers.....	17
2.5.3	Lagrange'sches Puff-Ausbreitungsmodell der emittierten Pheromone	18
2.5.4	Lagrange'sches Trajektorienmodell der Käferausbreitung	18
2.6	Statistische Auswertungen und GIS.....	20
3	Ergebnisse.....	21
3.1	Gesamtfangzahlen und Wiederfang.....	21
3.1.1	Wiederfangrate	22
3.1.2	Räumliche Verteilung der Wiederfänge	26
3.1.2.1.	Wiederfang und Distanz zum Freilassungspunkt	33
3.1.3	Zeitlicher Verlauf der Wiederfänge.....	36
3.2	Windbedingungen und Wiederfang	44
3.3	Flugmühlenexperimente und Flugkapazität des Buchdruckers	53
3.4	Simulation der Ausbreitung des Buchdruckers	57
4	Diskussion	64
5	Schlußfolgerungen.....	66

6	Danksagung	67
7	Tabellenverzeichnis	68
8	Abbildungsverzeichnis	69
9	Literaturverzeichnis	72

1 Einleitung

Die Dispersion des bedeutendsten europäischen Fichtenschädlings, dem Buchdrucker (*Ips typographus*) spielt in der Entstehung und dem Verlauf von Massenvermehrungen eine entscheidende Rolle. Das Flugverhalten ist eines der wichtigsten, bisher aber auch eines der am wenigsten verstandenen Aspekte in der Populationsdynamik von Borkenkäfern. Welche Faktoren die Flugrichtung und Flugdistanz des Käfers von seinem Vermehrungsort zu einer Anlockquelle beeinflussen, sollte im Rahmen des Projekts über das Ausbreitungsverhalten des Buchdruckers untersucht werden.

In dieser Studie wurde das Schwärmverhalten der Käfer aus befallenen Stämmen, die zuvor mit fluoreszierenden Farbstoffen behandelt worden war, in Abhängigkeit von den aktuellen Witterungsbedingungen (Temperatur, Einstrahlung, Windgeschwindigkeit und Windrichtung, Niederschlag), den topographischen Gegebenheiten, der Waldausstattung sowie des Vorkommens natürlicher und unnatürlicher Lockstoffquellen (Fangbäume, Pheromonfallen) analysiert. Damit sollte letztlich die räumlich-zeitliche Dispersion des Buchdruckers aus aktuellen Befallsherden anhand von Wetterdaten besser abschätzbar werden.

Um das Ausbreitungsverhalten des Buchdruckers von einem definierten Ort aus zu untersuchen, wurden befallenen Stämmen, die mit fluoreszierenden Farbstoffen behandelt. Dabei markieren sich die Käfer beim Verlassen ihrer Brutsysteme dauerhaft mit dem ungiftigen Farbstoff selbst; somit kann ihr Schwärmflug ohne Beeinflussung störender Manipulationen stattfinden. Zudem wurden mehrfach an ausgewählten Tagen Buchdrucker direkt markiert und freigelassen um deren Ausbreitungsverhalten unter bestimmten Bedingungen untersuchen zu können. Mit Messstationen neben der Käfer-Freilassungsstelle und den Wiederfangpunkten wurden die aktuellen Witterungsdaten (Temperatur, Einstrahlung, Wind, Niederschlag) registrieren, eine Video-Kamera über den befallenen Stämmen zeichnete das Schlüpfen der Käfer auf. Mit Pheromonfallen, die in Abhängigkeit von der Topographie in unterschiedlicher Entfernung um die Freilassungsstellen aufgestellt wurden, wurde die Flugaktivität und die Ausbreitung der markierten Käfer entsprechend den herrschenden Umweltbedingungen beim Abflug von der Freilassungsstelle beobachtet. Hierfür wurden auch neuentwickelte Pheromonfallen verwendet, die so konstruiert waren, dass das Fangintervall zeitlich eingestellt und so zum Beispiel eine stündliche oder tägliche Käfer-Fangzahl registriert werden kann. Damit konnte ein direkter zeitlicher Bezug zwischen Witterungsbedingungen beim Abflug der Käfer, den örtlichen topographischen und vegetationsbedingten Gegebenheiten und der Flugaktivität der Käfer aufgrund der jeweiligen Fangorte und Fangzeiten hergestellt werden.

Mit diesen Untersuchungen sollten, unter Beachtung der aktuellen Witterungssituation, der topographischen Gegebenheiten sowie dem Vorhandensein von Quellen mit volatilen, chemischen Lockstoffen, grundlegende Erkenntnisse über das Ausbreitungsverhaltens des Buchdruckers nach dem Verlassen der Überwinterungsquartiere, nach dem Wiederaufzug der Muttertiere zur Anlage von Geschwisterbruten bzw. nach dem Ausfliegen der Jungkäfer der 1. Generation aus befallenen Brutholz gewonnen werden. Dazu wurden die Experimente an vier topographisch unterschiedlichen Standorten in Tirol, im Nationalpark Kalkalpen, im Nationalpark Gesäuse und im Wildnisgebiet Dürrenstein durchgeführt, die entsprechend ihrer Höhenlage, Exposition und Witterungsverhältnissen divergierten.

Ziel der Untersuchungen war die Grundlagen für eine vorzeitige Abschätzung und Eingrenzung von Risikobereichen für einen bevorstehenden Neubefall durch den Buchdrucker zu schaffen und damit auch die Planung und termingerechte Durchführung gezielter Maßnahmen zur Kontrolle der schwärmenden Borkenkäfer zu optimieren. Neben der Anwendung im Wirtschaftswald, v.a. von schwer zugänglichen Waldregionen, sollen die Ergebnisse zu einer deutlichen Verbesserung des Borkenkäfermanagements in Eingriffs- oder Pufferzonen von Naturwaldgebieten dienen, um hier den bestmöglichen Nachbarschaftsschutz zu gewährleisten.

2 Material und Methoden

2.1 Untersuchungsstandorte

Um unterschiedliche Varianten seitens der Geländegegebenheiten und der Windströmungen hinsichtlich des Ausbreitungsverhaltens der Käfer testen zu können, wurden die Untersuchungen an vier verschiedenen Standorten (Ebenforst (NP Kalkalpen), Brunnstube (NP Gesäuse), Hundsau (Wildnisgebiet Dürrenstein) und Rinn (Tirol)) durchgeführt (Abb. 1).



Abb. 1: Lage der Untersuchungsstandorte

Der Standort Ebenforst im Randbereich des Nationalparks Kalkalpen ist ein Plateaustandort (Ebenforstalm) mit überwiegend nördlich exponierten Hanglagen in einer Seehöhe von 900–1200 m.

Im Nationalpark Gesäuse befand sich der Untersuchungsstandort Brunnstube in einer Höhenlage von 1100–1500 m im Bereich des nach Norden hin abfallenden Hartelsgraben am Fuße des Lugauer. Der Standort ist geprägt durch unterschiedlich (Ost-West-) exponierte steile Hanglagen und Grabeneinhänge im Übergang zu den im Süden gelegenen Hochtälern (Haselkar und Hüpflingeralm).

Der Standort Hundsau im Wildnisgebiet Dürrenstein umfasst eine im Wesentlichen südlich exponierte Hanglage unterhalb des Dürrensteins auf 650–1100 m Höhe mit teils steilen Grabeneinhängen am Ende des Hundsaugrabens (Talschlusssituation).

Der Standort Rinn in Tirol ist ein südöstlich von Innsbruck gelegener waldfreier Hügel im Bereich des Inntales (Seehöhe 900–960 m).

2.2 Markierung und Wiederfang

Die Untersuchungen zur Dispersion des Buchdruckers erfolgten anhand von markierten Buchdruckern, die von einer zentralen Freilassungsstelle freigesetzt wurden und in mehr oder weniger konzentrisch um die Freilassung angeordneten Fallen wiedergefangen wurden. Die Markierung der Käfer mit einem fluoreszierenden Farbpulver (RADGLO JST (Radiant Colors N.V., Belgien) erfolgte einerseits durch Selbstmarkierung ausschlüpfender Käfer aus bebrüteten, mit dem Farbpulver eingefärbten Stämmen, die an der Freilassungsstelle zu unterschiedlichen Zeitpunkten während der Vegetationsperiode aufgelegt wurden. Andererseits wurden, bei tageweisen Freilassungen von am Institut gezüchteten Buchdruckern und im Untersuchungsjahr 2017 bei der Freisetzung von Käfern aus Pheromonfallen, die Versuchstiere direkt auf einer mit Papier ausgelegten Wanne mit dem Farbpulver in Kontakt gebracht und freigelassen. Die so markierten und mittels Pheromonfallen wiedergefangen Käfer konnten dann unter UV-Licht (Vilber Lourmat TLC Viewing Cabinet CN-6) mit einer Wellenlänge von 254 bzw. 325 nm identifiziert und ausgezählt werden.

2.2.1 Freisetzung markierter Käfer aus eingefärbten Brutstämmen

Im Untersuchungsjahr 2016 wurden bei den Standorten Ebenforst, Brunnstube und Hundsau zu unterschiedlichen Zeitpunkten Stammstücke aus zuvor gelegten Fangbäumen bzw. aus befallenen Fichten entnommen, eingefärbt und an der Freilassungsstelle aufgelegt (Tab. 1). Zum Schutz vor Abwaschung des Farbpulvers von den Stämmen wurden die Stämme überdacht (Abb. 2). Zur Kontrolle der Bohr- und Schlupfaktivität bei den eingefärbten Bruthölzern wurde direkt über den Stämmen eine Kamera installiert, die eine laufende Überwachung der Bohrtätigkeit ermöglichen sollte (hochauflösende Bilder im Minutenintervall im Zeitraum 11h00-16h59 MEZ über die gesamte Vegetationsperiode).

Aus den im Frühjahr vorgelegten Stämmen (gelb bzw. gelb / grün) schlüpfte die Parentalgeneration nach der Überwinterung. Von den in weiterer Folge rosa bzw. orange eingefärbten Stämmen schwärmten Käfer zur Anlage von Geschwisterbruten bzw. teilweise zur Anlage einer zweiten Generation aus (Hundsau und Ebenforst). Im darauffolgenden Jahr 2017 wurden die orange (Hundsau) und rosa bzw. orange (Ebenforst) gefärbten Stämme nach der Überwinterung weiter verwertet bzw. neubefallene Brutstämmen (blau) aufgelegt. Der Wiederfang markierter Käfer aus den Stämmen wurde 2017 in der Hundsau über die gesamte Vegetationsperiode, in den Untersuchungsgebieten Ebenforst und Brunnstube nur während der Tagesfreilassungen 2017 beobachtet (Tab. 1).

Tab. 1: Untersuchungszeiträume und Vorlage von eingefärbten Stämmen

Jahr	Standort	Untersuchungszeitraum		Markierung der Stämme	
		Beginn	Ende	Vorlage ab	
2016	Ebenforst	20.04.2016	27.09.2016	gelb/grün	20.04.2016
				rosa	15.06.2016
				orange	28.07.2016
	Brunnstube	09.05.2016	29.09.2016	gelb	09.05.2016
				rosa	23.06.2016
				orange	04.08.2016
	Hundsau	10.05.2016	26.09.2016	gelb	10.05.2016
				rosa	22.06.2016
				orange	03.08.2016
2017	Ebenforst	30.05.2017	14.06.2017	rosa / orange	30.05.2017
				blau	30.05.2017
	Brunnstube	22.06.2017	06.07.2017	blau	22.06.2017
	Hundsau	15.05.2017	31.08.2017	orange	15.05.2017
				blau GB	08.06.2017
blau F2				20.07.2017	



Abb. 2: Freilassungsstelle im Untersuchungsgebiet Hundsau im Wildnisgebiet Dürrenstein 2016

2.2.2 Tagesfreilassungen markierter Buchdrucker

Zusätzlich zu den Freisetzungen markierter Käfer aus eingefärbten Brutstämmen wurden im Untersuchungsjahr 2016 weitere tageweise Freilassungen von markierten Käfern für die Standorte Rinn (20.7.2016), Ebenforst (29.7.2016), Hundsau (3.8.2016) und Brunnstube (4.8.2016) durchgeführt (Tab. 2). Dabei wurden am Institut gezüchtete Buchdrucker vor Ort eingefärbt und freigelassen. Die Anzahl der markierten Buchdrucker, die von der Freilassung wegfliegen konnten, wurde in der Regel am Ende des Tages bestimmt. Von den 400 – 1200 markierten Buchdruckern flogen 62,7% bis 92,5% von der Freilassungsplattform ab (Tab. 2). Der Wiederfang der markierten Käfer wurde am Tag der Freilassung jeweils stündlich registriert.

Tab. 2: Tagesfreilassungen, Herkunft und Anzahl der markierten bzw. von der Freilassungsplattform abgeflogenen Buchdrucker 2016

Tagesfreilassung		2016					
Standort	Datum	Beginn	Ende	Herkunft	markierte Käfer	geflogene mark. Käfer	
					Anzahl	Anzahl	%
Ebenforst	29.07.2016	10:30	14:30	Dauerzucht	1200	752	62,7%
Brunnstube	04.08.2016	11:30	15:30	Dauerzucht	400	370	92,5%
Hundsau	03.08.2016	11:00	15:00	Dauerzucht	500	397	79,4%
Rinn	20.07.2016	10:40	17:45	Dauerzucht	625	461	73,8%

Im Untersuchungsjahr 2017 wurden vermehrt Freilassungen an ausgewählten Tagen in den Untersuchungsgebieten Ebenforst, Hundsau und Brunnstube durchgeführt. Dabei wurden zum Teil mehrmals an aufeinanderfolgenden Tagen Buchdrucker aus der Dauerzucht des Instituts und aus Pheromonfallen (separate Pheromonfallen mit deutlichem Abstand zur Untersuchungsfläche) teils unterschiedlich markiert und freigelassen (Tab. 3). Am Standort Ebenforst erfolgten diese Freilassungen Ende Mai bis Mitte Juni (30.5. – 1.6. bzw. 13. – 14.6.2017); am Standort Brunnstube Mitte Juni bis Anfang Juli (20. – 22.6. und 4. – 6.7. 2017). In der Hundsau erfolgten die Freilassungen Anfang Juni (8.-9.6. 2017) sowie Mitte Juli (19.-20.7.2017) und Anfang August (1.-2.8.2017). Insgesamt wurden bei diesen Freilassungen 25319 Buchdrucker markiert (10978 aus der Dauerzucht des Instituts; 14341 von Pheromonfallenfängen). Die Anzahl der markierten Käfer, die von der Freilassung erfolgreich abflogen, variierte zwischen den Freilassungsversuchen. Nur wenige markierte Käfer (<30%) flogen bei der Freilassung in der Hundsau vom 8.- -9.6. 2017 (Tab. 3). In der Regel betrug die Abflugrate jedoch deutlich mehr als 85%. Insgesamt konnten 19807 markierte Buchdrucker von der Freilassungsstelle abfliegen (78% der insgesamt markierten Käfer).

Tab. 3: Tagesfreilassungen, Herkunft und Anzahl der markierten bzw. von der Freilassungsstelle abgeflogenen Buchdrucker 2017

Tagesfreilassung		2017			markierte Käfer		geflogene mark. Käfer	
Standort	Datum	Beginn	Ende	Herkunft	Anzahl	Anzahl	%	
Ebenforst	Freilassung 31.5.-1.06.							
	1	31.05.2017	08:00		Dauerzucht	991		
	2	31.05.2017	09:10		Dauerzucht	1250		
	3	31.05.2017	14:30	18:00	Pheromonfallen	272		
					Summe	2513	2299	91,5%
	4	01.06.2017	10:55	18:00	Dauerzucht	754		
					Pheromonfallen	55		
					Summe	809	761	94,1%
	Gesamt Freilassung 31.5.-1.06.					3322	3060	92,1%
	Freilassung 13.06.-14.06.							
	1	13.06.2017	12:35		Dauerzucht	1567	1380	
	2	13.06.2017	14:50	18:00	Pheromonfallen	247	217	
					Summe	1814	1597	88,0%
	3	14.06.2017	08:40		Pheromonfallen	195	177	
4	14.06.2017	10:30		Pheromonfallen	76	69		
5	14.06.2017	12:00	17:00	Pheromonfallen	122	111		
				Summe	393	357	90,8%	
Gesamt Freilassung 13.06.-14.06.					2207	1954	88,5%	
Gesamt Ebenforst					5529	5014	90,7%	

Tagesfreilassung		2017			markierte Käfer		geflogene mark. Käfer	
Standort	Datum	Beginn	Ende	Herkunft	Anzahl	Anzahl	%	
Brunnstube	Freilassung 20.06.- 22.06							
	1	20.06.2017	13:30	18:00	Dauerzucht	1674	1343	80,2%
	2	21.06.2017	11:30		Pheromonfallen	144	118	
	3	21.06.2017	12:40		Pheromonfallen	686	560	
	4	21.06.2017	14:15	18:00	Pheromonfallen	417	340	81,6%
					Summe	2921	2361	80,8%
	5	22.06.2017	08:15	10:29	Pheromonfallen	455	163	35,8%
	6	22.06.2017	10:30		Pheromonfallen	964	797	
	7	22.06.2017	13:30	18:00	Pheromonfallen	1914	1583	82,7%
					Summe	3333	2543	76,3%
	Gesamt Freilassung 20.06.- 22.06.					6254	4904	78,4%
	Freilassung 4.07. - 6.07.							
	1	04.07.2017	16:00	16:59	Dauerzucht	758	593	78,2%
	2	05.07.2017	12:25	14:14	Pheromonfallen	973	790	
	3	05.07.2017	14:15	16:59	Pheromonfallen	820	665	81,1%
					Summe	2551	2048	80,3%
	4	06.07.2017	07:45	10:59	Pheromonfallen	262	183	69,8%
	5	06.07.2017	11:00		Pheromonfallen	410	376	
	6	06.07.2017	14:00		Pheromonfallen	1040	953	
7	06.07.2017	15:00	17:00	Pheromonfallen	485	445	91,7%	
				Summe	2197	1957	89,1%	
Gesamt Freilassung 4.07. - 6.07.					4748	4005	84,4%	
Gesamt Brunnstube					11002	8909	81,0%	

>Fortsetzung Tab. 3

Tagesfreilassung		2017			markierte Käfer		geflogene mark. Käfer		
Standort	Datum	Beginn	Ende	Herkunft	Anzahl	Anzahl	%		
Hundsau	Freilassung 8.06.-9.06.								
	1	08.06.2017	10:10	14:15	Dauerzucht	2041	665	32,6%	
	2	09.06.2017	14:20	18:00	Pheromonfallen	658	83	12,6%	
	Gesamt Freilassung 8.06-9.06.					2699	748	27,7%	
	Freilassung 19.07-20.07								
	1	19.07.2017	10:30		Dauerzucht	1055			
					Pheromonfallen	170			
	2	19.07.2017	14:30	16:00	Pheromonfallen	374			
	Summe					1599	1001	62,6%	
	3	20.07.2017	14:30	16:50	Pheromonfallen	786	782	99,5%	
	Gesamt Freilassung 19.07.-20.07.					2385	1783	74,8%	
	Freilassung 1.08-2.08.								
	1	01.08.2017	10:30	14:50	Dauerzucht	888	748	84,2%	
2	01.08.2017	15:00	19:50	Pheromonfallen	322	314	97,5%		
Summe					1210	1062	87,8%		
3	02.08.2017	13:30	17:00	Pheromonfallen	2494	2291	91,9%		
Gesamt Freilassung 1.08-2.08.					3704	3353	90,5%		
Gesamt Hundsau					8788	5884	67,0%		

2.2.3 Fallentypen, Fallen- und Freilassungsstandorte

Für das Monitoring der Schwärmaktivität des Buchdruckers und für den Wiederfang der markierten Käfer wurden zwei unterschiedliche Fallentypen verwendet. Handelsübliche Flugbarrierefallen (Theysohn-Schlitzfallen) wurden in größerem Abstand zu den Freilassungsstellen für den Fang verwendet. Diese Fallen wurden wöchentlich entleert.

Im Nahbereich zu den Freilassungsstellen wurden eigens angefertigte Fallenautomaten verwendet, die eine höhere zeitliche Auflösung der Fallenfänge erlauben (Fa. Bogner & Lehner Messtechnik GmbH). Die Fallenautomaten bestanden aus einer modifizierten Kreuzbarrierefalle (WitaPrall Ecco-Trockenfalle, Fa. Witasek) als Fangvorrichtung, montiert auf einem Unterbau mit einem zeitgesteuerten Drehteller mit 14 Auffangdosen (Abb. 3). Durch entsprechende Programmierung der Zeitsteuerung des Drehtellers konnten die Fänge tageweise bzw. stundenweise (bei Tagesfreilassungen) automatisch aufgesammelt werden. Die Auffangbehälter wurden in der Regel in 14-tägigem Abstand entleert. Bei Tagesmessungen (stündliche Fänge) wurden die Automaten jeweils vor Beginn der Freilassung bzw. am Ende des Tages abgesammelt.

Die Fallen wurden mit Pheroprax®-Ampullen (BASF) beködert. Zur raschen Abtötung der gefangenen Käfer und zur weitest gehenden Vermeidung der Kontaktkontamination nichtmarkierter Fänge mit dem Farbpulver markierter Käfer, wurden die Auffangbehältern und -wannen mit einem Insektizidnetz (Storanet®) bestückt.

Im Untersuchungsjahr 2016 wurden je Gebiet jeweils 5 automatische Fallen in näherer Umgebung zur Freilassungsstelle (Distanz < 200 m) über die gesamte Untersuchungsperiode (April/Mai - Sept) betrieben. Bei Tagesmessungen wurden weitere 5 automatische Fallen zur Verdichtung des inneren Fallennetzes aufgestellt (Tab. 4). Ergänzend dazu wurden 7 – 10 Theysohn-Schlitzfallen im Abstand von 230-1638 m von den Freilassungsstellen installiert. Die Auswahl der Fallenstandorte erfolgte einerseits anhand der Entfernungen und Richtung zum zentralen Freilassungspunkt und andererseits anhand der Gelände- und Bestandesgegebenheiten.

Bei der Tagesfreilassung in Rinn wurden 5 Fallenautomaten rund um die Freilassungsstelle an der Basis des waldfreien Rinner Bichl installiert.

Im Versuchsjahr 2017 wurden im Gebiet Hundsau 9 Fallenautomaten und 4 Schlitzfallen installiert. Die Freilassungsstelle wurde gegenüber 2016 an eine zentralere Stelle im Bereich der Hundsau verlegt. In den Untersuchungsgebieten Ebenforst und Brunnstube wurden bei den Tagesmessungen 2017 jeweils 10 Fallenautomaten und 4 bzw. 8 Theysohnfallen installiert (Tab. 4).

Übersichtskarten für die Fallen und Freilassungsstandorte für die jeweiligen Untersuchungsgebiete und –jahre sind im Anhang dargestellt (Annex Abb. 1 – Abb. 7).



Abb. 3: Fallenautomat (links) und zeitgesteuerter Drehteller mit 14 Auffangbehältern (rechts, Ansicht von unten)

Tab. 4: Seehöhe der jeweiligen Freilassungsstelle und Distanzen der Fallenstandorte zur Freilassung

Untersuchungsjahr /Standort	Freilassungs- stelle Seehöhe (m)	Fallen (n)	Entfernung zur Freilassungsstelle (m)			Seehöhe (m)			
			Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert	
2016									
NP Kalkalpen /Ebenforst		1029							
	automatische Fallen	5	104,7	174,9	141,4	1010,0	1065,0	1032,8	
	Flugbarrierefallen	8	230,7	431,5	356,8	960,0	1121,0	1048,8	
	zusätzl. automatische Fallen (Tagesmessung)	5	97,1	579,6	338,5	965,0	1095,0	1033,8	
NP Gesäuse/ Brunnstube		1307							
	automatische Fallen	5	84,8	186,3	144,6	1258,2	1324,4	1297,7	
	Flugbarrierefallen	10	347,4	1638,6	970,2	1106,9	1582,8	1394,5	
	zusätzl. automatische Fallen (Tagesmessung)	5	222,7	628,8	419,4	1271,7	1462,2	1385,2	
Wildnisgebiet Dürrenstein/ Hundsau		948							
	automatische Fallen	5	70,8	186,4	124,5	897,6	972,9	934,0	
	Flugbarrierefallen	7	309,9	1578,3	795,0	668,7	1028,9	894,2	
	zusätzl. automatische Fallen (Tagesmessung)	5	168,3	370,7	236,2	828,9	969,0	909,0	
Tirol / Rinn									
	automatische Fallen (Tagesmessung)	962	5	226,0	447,0	333,6	894,2	919,2	911,2
2017									
NP Kalkalpen /Ebenforst		1029							
	automatische Fallen	10	79,3	579,6	273,5	969,0	1121,0	1043,4	
	Flugbarrierefallen	4	249,0	375,7	315,0	960,0	1090,0	1052,5	
NP Gesäuse/ Brunnstube		1307							
	automatische Fallen	10	84,8	466,1	299,7	1249,0	1458,5	1340,0	
	Flugbarrierefallen	8	480,9	1485,8	985,1	1085,0	1514,8	1371,6	
Wildnisgebiet Dürrenstein/ Hundsau		892							
	automatische Fallen	9	177,6	303,8	233,0	828,9	1003,8	930,2	
	Flugbarrierefallen	4	376,4	1707,1	986,0	668,7	1028,9	837,2	

2.2.4 Berechnung der Wiederfangrate

Zur Berechnung der Wiederfangrate (WFR = Anzahl wiedergefangener markierter Käfer/ Anzahl freigelassener Käfer) wurde versucht die Anzahl der aus den eingefärbten Stämmen ausschlüpfenden und schwärmenden Buchdrucker anhand unterschiedlicher Methoden abzuschätzen.

2.2.4.1. Kontrollstämme in Käfigen und Stammeklektoren

Im Untersuchungsjahr 2016 wurden für die Freilassungen in Hundsau und Ebenforst zur Abschätzung der Schlüpfaktivität aus den Stämmen eingefärbte Kontrollstämme (L: ~60 cm) entnommen und in Gaze-Käfige gegeben. Die Anzahl der ausgeschlüpfen Käfer wurde am Ende der Vegetationsperiode bestimmt. 2017 wurden zur Bestimmung der Schlüpfaktivität aus den markierten Stämmen hängende Stammeklektoren aus Plexiglas verwendet (Ebenforst und Brunnstube), die eine leichtere und laufende Kontrolle des Ausschlüpfens der Käfer ermöglichte. Im Untersuchungsgebiet Hundsau wurde ein Stammeklektor mit einem Fallenautomaten kombiniert, sodass eine tägliche Kontrolle des Ausschlüpfens aus dem Kontrollstamm möglich war (Abb. 4).

Die Anzahl der ausgeschlüpften Buchdrucker aus den eingefärbten Stämmen wurde dann anhand der Anzahl geschlüpfter Käfer/Rindenmantelfläche des Kontrollstammes und der Gesamtrindenmantelfläche der aufgelegten Stämme hochgerechnet.



Abb. 4: Kontrollstämme in Käfigen (links) und Stammeklektor mit Fallenautomat (rechts) zur Ermittlung der ausschlüpfenden Buchdrucker aus eingefärbten Stämmen

2.2.4.2. Schlupfkontrolle mittels Bildanalyse

Alle Freilassungsstellen wurden mit einer Kamera direkt über den ausgelegten Stämmen ausgestattet, die eine laufende Überwachung der Bohrtätigkeit ermöglichen sollte (hochauflösende Bilder im Minutenintervall im Zeitraum 11h00-16h59 MEZ über die gesamte Untersuchungsperiode). Im Rahmen des Zusatz-Projekts wurde ein Tool zur weitestgehend automatisierten Analyse dieser Bilder entwickelt (Bark Beetle Image Analyzer Anwendung) (Mursch-Radlgruber, 2017). Das Ziel der Anwendung war die automatische Zählung von aus den eingefärbten Stämmen ausschlüpfenden Borkenkäfern in einer chronologischen Serie von Bildern. Weiters ermöglichte die Anwendung eine einigermaßen intuitive Möglichkeit, die Ergebnisdaten zu modifizieren und diese aggregiert als ein Histogramm über die Bilderserie zu betrachten, um schnell hohe Aktivitäten von Borkenkäfern oder Irregularitäten in den Daten entdecken zu können (Abb. 5).

Für die im Frühjahr 2016 ausgelegten, gelb eingefärbten Stämme am Standort Hundsau wurde eine vollständige Analyse der Bilder für den Zeitraum 10.5. bis 21.6.2016 (Anzahl der Bilder: 15175) durchgeführt. Dabei zeigte sich, neben der extrem zeitintensiven manuellen Nachkontrolle und Korrektur der automatisch generierten Bildanalysedaten, dass viele ausgeschlüpfte Käfer eine gewisse Zeit am Stamm verblieben und somit Doppel- und Mehrfachzählungen häufig waren. Bereits stark mit dem Farbpulver eingefärbte Käfer konnten nicht detektiert werden. Trotz hoher Bildauflösung waren viele Signale nicht eindeutig zuordenbar. Häufig traten Störsignale durch Lichtwechsel, Bohrmehlauswurf und andere Insekten auf. Somit lieferten die nachbearbeiteten, fehlerkorrigierten Bildanalysedaten zwar eine Information zur Aktivität bei den Stämmen aber keine exakte Abschätzung der Anzahl schlüpfender und abfliegender Käfer.

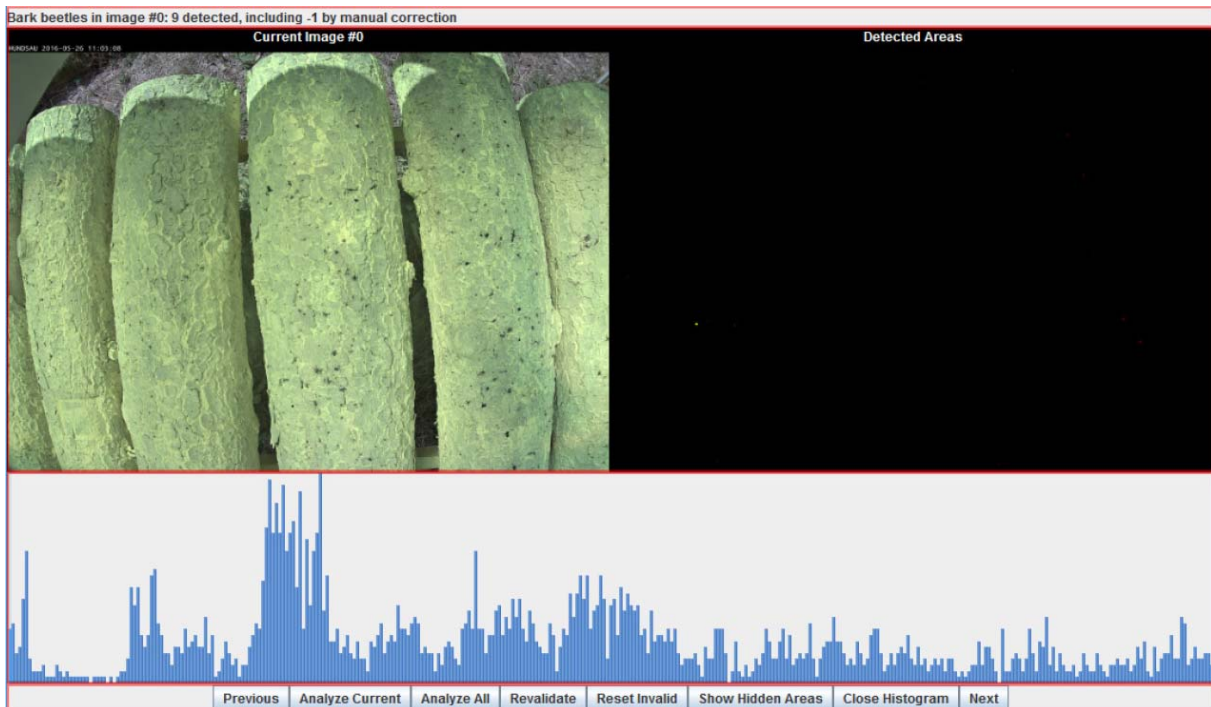


Abb. 5: Benutzeroberfläche des Bildanalysetools zur automatischen Zählung schlüpfender Buchdrucker aus markierten Stämmen (Quellbild links, bearbeitbares Analysebild rechts und Histogramm unterhalb der Bilder, welches die momentanen Aktivitäten als Balken für jedes Bild in chronologischer Anordnung anzeigt)

2.2.4.3. Wiederfangrate bei Tagesmessungen

Bei den Tagesfreilassungen wurde die Wiederfangrate anhand der Anzahl der abgeflogenen Käfer ermittelt, die wiederum aus der Differenz der zu Beginn eingefärbten Versuchstiere und der am Ende des Tages bzw. nach Ende des Freilassungsexperiments bei der Freilassungsplattform verbliebenen Versuchstiere (flugunwillige und tote Käfer) bestimmt wurde ($WFR = \text{Anzahl wiedergefangene Käfer} / (\text{Anzahl markierte Käfer} - \text{Anzahl verbliebene Käfer})$).

2.3 Meteorologische Parameter

2.3.1 Allgemeine Wetterdaten

Die Messung der Lufttemperatur, Globalstrahlung, Niederschlagsmenge und Luftfeuchte erfolgte für die Untersuchungsgebiete Ebenforst, Brunnstube und Hundsau bei den in den jeweiligen Untersuchungsgebieten bereits für das Borkenkäfermonitoring bestehenden Klimamessstationen (Ebenforstalm, Brunnstube bzw. Brennleiten, vgl. PHENIPS online: <http://iff-server.boku.ac.at/wordpress/index.php/language/de/startseite/>). Zudem erfolgten bei ausgewählten Fallenautomaten (entlang eines Höhengradienten) weitere Messungen der Lufttemperaturen.

Die stündlichen Messungen von Globalstrahlung und Lufttemperatur wurden für die Abschätzung der Temperatursummen für die Entwicklung der Bruten des Buchdruckers mit dem Modell PHENIPS (Baier *et al.*, 2007) verwendet, um damit die mögliche Generationsabfolge für den jeweiligen Standort bzw. Brutbaum und die Generationszugehörigkeit der Fallenfänge abzuschätzen (relative

Temperatursumme= 0,5: Beginn von Geschwisterbruten; rel. Temperatursumme = 1,0: Beginn des Schwärmflugs zur Anlage einer Tochtergeneration).

2.3.2 Windmessungen

Zur Messung der Windbedingungen (horizontale Windrichtung, Windgeschwindigkeit und Böengeschwindigkeit) an der Freilassungsstelle und bei jeder Automatikfalle wurden Ultraschallanemometer DS-2 SONIC (DECAGON Devices, Inc.) eingesetzt. Das Messintervall betrug 10 Minuten während des gesamten Untersuchungszeitraums bzw. 1 Minute während der Tagesmessungen.

2.4 Flugmühlenexperimente

Zur Überprüfung der potentiellen Flugkapazität des Buchdruckers (Fluggeschwindigkeit, Flugdauer und -distanz) wurde in Anlehnung an Forsse und Solbreck (1985) eine Flugmühle konstruiert. Diese besteht aus einem drehbar montierten Rotationsarm (Glaskapillare (D: 0,25 mm; L: 14,4 cm \pm 4,4 cm)) an einer rechtwinkelig gebogenen Mikronadel. Die Mikronadel (D: 0,21 mm) wurde in einer weiteren, senkrecht fixierten Glaskapillare (D: 0,5 mm; L: 3 cm) weitestgehend friktionsfrei gelagert (Abb. 6).

Die Versuchstiere (frisch geschlüpfte Käfer aus der Labordauerzucht) wurden vor den Experimenten in Plastikbehältern bei Raumtemperatur (22°C) und Tageslichtbedingungen gelagert und während der Versuchsdurchführung und in den Nachtstunden einzeln in Eppendorf Safe-Lock Tubes (mit Luftlöchern im Deckel) aufbewahrt. Für die Flugversuche wurden die einzelnen Käfer am Pronotum mittels Klebstoff an den Rotationsarm geklebt (Abb. 7). Die Flugexperimente erfolgten bei Raumtemperatur (22°C), ca. 50% Luftfeuchte und Tageslichtbedingungen. Beginn und Ende jeder Flugaktivität wurden protokolliert. Die Anzahl der Rotationen und Dauer wurde ab Beginn jeder Flugaktivität manuell mittels Stückzähler und Stoppuhr bestimmt und daraus Fluggeschwindigkeit und Flugstrecke berechnet. Bei länger andauernder Flugaktivität folgten in unregelmäßigen Abständen weitere Messungen der Rotationen/Zeit für jeweils mindestens 100 Rotationen. Die Versuchstiere wurden solange beobachtet bis keine weitere Flugaktivität am Folgetag mehr registriert wurde. Danach erfolgte die Geschlechtsbestimmung der Versuchstiere (Schlyter und Cederholm, 1981).



Abb. 6: Seitenansicht der Flugmühle



Abb. 7: Buchdrucker während des Flugs im Flugmühlenexperiment mit am Halsschild fixiertem Rotationsarm der Flugmühle

2.5 Modellierung der Ausbreitung des Buchdruckers (BBDS)

Das Modell BBDS (Bark Beetle Dispersion Simulation) wurde zur Visualisierung und Interpretation der Daten zum Ausbreitungsverhalten markierter Buchdrucker im Rahmen des Zusatzprojekts entwickelt.

Die Datengrundlage für die Entwicklung des Modells waren die Ergebnisse der Flugmühlenexperimente, die Fallenfänge markierter Buchdrucker und die gleichzeitig an den Fallenstandorten und dem Freilassungspunkt durchgeführten Windmessungen.

Das Simulationsmodell besteht aus verschiedenen Sub-Modellen:

- Diagnostisches Strömungsmodell,
- Modell zur temperatur- und füllstandsabhängigen Pheromonabgabe des Lockstoffdispensers,
- Lagrange'sches Puff-Ausbreitungsmodell der Pheromonquellen
- Lagrange'sches Trajektorienmodell der Ausbreitung des Buchdruckers

Nachfolgend werden die grundsätzlich verwendeten physikalischen und methodischen Ansätze für die einzelnen Submodelle erläutert.

2.5.1 Diagnostisches Strömungsmodell

Die Untersuchungen fanden unter sehr komplexen topographischen Randbedingungen (Standorte: National Park Kalkalpen, National Park Gesäuse und Wildnisgebiet Dürrenstein) statt. Ebenso waren die standörtlichen Randbedingungen sowie die Verteilung der Wald- und Freiflächen sehr heterogen.

Es wurde daher als erste wesentliche Näherung angenommen, dass sich die standörtlichen Charakteristika in den zahlreichen Windmessdaten abbilden.

Zur Verallgemeinerung der punktuellen Strömungsdaten auf ein dreidimensionales Strömungsfeld wurde ein diagnostischer Ansatz gewählt (Sasaki, 1958; Röckle, 1990). Dabei wird als physikalische Bedingung nur die Massenkonsistenz zugrunde gelegt. Es erfolgt daher eine Diagnose durch dreidimensionale Reduktion der Divergenz. Dafür ist als erster wesentlicher Schritt die Wahl einer repräsentativen Messstelle zur Initialisierung des gesamten Feldes notwendig.

Dieses Feld wird im nächsten Schritt durch die anderen Messstellen und die vorhandenen Waldstrukturen modifiziert. Der Grad der Modifikation (z.B. Abschwächung durch Baumbestand, Einflussbereich der Messstellen) kann in der ersten Version des Modelles frei gewählt werden.

Für die vertikale Windverteilung kann ein vertikales Windprofil für neutrale Schichtungsbedingungen (gut durchmischte bodennahe Luftschicht) gewählt werden.

2.5.2 Modell zur Abschätzung der Pheromonabgabe des Lockstoffdispensers

Basierend auf verfügbaren Angaben zur Pheromonabgabe des verwendeten Pheromondispensers Pheroprax® unter Freiland- und Laborbedingungen (Jakuš und Šimko, 2000; Staatsbetrieb Sachsenforst, 2005) und eigenen Beobachtungen zur füllstandsabhängigen Attraktion von Buchdrucker im Untersuchungsgebiet Hundsau 2017 wurde ein Modell zur temperatur- und füllstandsabhängigen Pheromonabgabe von Pheroprax-Ampullen entwickelt. Damit kann für jeden Fallenstandort die stündliche Abgabe in Abhängigkeit von der Lufttemperatur (Stundenmittelwert) und der Alterung des Dispensers abgeschätzt werden. Dieses Modell liefert aber zur Zeit nur eine

grobe Kenngröße der momentanen Pheromonabgabe, da wesentliche Grundlagen für die Berechnung der dispenserspezifischen Emission des Pheromons unter Freilandbedingungen fehlen (z.B. Zusammenhang zwischen einstrahlungsbedingt erhöhter Falltemperatur und Abgaberate) bzw. noch in Bearbeitung sind (Staatsbetrieb Sachsenforst, 2005).

2.5.3 Lagrange'sches Puff-Ausbreitungsmodell der emittierten Pheromone

Zur Beschreibung der Ausbreitung der Pheromone von den Fallenstandorten wurde ein Gaussscher Puff-Ansatz gewählt (Zannetti, 1990; Blackadar, 1997). Dieser Ansatz wurde für die Modellierung von Insektenpheromonen innerhalb von Waldbeständen mit Tracer verglichen (Strand et al., 2009).

Die für die Beschreibung der Verdünnung notwendigen Schwankungen der Windgeschwindigkeiten sind frei wählbar, und können entsprechend der meteorologischen Bedingungen für die Simulation festgelegt werden. Ebenso sind die Zeitschritte zur Berechnung der Pheromonwolke frei wählbar.

Das Meandern der Pheromonwolke wird dabei wesentlich durch die verfügbaren Strömungsdaten und deren zeitliche Auflösung (1 Minute oder 10 Minuten Mittelwerte) bestimmt.

Man erhält die momentane Konzentrationsverteilung multipler Pheromonquellen in Abhängigkeit von der berechneten aktuellen (oder frei wählbaren) Pheromonabgabe und damit die Möglichkeit den Käfern Wahrnehmungsschwellwerte zuzuordnen und die Reaktion darauf in der Folge zu untersuchen.

2.5.4 Lagrange'sches Trajektorienmodell der Käferausbreitung

Der Flug virtuell freigesetzter Käfer wird als aktives Lagange'sches Partikel im Strömungsfeld simuliert. Die durch meteorologische Einflüsse bedingte zufällige Verteilung wird ähnlich der Pheromonverdünnung als „Random Walk“ (Monte Carlo Model) beschrieben (Blackadar, 1997). Den virtuellen Käfern werden jedoch eine Anzahl unterschiedlicher Reaktionsmöglichkeiten bereitgestellt (Bau und Cardé, 2015), welche in der Simulation zur Visualisierung interaktiv frei ausgewählt werden können.

Die Steuerung des gesamten Simulationsablaufes erfolgt über eine externe Datei, welche alle wesentlich Parameter zusammenfasst und so eine Kontrolle des Simulationsablaufes gewährleistet.

Folgende Reaktionsmöglichkeiten und Verhaltensweisen können wahlweise konfiguriert und auch teilweise miteinander kombiniert werden:

- keine Aktion: Käfer verhalten sich passiv,
- Flug gegen den Wind: Käfer orientieren sich gegen den Wind, wenn ein definierter Schwellenwert der Pheromonkonzentration überschritten wird,
- getriggerte Reaktionen für Startphase, Verhalten oberhalb und unterhalb des Pheromonschwellenwerts; kombinierbare Reaktionen: keine Aktion, Flug gegen den Wind, Flug mit dem Wind, Flug mit oder gegen den Pheromongradienten,
- komplexe, randomisierte Verhaltens- und Reaktionsmöglichkeiten zum Auffinden einer Pheromonplume, zum Verhalten innerhalb der Plume und zur Reakquirierung bei Kontaktverlust, parametrisiert nach Bau und Cardé (2015) (Tab. 5):
 - Intermittent Correlated Random Walk (ICRW)
 - Correlated Random Walk (CRW)
 - Lévy Walk (LW)
 - Crosswind biased Correlated Random Walk (CBCRW)
 - Downwind biased Correlated Random Walk (DBCRW),

- kombinierte, frei parametrisierte Verhaltens- und Reaktionsstrategien:
Suchflug gegen den Pheromongradienten: am Beginn Flug mit dem Wind; danach Orientierung entgegen dem Pheromongradienten bei Kontakt und zeitgesteuerte Wechsel der Orientierung für Suchflüge nach Kontaktverlust,

Suchflug gegen den Wind: zunächst Flug gegen den Wind; dann Orientierung gegen den Wind bei Kontakt mit der Pheromonwolke und zeitgesteuerte Wechsel der Orientierung der Suchflüge nach Kontaktverlust,

Suchflug gegen den Wind mit Wechsel zu Flug quer zum Wind (Crosswind biased Correlated Random Walk) nach Kontaktverlust mit der Pheromonwolke.

Die unterschiedlichen Verhaltens- und Reaktionsmodule wurden für die unterschiedlichen Untersuchungsgebiete und für ausgewählte Zeiträume (ab Beginn von Freilassungen bzw. zu Terminen mit hohen Anflugzahlen markierter Buchdrucker) getestet. Für die Simulationen können die Anzahl der virtuell freigesetzten Käfer, die Zeitspanne der Freisetzung und die Flugaktivitätsdauer gewählt werden. Die Eigengeschwindigkeit der virtuellen Käfer kann individuell parametrisiert werden oder einen bestimmten Wertebereich umfassen und orientierte sich an den Ergebnissen der Flugmühlenexperimente.

Die Parametrisierung der Pheromonabgabe und der Lebensdauer des Pheromons (Zeitspanne, wie lange ein Pheromonpuff die Simulation beeinflusst) kann frei gewählt werden bzw. folgt den berechneten Werten anhand der jeweiligen Temperatur und des Dispenserfüllstandes. Der Schwellenwert zur Wahrnehmung des Pheromons orientiert sich an eigenen Beobachtungen des Anflugs an Fallen mit nahezu entleerten Pheromondispensern (Hundsau 2017). Für den Zeitpunkt, ab dem keine Anflüge an Pheromonfallen mehr registriert wurden, erfolgte eine entsprechende Abschätzung der Pheromonabgabe bzw. der möglichen Puffkonzentration (Pheromonabgaberate $<0,06$ mg/h; unterer Schwellenwert der Pheromonkonzentration: $4,25 \cdot 10^{-4}$ $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

Die Simulationen wurden für einen Zeitraum von jeweils einer Stunde durchgeführt mit einer zeitlichen Auflösung der Pheromondiffusion von 10 Sekunden und der Ausbreitung der Käfer von einer Sekunde. Die räumliche Auflösung betrug $5 \cdot 5 \cdot 2$ m für ein Testgebiet von $1400 \cdot 1400$ m. Die visualisierten Trajektorien der Käferausbreitung wurden mit den registrierten Fängen der markierten Buchdrucker verglichen.

Tab. 5: Charakteristiken der unterschiedlichen Suchstrategien zum Auffinden einer Pheromonwolke nach Bau und Cardé (2003)

Strategie	Initiale	Explorationsphase		Reorientierungsphase	Ortswechsel Dauer	Orientierung bei Pheromonkontakt
	Orientierung	Richtungswechsel	Frequenz	Richtungswechsel		
ICRW	zufällig	$5^\circ \pm 1^\circ$	$20 \text{ s} \pm 5 \text{ s}$	neue zufällige Orientierung	-	gegen den Wind
CRW	zufällig	$5^\circ \pm 1^\circ$	$20 \text{ s} \pm 5 \text{ s}$	-	-	gegen den Wind
Lévy Walk	zufällig	neue zufällige Orientierung		neue zufällige Orientierung	$200 \text{ s} \pm 20 \text{ s}$	gegen den Wind
DBCRCW	gegen den Wind (180°)	$5^\circ \pm 1^\circ$	$20 \text{ s} \pm 5 \text{ s}$	-	-	gegen den Wind
CBCRCW	quer zum Wind ($+90^\circ$ v -90°)	$5^\circ \pm 1^\circ$	$20 \text{ s} \pm 5 \text{ s}$	-	-	gegen den Wind

2.6 Statistische Auswertungen und GIS

Statistische Auswertungen (Mittelwertsvergleiche, Varianzanalysen sowie Korrelations- und Regressionsanalysen) wurden mit dem Programm SPSS 19.0 bzw. Microsoft Excel durchgeführt.

Die Auswertung zirkulärer Daten (Windrichtung und Ausbreitungsrichtung) sowie die Erstellung von Windrosendiagrammen wurden mit dem Programm Oriana 4.0 (Kovach Computing Services, Anglesey, Wales) durchgeführt. Gemittelte Wind- und Ausbreitungsrichtungen wurden mittels Rayleigh-Test auf Signifikanz geprüft. Watson's U^2 Test wurde zur Überprüfung von signifikanten Unterschieden von Gruppenmittelwerten der Windrichtung verwendet.

Die Erstellung von Karten für die Fallenfänge und Ausbreitung markierter Buchdrücker erfolgte mit dem Programm ArcGIS Online von Esri (www.arcgis.com). Aktuelle Waldlayer für die Modellierung der Windverhältnisse (Abgrenzung der Freiflächen und Jungbestandsflächen von älteren, dichter bestockten Waldflächen) wurden anhand von aktuellen Orthophotos, Landnutzungsdaten bzw. aufbereiteten ALS-Daten mit ArcGis erstellt.

3 Ergebnisse

3.1 Gesamtfangzahlen und Wiederfang

Die Gesamtsummen der gefangenen nichtmarkierten und wiedergefangenen markierten Buchdrucker sind in Tab. 6 dargestellt. Die Gesamtfangzahlen für Ebenforst und Gesäuse 2017 sowie Rinn 2016 beziehen sich nur auf den Zeitraum der Tagesfreilassungskampagnen. Alle übrigen Angaben für 2016 und Hundsau 2017 beziehen sich auf die gesamte Periode April/Mai – Ende Aug./Sept. (Tab. 1).

In der Vegetationsperiode 2016 wurden bei den Standorten Ebenforst, Hundsau und Gesäuse sowie Hundsau 2017 ähnlich hohe Fangzahlen unmarkierter Buchdrucker registriert (Tab. 6). Die Anzahl wiedergefangener markierter Käfer aus Brutstämmen zeigte jedoch eine starke Abhängigkeit vom Standort. Die höchsten Gesamtfangzahlen markierter Buchdrucker ergaben sich für den Standort Hundsau, die niedrigsten für den hochgelegenen Standort Brunnstube im Nationalpark Gesäuse. Neben der Lage der Untersuchungsgebiete (seehöhenbedingte Abnahme der thermal günstigen Bedingungen für die Entwicklung der Buchdrucker in den eingefärbten Fichtenstämmen und der thermisch möglichen Schwärmtage) dürften dabei auch die sehr unterschiedliche Qualität und Besiedelung der verwendeten Brutstämmen eine wesentliche Rolle gespielt haben.

Von den Stämmen, die im Frühjahr vorgelegt wurden und aus denen die überwinterten Parentalkäfer ausschwärmten, konnten (mit Ausnahme Ebenforst 2016) die höchsten Wiederfänge markierter Käfer registriert werden. Durch den witterungsbedingt späten Beginn der Untersuchungen im Jahr 2017 konnte nur im Untersuchungsgebiet Hundsau eine hohe Anzahl schwärmender Käfer aus den Überwinterungsstämmen (orange markierte Stämme) wieder gefangen werden. In Ebenforst wurden von Ende Mai bis Mitte Juni nur noch wenige Käfer aus den Überwinterungsstämmen (rosa und orange) in den Fallen registriert; am Standort Brunnstube waren zu Beginn der Untersuchungen (Mitte Juni) aus den Überwinterungsstämmen 2017 bereits alle Parentalkäfer geschlüpft.

Von den im Laufe des Sommers vorgelegten Stämmen (2016: rosa markierte Stämme; 2017: blau markiert) konnten von den ausschlüpfenden Käfern zur Anlage von Geschwisterbruten bzw. von einer zweiten Generation nur an den thermisch günstigeren Standorten Hundsau und Ebenforst hohe Wiederfänge beobachtet werden (Hundsau: 484 Buchdrucker; Ebenforst: 527 Buchdrucker). Beim Standort Brunnstube waren die Wiederfänge von schwärmenden Käfern zur Anlage von Geschwisterbruten aus rosa markierten Stämmen vergleichsweise sehr gering (21 Buchdrucker). Die Fangzahlen von Käfern aus Brutstämmen die Ende Juli –Anfang August 2016 ausgelegt wurden (orange Markierung) waren bei allen Standorten sehr niedrig, insbesondere in Hundsau und Brunnstube (7 bzw. 2 orange markierte Buchdrucker).

Die Gesamtfänge von markierten Käfern bei den Tagesfreilassungen 2016 waren in der Hundsau (n=57) am höchsten, gefolgt von Ebenforst (n=34). Sehr niedrig waren die Wiederfänge bei der Tagesfreilassung am hochgelegenen Standort Brunnstube (nur 6 Buchdrucker). In Rinn wurden während der Tagesfreilassung nur 4 gelb markierte Käfer in einer Falle wiedergefangen.

Durch die hohe Anzahl freigelassener Buchdrucker und mehrfach durchgeführter Freisetzung (vgl. Tab. 3) war die Anzahl wiedergefangener Käfer bei Tagesfreilassungen im Jahr 2017 bei allen Standorten um ein Vielfaches höher als 2016 (Tab. 6).

Tab. 6: Gesamtsummen der gefangenen nichtmarkierten und wiedergefangenen markierten Buchdrucker aus eingefärbten Stämmen und Tagesfreilassungen für die unterschiedlichen Untersuchungsgebiete getrennt nach Untersuchungsjahr

Jahr	Standort	Anzahl gefangener Buchdrucker		markierte Buchdrucker				
		Gesamt	unmarkiert	markiert	von eingefärbten Stämmen		Tagesfreilassungen	
2016					gelb /grün	rosa	orange	gelb
	Hundsau	280968	279161	1807	1260	484	7	57
	Ebenforst	211996	211259	737	107	527	69	34
	Brunnstube	227060	226850	210	181	21	2	6
	Rinn	819	815	4				4
2017		Gesamt	unmarkiert	markiert	orange	rosa	blau	gelb/orange
	Hundsau	240291	239047	1244	417		228	599
	Ebenforst	45183	44571	612	20	33	75	484
	Brunnstube	73443	72963	480			27	453

3.1.1 Wiederfangrate

Die anhand der Anzahl der freigesetzten, markierten Käfer relativierten Wiederfangzahlen zeigten sowohl für die aus den unterschiedlichen Brutstammvorlagen schlüpfenden, selbstmarkierten Käfer als auch für die Tagesfreilassungsversuche eine erhebliche Streuung der Fangraten (Tab. 7).

Geringe Wiederfangraten (< 3%) wurden für die ausschüpfenden Käfer der 2. Generation (Hundsau 2017) sowie für schwärmende Buchdrucker ermittelt, die zur Anlage von Geschwisterbruten und einer 2. Generation in Hundsau 2016 ausflogen (rosa markierte Stämme). Extrem gering war die WFR für Buchdrucker, die zur Anlage einer 2. Geschwisterbrut ausschwärmten (orange Stämme ab Ende Juli, Hundsau 2016). Deutlich höhere Wiederfangraten wurden für die schwärmende Parentalgeneration (Hundsau 2016: 7,9%; Hundsau 2017: 5,0%) errechnet. Die höchsten Wiederfangraten ergaben sich für Käfer, die zur Anlage der ersten Geschwisterbrut (GB1) aus den Stämmen in Ebenforst (22,7%) und Hundsau (18,7%) 2017 ausschwärmten (Tab. 7). In Brunnstube 2017 war die WFR für den erneuten Flug der Parentalkäfer deutlich geringer (4,6%).

Tab. 7: Wiederfangraten (WFR) für geschlüpfte Buchdrucker aus unterschiedlich markierten Stämmen, getrennt nach Jahr, Standort und Fangbaumvorlage bzw. Generation

N: Anzahl der aufgelegten Stämme bzw. der Kontrollstämme in Käfigen /Stammeklektoren
D: mittlere Durchmesser ; L: mittlere Länge der Stämme; RMF: Summe der Rindenmantelflächen der Stämme
n: beobachtete Anzahl der geschlüpfen Käfer aus Kontrollstämmen/Eklektoren
IT: Anzahl geschlüpfter Buchdrucker/dm² Rindenfläche; IT pot: berechnete Summe der geschlüpfen Käfer aus den aufgelegten Stämmen (IT*RMF)
WF: Anzahl der wiedergefangenen, markierten Käfer im jeweiligen Beobachtungszeitraum
WFR: Wiederfangrate (WF/ITpot)
Generationen: P: überwinternde Parentalgeneration; F1- F2: erste bzw. zweite Generation; GB1 -GB2: erste bzw. zweite Geschwisterbrut

Jahr	Standort	Fangbaum Gen. Befallsbeginn	Zeitraum	Farbe	Anzahl geschl. Käfer							Generation ausschlüpfende Käfer		
					D N (cm)	L (cm)	RMF (dm ²)	n	IT (n/dm ²)	ITpot (n)	WF (n)		WFR (%)	
2016														
Hundsau	P	a)	10.05.-22.06.2016	gelb	6	30,8	117,7	683,9			16000 *)	1260	7,9%	F1
	F1	ab 10.5.2016	22.06.-26.09.2016	rosa	5	21,5	150,0	505,6			13907	484	3,5%	GB1 und F2
		<i>Kontrollstämme</i>	<i>22.06.-26.09.2016</i>		2	19,0	60,5	72,2	1988	27,5				
	GB1	ab 22.6.2016	03.08.-26.09.2016	orange	4	22,1	152,3	423,3			978	7	0,7%	GB2
		<i>Kontrollstamm</i>	<i>03.08.-26.09.2016</i>		1	16,5	63,5	32,9	76	2,3				
Ebenforst	F1	ab 20.04.2016	15.06.-14.07.2016	rosa	5	24,3	149,4	571,5			2936	220	7,5%	GB1
		<i>Kontrollstämme</i>	<i>31.5.-14.7.2016</i>		2	25,0	60,0	94,2	397	5,1				
2017														
Hundsau	P	b)	15.05.-08.06.2017	orange	7	24,8	143,6	783,6			8264	417	5,0%	F1
		<i>Eklektor</i>	<i>15.05.-08.06.2017</i>		1	23,0	50,0	36,1	381	10,5				
	F1	ab 15.5.2017	08.06.-20.07.2017	blau	5	20,8	140,8	462,4			1102	206	18,7%	GB1
			21.07.-31.08.2017							755	22	2,9%	F2	
			08.06.-31.08.2017							1857	228	12,3%	GB1 und F2	
		<i>Eklektor</i>	<i>08.06.-20.07.2017</i>		1	19,5	50,0	30,6	73	2,4				
			<i>21.07.-31.08.2017</i>						50	1,6				
		<i>Eklektor Gesamt</i>	<i>08.06.-31.08.2017</i>						123	4,0				
Brunnstube	F1	Ende Mai 2017	22.06.-18.07.2017	blau	5	21,5	106,3	377,3			581	27	4,6%	GB1
		<i>Eklektor</i>	<i>22.06.-18.07.2017</i>		1	16,0	71,0	35,7	55	1,5				
Ebenforst	F1	Mai 2017	30.05.-14.06.2017	blau	5	20,5	103,1	334,9			330	75	22,7%	GB1
		<i>Eklektor</i>	<i>30.05.-14.06.2017</i>		1	19,5	79,0	48,4	43	0,9				

- a) Überwinterungsstämme aus 2015 /Stehendbefall
b) orange Überwinterungsstämme aus 2016 (neu eingefärbt am 15.5.2017)
*) Schätzung anhand der Bildanalysedaten

Bei den Tagesfreilassungen waren im Untersuchungsjahr 2016 die Wiederfangraten der gelbmarkierten Buchdrucker im Gebiet Hundsau am höchsten (14,4%). Im Gebiet Ebenforst war die Wiederfangrate geringer (4,5%), im Gesäuse wurden nur 6 gelbmarkierte Käfer am Tag der Freilassung wiedergefangen (1.6% der freigelassenen Käfer). In Rinn wurden nur 4 von 461 markierten Versuchstieren in den Fallen registriert (0,9%) (Tab. 8).

Tab. 8: Wiederfang (WF) und Wiederfangraten (WFR) für die Tagesfreilassungen 2016 getrennt nach Standort und Gesamt (inklusive der Wiederfänge in den Folgetagen nach der Freisetzung)

Tagesfreilassungen 2016		geflogene markierte am Tag der Freilassung			Gesamt	
Standort	Datum	Buchdrucker	WF	WFR	WF	WFR
		Anzahl	Anzahl	%	Anzahl	%
Ebenforst	29.07.2016	752	16	2,13%	34	4,52%
Brunnstube	04.08.2016	370	6	1,62%	6	1,62%
Hundsau	03.08.2016	397	44	11,08%	57	14,36%
Rinn	20.07.2016	461	4	0,87%		

Auch die berechneten Wiederfangraten für die wiederholt durchgeführten Freilassungsversuche 2017 zeigten eine hohe Schwankungsbreite zwischen den Standorten und den jeweiligen Zeitpunkten der Freilassungen. Von insgesamt 19807 markierten Buchdruckern, die von der Freilassungstelle abflogen, wurden 7,8% wiedergefangen (Tab. 9). Die niedrigsten Wiederfangraten ergaben sich für den Standort Brunnstube (Gesamtwiederfangrate: 5,1%), wobei bei der Freilassung am 4.7.2017 (sehr später Beginn der Freisetzung (16h00); Temperaturmaximum: 19°C) keine markierten Käfer am Tag der Freilassung wiedergefangen wurden. Auch am 20.6.2017 betrug die Wiederfangrate nur 0,9%. Hingegen wurden am 6.7.2017 am Standort Brunnstube mehr als 10% der freigelassenen Käfer wiedergefangen.

Auch für den Standort Ebenforst zeigten sich sehr unterschiedliche Wiederfangraten an aufeinander folgenden Tagen. Am 30.5. 2017 betrug die Fangquote insgesamt 13,0 %, am 1.6. 2017 nur 4,0%. In den darauffolgenden Tagen bis zur nächsten Freilassung (2.6 bis 12.6.) konnten noch weitere 60 markierte Buchdrucker wiedergefangen werden. Am 13.6.2017 wurden von 1597 freigesetzten Buchdruckern nur 9 Individuen (1,2%) gefangen, wobei die meisten dieser freigelassenen Käfer erst am folgenden Tag geschwärmt sein dürften (WFR am 14.6.2017: 18,8%).

Bei den Freilassungen am 8.6.und 9.6.2017 im Gebiet Hundsau konnten nur vergleichsweise wenige Buchdrucker wiedergefangen werden (WFR= 4,6%). Bei den folgenden Tagesfreilassungen Mitte Juli und Anfang August in der Hundsau wurden insgesamt deutlich mehr als 10% der freigesetzten Käfer wiedergefangen. Am höchsten waren die Wiederfangraten für die am 20.7.2017 (WFR= 16,0%) und am 1.8.2017 (WFR=22,6%) freigelassenen markierten Buchdrucker aus Pheromonfallenfängen. Insgesamt wurde in Hundsau wie im Jahr davor die höchste Wiederfangrate (10,2%) im Vergleich zu Ebenforst (9,7%) und Brunnstube (5,1%) registriert.

Tab. 9: Wiederfangraten (WFR) für die Tagesfreilassungen 2017 getrennt nach Standort, Tag der Freilassung, Markierungsfarbe für den Tag der Freisetzung und Gesamt (inklusive der registrierten Wiederfänge in den Folgetagen)

Tagesfreilassungen 2017			geflogene markierte	am Tag der Freilassung		Gesamt	
Standort	Datum	Markierung	Buchdrucker Anzahl	WF Anzahl	WFR %	WF Anzahl	WFR %
Ebenforst	31.05.	gelb	2299	308	13,40%		
	01.06.	gelb	761	30	3,94%		
Gesamt Freilassung 31.05.-01.06.			3060	338	11,05%	398	13,01%
	13.06.	gelb	1597	19	1,19%		
	14.06.	gelb	357	67	18,77%		
Gesamt Freilassung 13.06.-14.06.			1954	86	4,40%	86	4,40%
Gesamt Ebenforst			5014	424	8,46%	484	9,65%
Brunnstube	20.06.	gelb	1343	37	2,76%		
	21.06.	gelb	2361	21	0,89%		
	22.06.	gelb	2543	97	3,81%		
Gesamt Freilassung 20.06.- 22.06.			4904	155	3,16%	160	3,26%
	04.07.	gelb	593	0	0,00%		
	05.07.	gelb	2048	82	4,00%	83	4,05%
	06.07.	orange	1957	210	10,73%	210	10,73%
Gesamt Freilassung 4.07. - 6.07.			4005	292	7,29%	293	7,32%
Gesamt Brunnstube			8909	447	5,02%	453	5,08%
Hundsau	08.06.	gelb	665	31	4,66%		
	09.06.	gelb	83	3	3,61%		
Gesamt Freilassung 8.06-9.06.			748	34	4,55%	36	4,81%
	19.07.	orange	1001	46	4,60%	50	5,00%
	20.07.	gelb	782	125	15,98%	134	17,14%
Gesamt Freilassung 19.07.-20.07.			1783	171	9,59%	184	10,32%
	01.08.	gelb	748	30	4,01%	33	4,41%
	01.08.	orange	314	71	22,61%		
Summe 01.08.			1062	101	9,51%		
	02.08.	orange	2291	247	10,78%	346	15,10%
Gesamt Freilassung 1.08-2.08.			3353	348	10,38%	379	11,30%
Gesamt Hundsau			5884	553	9,40%	599	10,18%
Gesamtsumme			19807	1424	7,19%	1536	7,75%

3.1.2 Räumliche Verteilung der Wiederfänge

Die räumliche Verteilung der Fallenfänge nichtmarkierter Buchdrucker war in allen Untersuchungsgebieten sehr heterogen und im Wesentlichen von der jeweils gegebenen lokalen Populationsdichte (bestehende Befallsaktivität bzw. Befall im Vorjahr) und den spezifischen kleinklimatischen Bedingungen des jeweiligen Fallenstandortes abhängig (Abb. 8 bis Abb. 15).

In den Untersuchungsgebieten Hundsau und Ebenforst waren die Fangzahlen nichtmarkierter Käfer im Jahr 2016 höher in Bereichen mit Vorjahresbefall (Falle 2 in der Hundsau, Abb. 8). bzw. in Bereichen mit aktivem Befallsgeschehen (Stehendbefall und Fangbaumvorlagen im Bereich der Falle 1 nordöstlich des Freilassungspunkts in Ebenforst, Abb. 10). Im Jahr 2017 traten in Hundsau (neben den hohen Fangergebnissen der Falle „Adlerblick“ im Nordwesten) höhere Fänge im südlichen Teil der Hundsau auf (Abb. 9). Im Bereich Ebenforst traten 2017 vergleichsweise höhere Fänge nichtmarkierter Buchdrucker südwestlich der Freilassungsstelle auf (Abb. 11).

Im Untersuchungsgebiet Brunnstube waren 2016 die Fallen in unmittelbarer Umgebung zur Freilassung wenig attraktiv. Die Fallen in mittlerer Hanglage wiesen dagegen erheblich höhere Fangzahlen auf als die Fallen im Bereich des Grabeneinhangs (Abb. 12). Im Frühjahr 2017 zeigten sich im Untersuchungsgebiet Brunnstube (insbesondere in den Hanglagen südlich der Freilassung im Übergang zum Haselkar und im Bereich der Hüpflingeralm) mehrere Stehendbefallsherde. Während des Zeitraums Mitte Juni – Juli 2017 temporär dort gelagertes, befallenes Holz dürfte dazu beigetragen haben, dass im Jahr 2017 bei den Fallenstandorten im Grabenbereich vermehrt nichtmarkierte Käfer abgefangen wurden (Abb. 13).

Der Fang von markierten Käfern konzentrierte sich bei allen Standorten im Wesentlichen auf die Fallen in unmittelbarer Nähe zur Freilassung. Hohe Fangzahlen von markierten Käfern traten im Gebiet Hundsau insbesondere in den hangaufwärts gelegenen Fallen oberhalb der Freilassungsstelle auf (Abb. 8; Abb. 9). Höhere Fänge von freigelassenen, gelb markierten Käfern traten während der Tagesmessung 2016 in der Hundsau auch westlich (windberuhigte Fallenstandorten in Fichtenaltbeständen und in Waldrandnähe) bzw. östlich der Freilassungsstelle auf (Abb. 14). Wiederfänge während der Tagesfreilassungen 2017 wurden hauptsächlich in den Fallen hangaufwärts registriert (Abb. 9). Im Vergleich mit den Wiederfängen 2016, konnten 2017 auch in einer Falle südwestlich der Freilassung 2017 höhere Fänge markierter Buchdrucker beobachtet werden.

Im Untersuchungsgebiet Ebenforst trat 2016 eine saisonal unterschiedliche räumliche Verteilung der Fallenfänge markierter Käfer auf. Dies traf insbesondere bezüglich der rosa (ausschlüpfende Käfer ab Juni) und orange (ausschlüpfende Käfer ab Ende Juli) markierten Buchdrucker zu (Abb. 10). Auch 2017 zeigte sich eine räumlich unterschiedliche Verteilung der schwärmenden Parentalgeneration (rosa und orange markierte Stämme) und der zur Anlage von Geschwisterbruten schwärmenden Käfer (blau markiert) (Abb. 11). Während der Tagesfreilassungen 2016 und 2017 wiedergefangene Buchdrucker traten vorrangig in der westlich zur Freilassungsstelle nächstgelegenen Falle auf (Abb. 14 und Abb. 11).

Im Gesäuse 2016 waren die Fänge von markierten Käfern in der nächstgelegenen Falle (im Hangbereich nordöstlich von der Freilassungsstelle) und in einer südlich des Freilassungspunkts im Übergang zum Haselkar gelegenen Theysohn-Falle am höchsten. Während der Tagesfreilassung 2016 konnten nur wenige Versuchstiere wiedergefangen werden (5 markierte Käfer im Nahbereich zur Freilassungsstelle, ein markierter Käfer in der am weitesten entfernten Falle im Bereich des Hartelgrabens (Distanz: 1638 m) (Abb. 15). Im Untersuchungsyear 2017 wurden die markierten Buchdrucker überwiegend in den beiden Fallen nordöstlich und südwestlich in unmittelbarer Nähe zur Freilassung registriert (Abb. 13). Einzelne markierte Tiere wurden aber auch in den mehr als 1100

m entfernten Fallen im Hartelgraben (nördlich zum Freilassungspunkt), im Haselkar und in der Hüpflingeralm (südlich/südwestlich von der Freilassung) abgefangen.

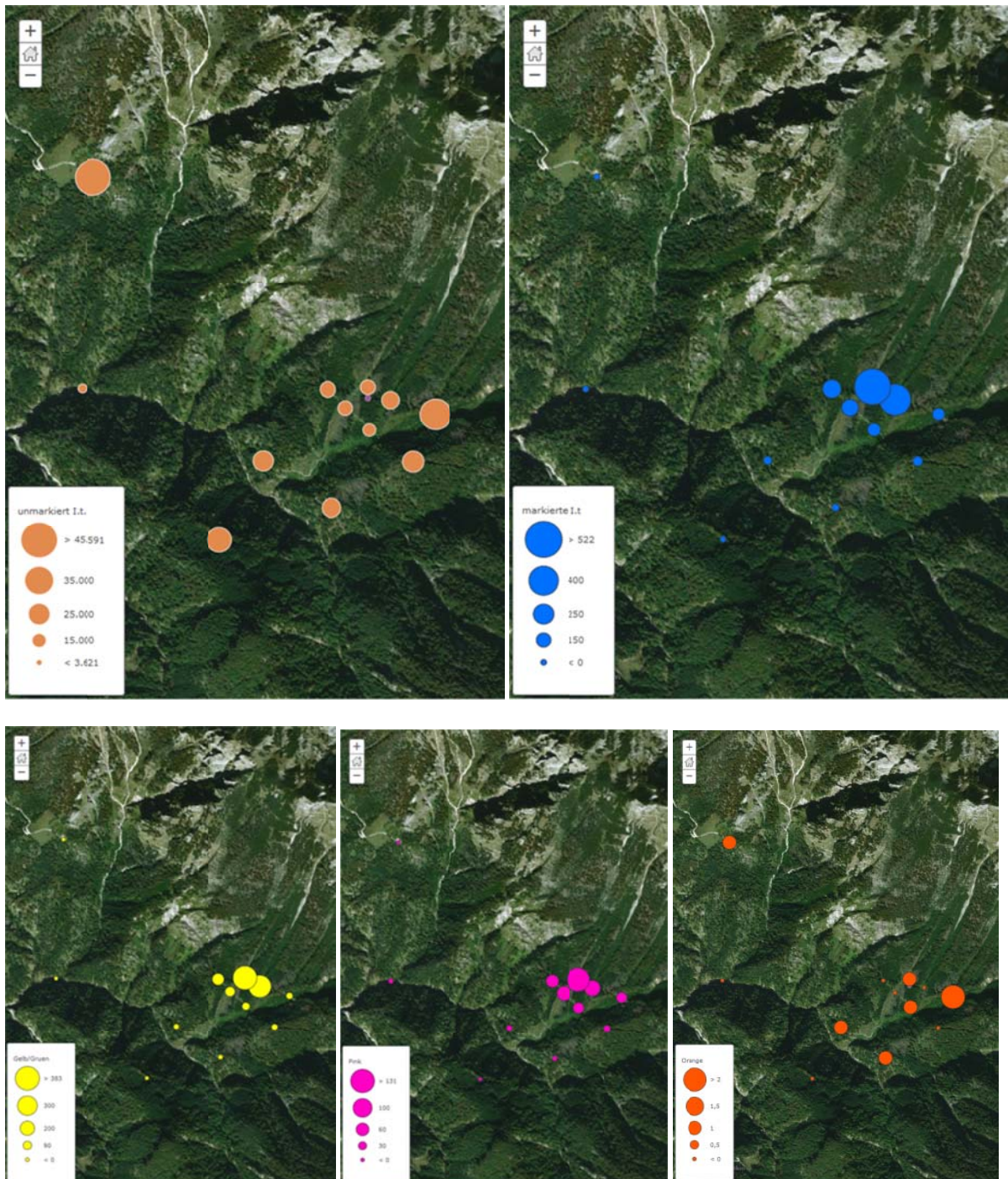


Abb. 8: Anzahl und räumliche Verteilung gefangener unmarkierter und markierter Buchdrucker im Untersuchungsgebiet Hundsaue (Wildnisgebiet Dürrenstein) 2016

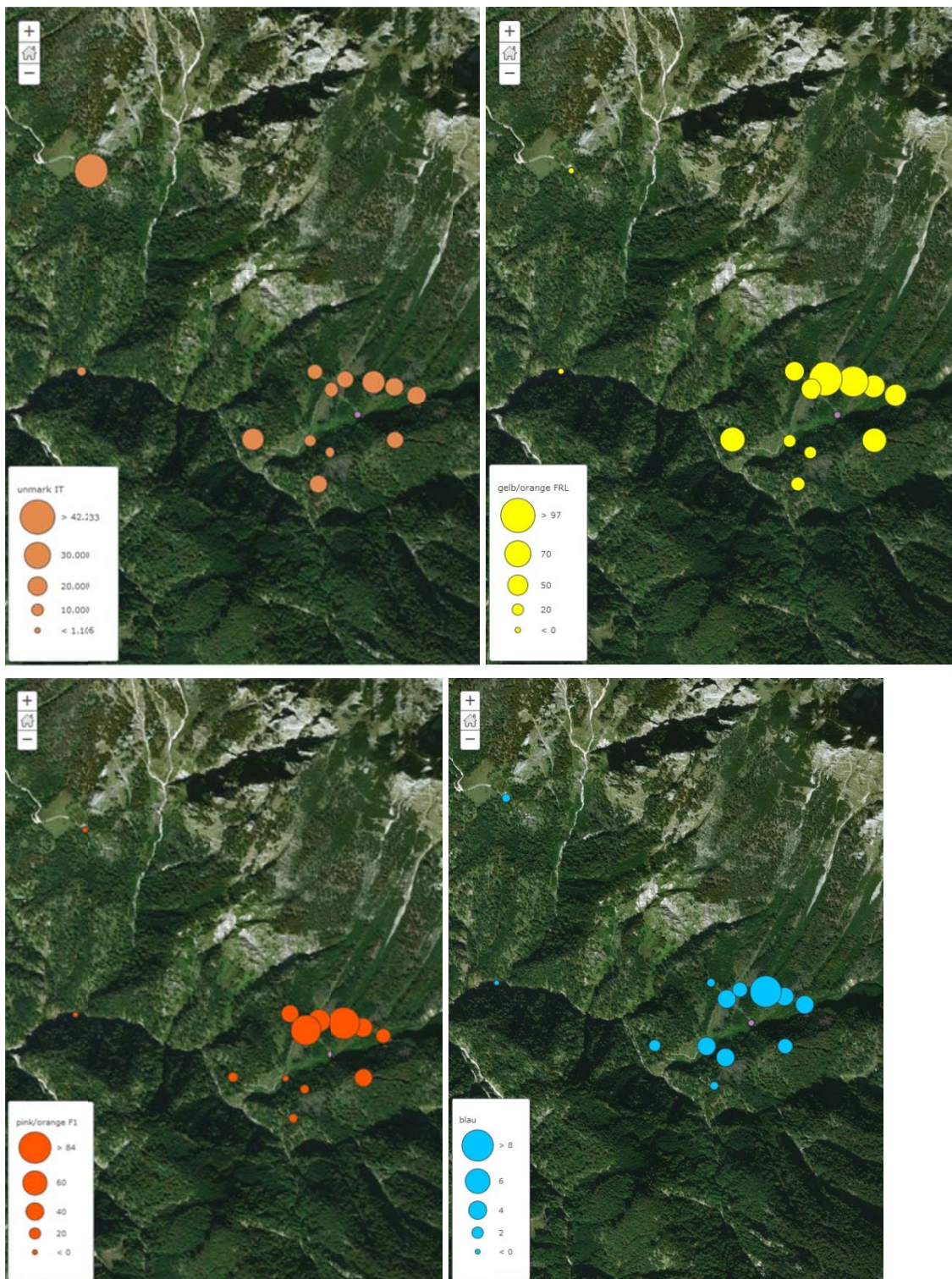


Abb. 9: Anzahl und räumliche Verteilung gefangener unmarkierter und markierter Buchdrucker im Untersuchungsgebiet Hundsaue (Wildnisgebiet Dürrenstein) 2017

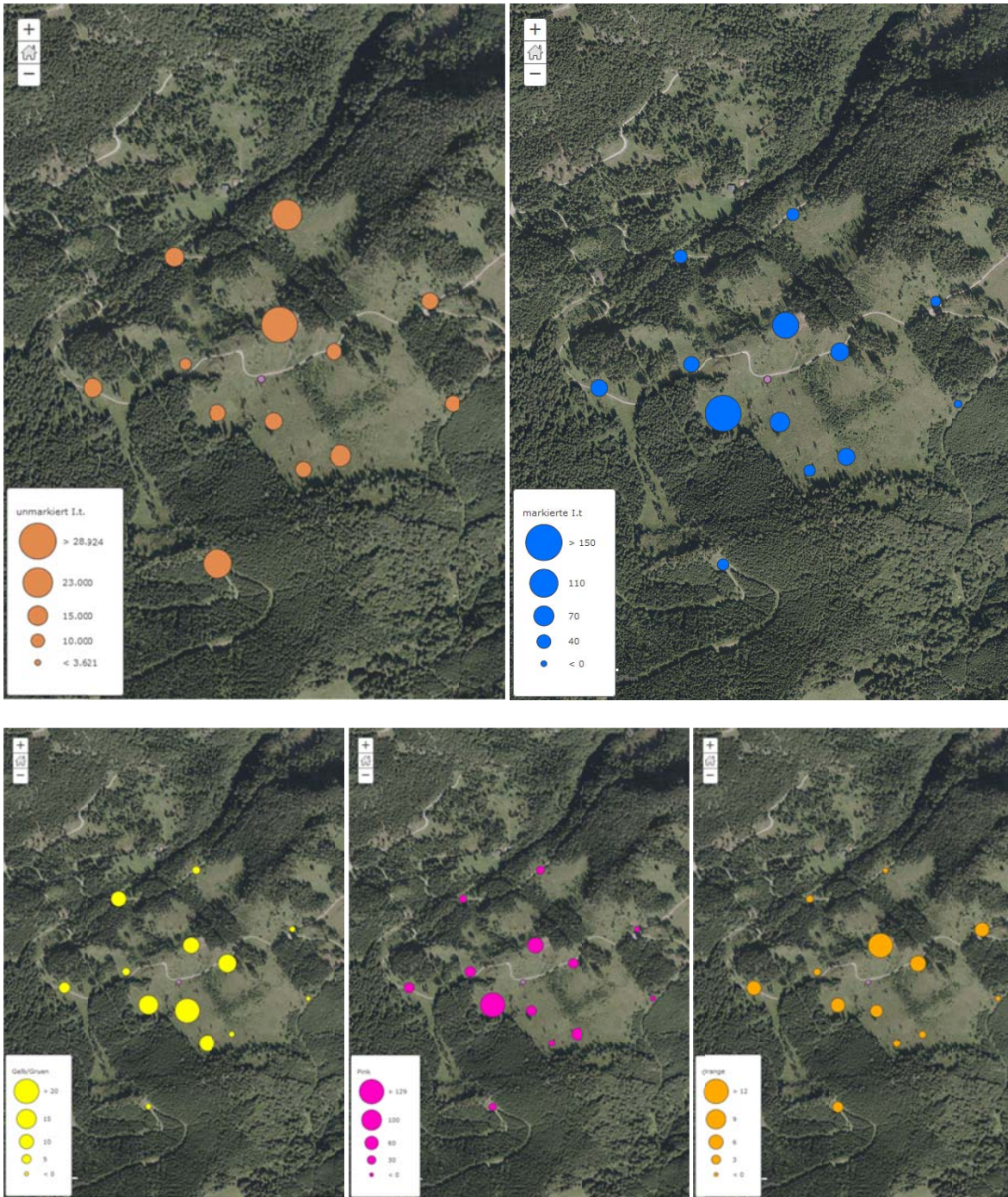


Abb. 10: Anzahl und räumliche Verteilung gefangener unmarkierter und markierter Buchdrucker im Untersuchungsgebiet Ebenforst (NP Kalkalpen) 2016

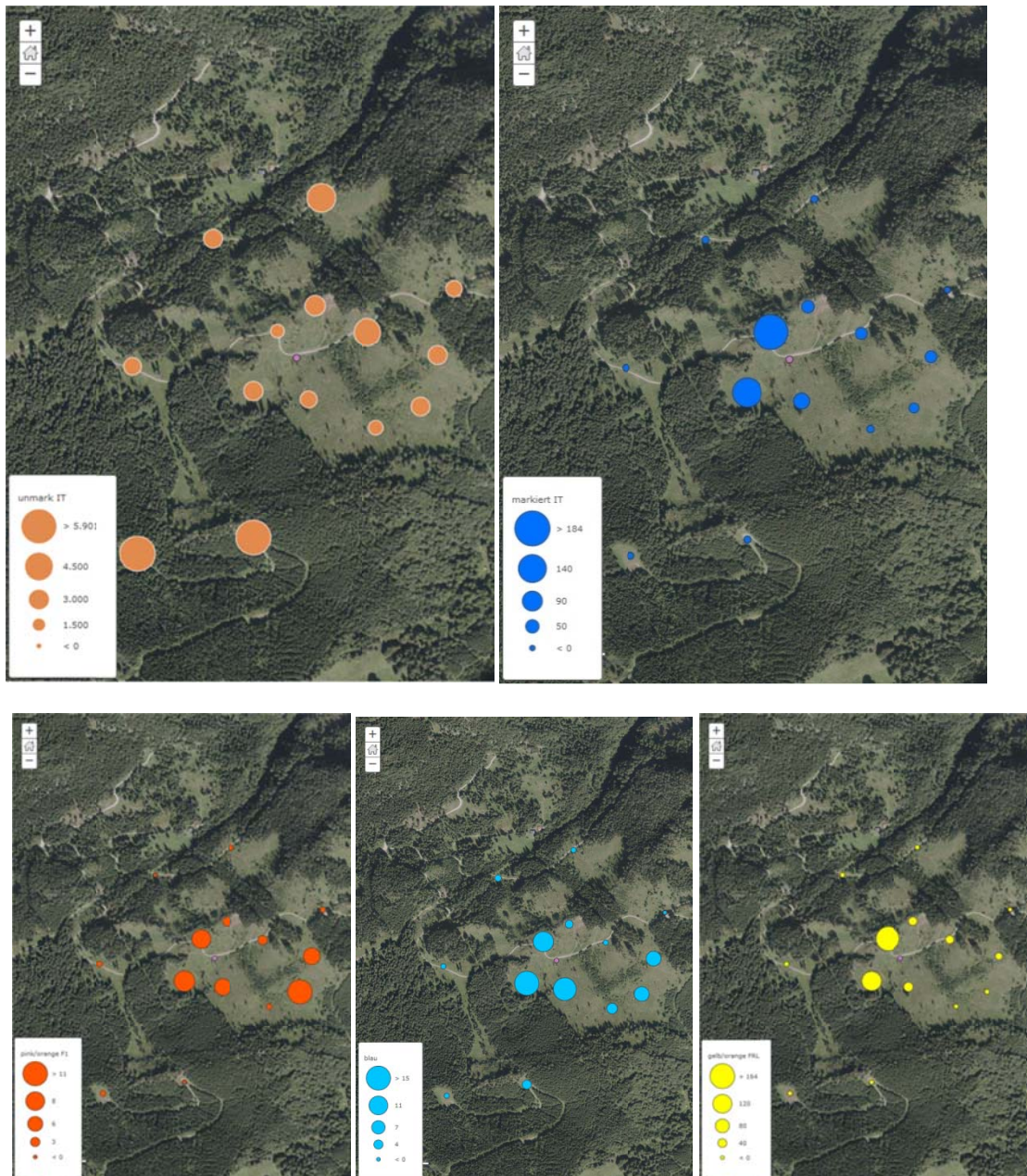


Abb. 11: Anzahl und räumliche Verteilung gefangener unmarkierter und markierter Buchdrucker im Untersuchungsgebiet Ebenforst (NP Kalkalpen) 2017

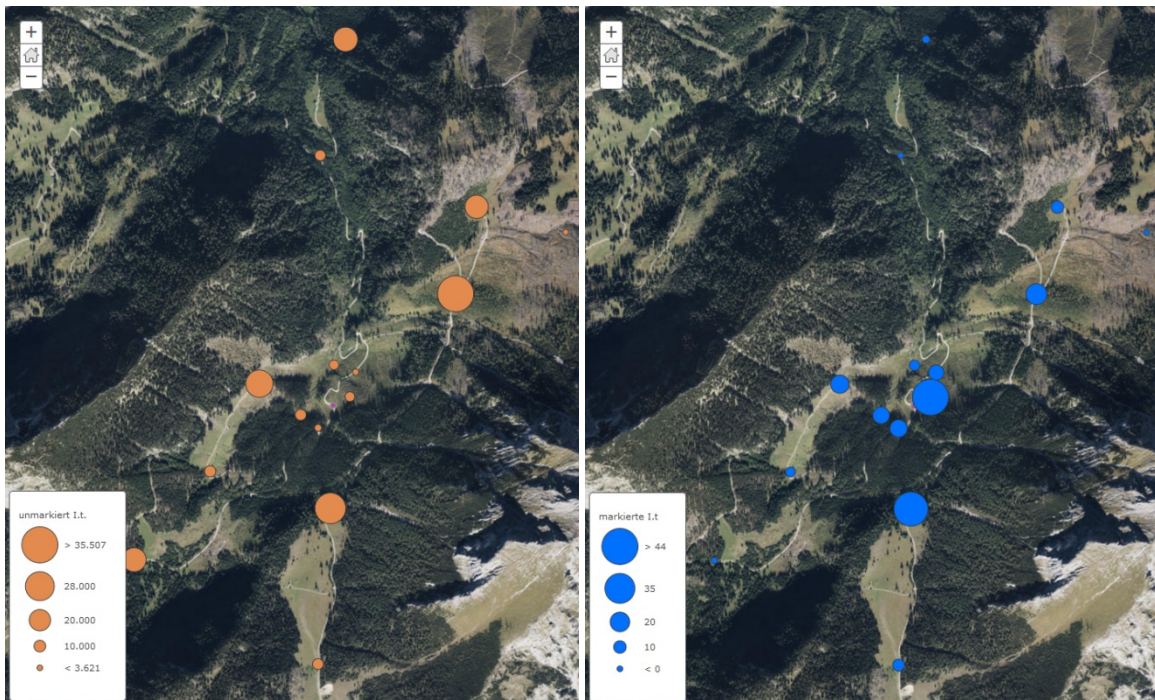


Abb. 12: Anzahl und räumliche Verteilung gefangener unmarkierter und markierter Buchdrucker im Untersuchungsgebiet Brunnstube (NP Gesäuse) 2016

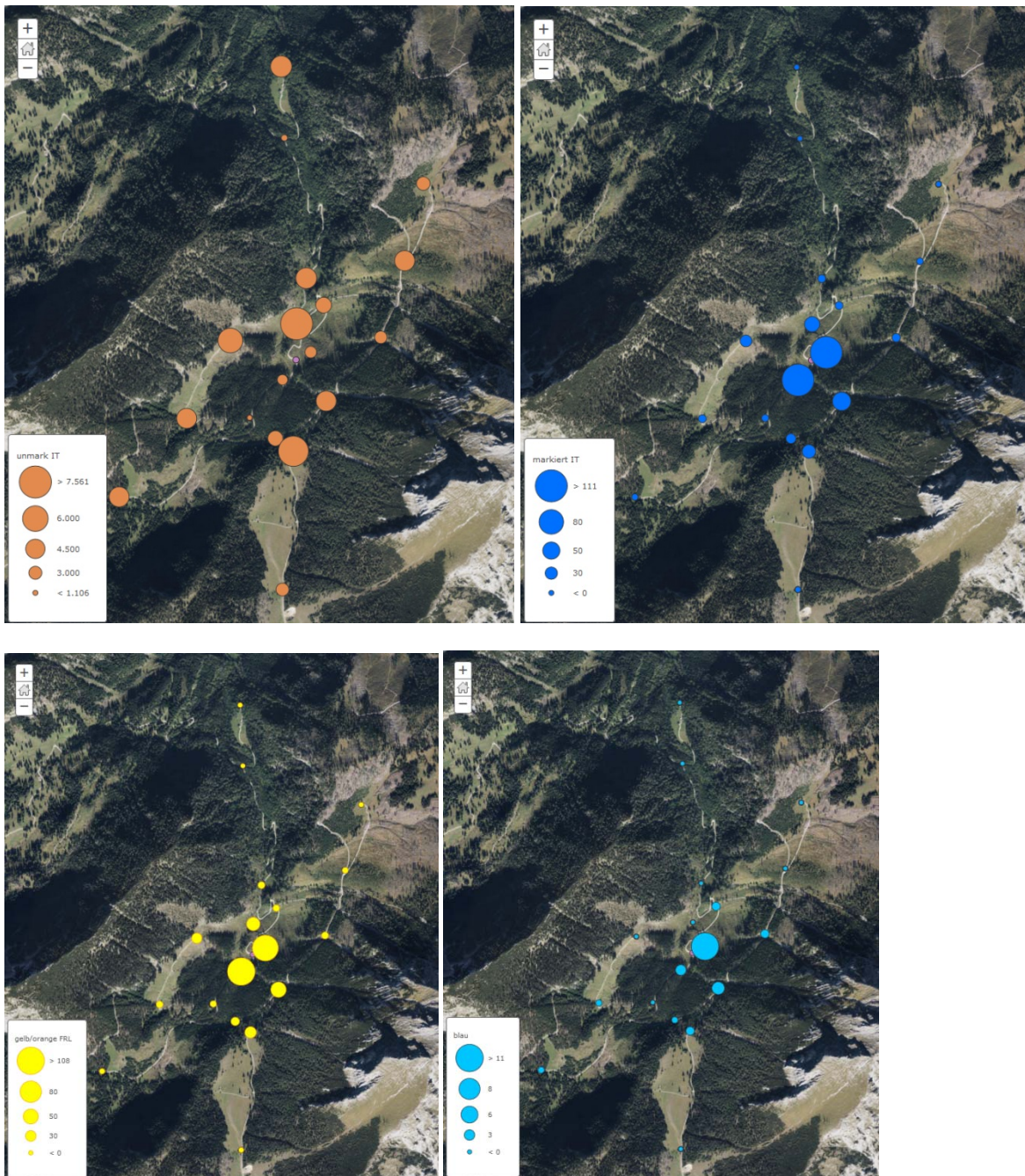


Abb. 13: Anzahl und räumliche Verteilung gefangener unmarkierter und markierter Buchdrucker im Untersuchungsgebiet Brunnstube (NP Gesäuse) 2017

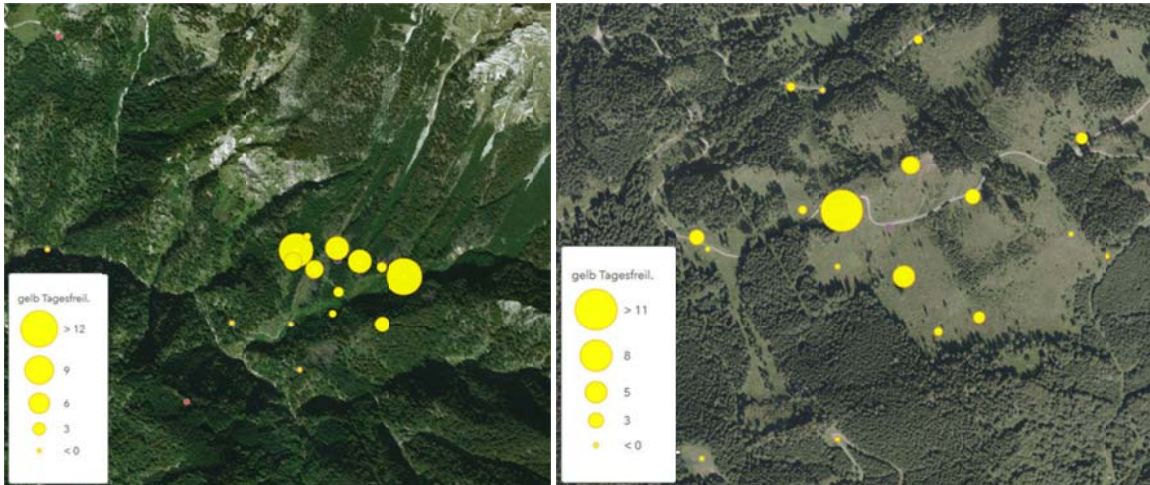


Abb. 14: Anzahl und räumliche Verteilung gefangener gelb markierter Buchdrucker für die Tagesfreilassungen 2016 in den Untersuchungsgebieten Hundsau am 3.8.2016 und Ebenforst (Tagesfreilassung am 29.7.2016)

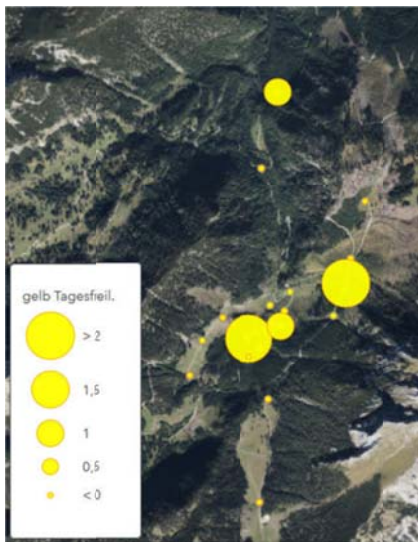


Abb. 15: Anzahl und räumliche Verteilung gefangener gelb markierter Buchdrucker im Untersuchungsgebiet Brunnstube (NP Gesäuse) für die Tagesfreilassung (4.8.2016)

3.1.2.1. Wiederfang und Distanz zum Freilassungspunkt

Die Gesamtanzahl der Fänge von markierten Käfern nahm exponentiell mit der Entfernung der Falle von der Freilassungsstelle ab (Abb. 16 und Abb. 17). Ab Entfernungen von >500 - 600 m wurden nur noch sporadisch markierte Käfer gefangen. Die logarithmierten Werte der Wiederfangzahlen und der Distanz zeigten in beiden Jahren hoch signifikant negative Zusammenhänge, wobei sich die Untersuchungsgebiete darin unterschieden. Im Jahr 2016 nahm der Wiederfang in den Untersuchungsgebieten Ebenforst und Brunnstube mit zunehmender Entfernung weniger stark ab als in der Hundsau. Das Niveau der Gesamtwiederfänge war in der Hundsau in beiden Jahren bei vergleichbaren Distanzen deutlich höher als in Ebenforst bzw. in Brunnstube.

Die mit der Anzahl der freigesetzten markierten Käfer relativierten Wiederfangzahlen (=Wiederfangrate; WFR) zeigte mit der Entfernung zur Freilassungsstelle generell negative Zusammenhänge. Je nach Art der freigesetzten Käfer, Standort und Jahr ergaben sich mehr oder weniger straffe Beziehungen (Abb. 18).

Die WFR bei den Tagesfreilassungen 2016 waren mit der Entfernung nur in Hundsau und Ebenforst signifikant negativ korreliert (Abb. 18). In Brunnstube 2016 war der Zusammenhang zwischen beiden Parametern aufgrund der geringen Fangzahlen bei der Tagesmessung nicht signifikant. Bei den Tagesmessungen in Jahr 2017 sowie bei den Wiederfängen der Käfer aus den unterschiedlichen Brutstämmen ergaben sich hoch bis höchst signifikante Abnahmen der WFR mit steigender Entfernung. Die WFR von markierten Käfern aus Brutstämmen zeigten für die überwinterten Parentalkäfer (F1) und die erneut zur Anlage von Geschwisterbruten schwärmenden Käfer (GB) in Hundsau 2016 die straffsten Zusammenhänge mit der Entfernung. Für die WFR der 2. Generation in Hundsau 2017 ergab sich kein signifikanter Zusammenhang. Sehr eng korrelierten auch die WFR mit der Distanz bei den Tagesfreilassungen 2017 in Hundsau und Ebenforst. In Ebenforst 2017 nahmen die WFR bei den Tagesfreilassungen und die WFR der ausschwärmenden Käfer zur Anlage von Geschwisterbruten am stärksten mit zunehmender Entfernung ab.

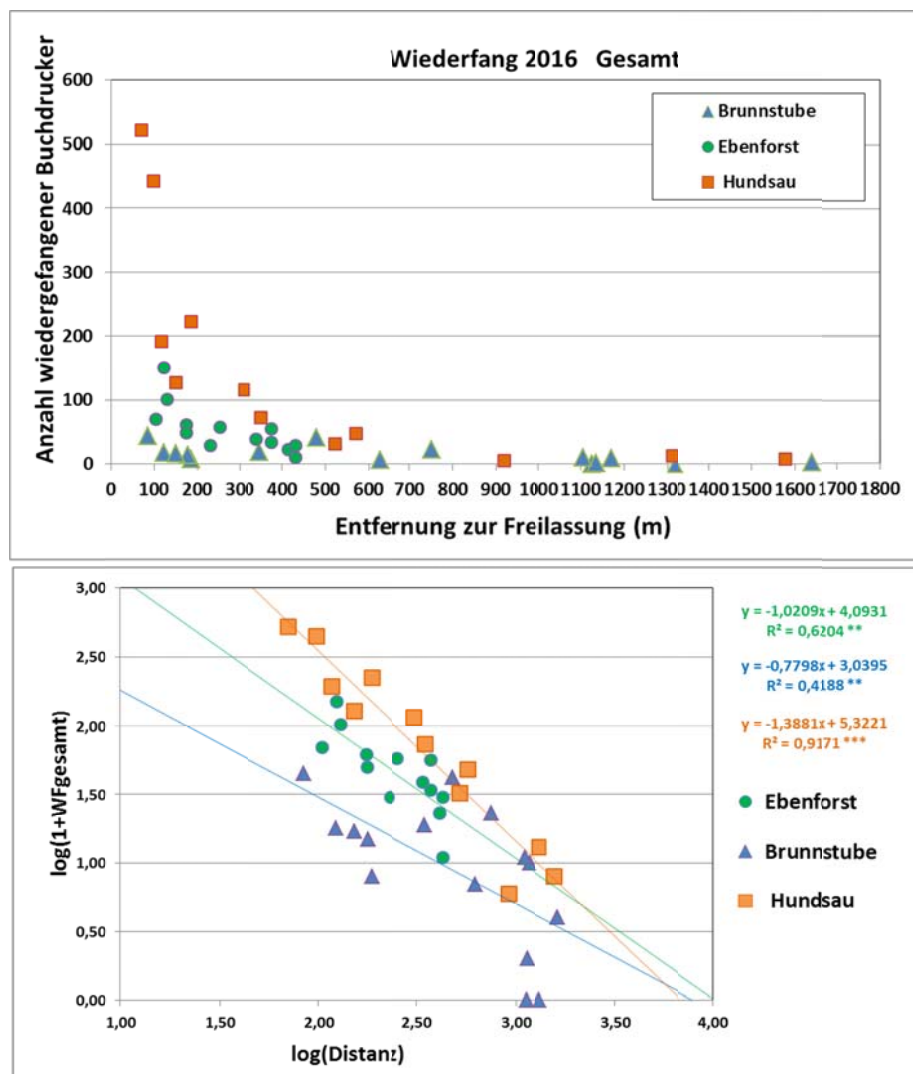


Abb. 16: Anzahl gefangener markierter Buchdrucker in Abhängigkeit von der Entfernung zur Freilassungsstelle 2016 (**: $p < 0.01$; ***: $p < 0.001$)

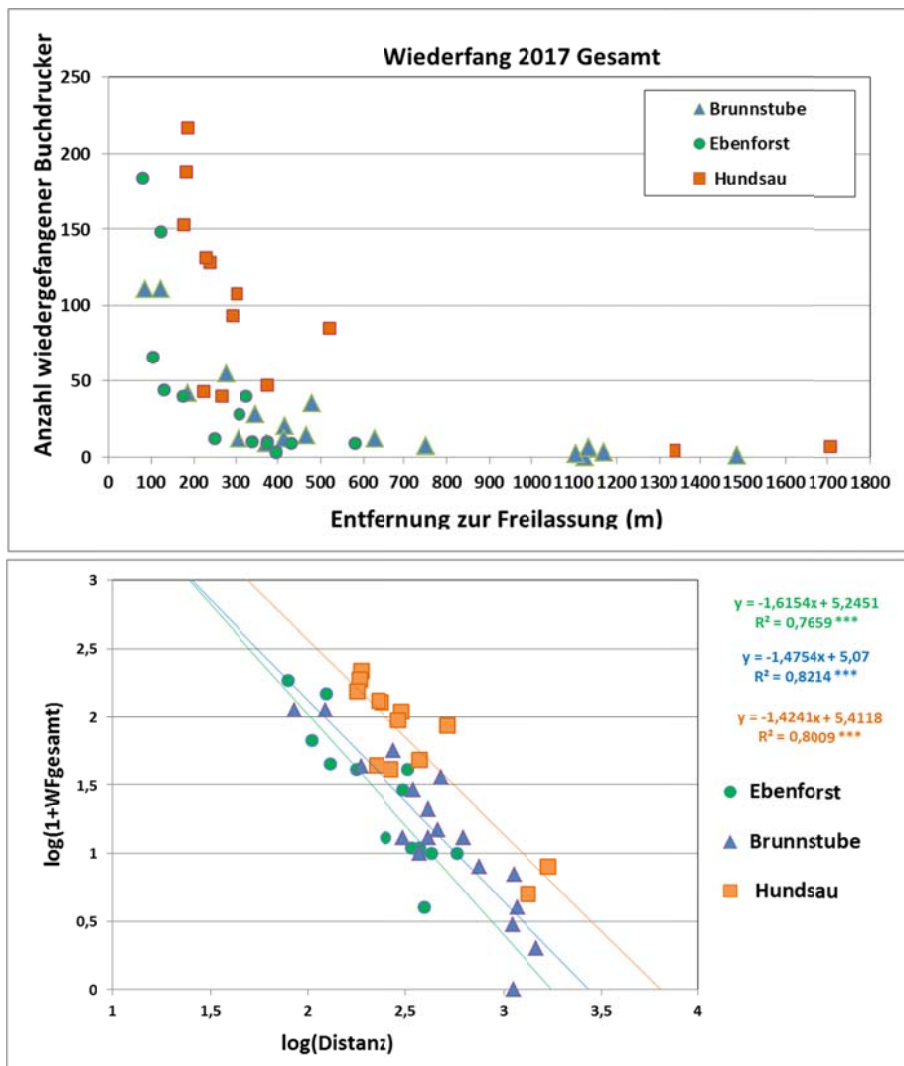


Abb. 17: Anzahl gefangener markierter Buchdrucker (WF) in Abhängigkeit von der Entfernung zur Freilassungsstelle 2017 (***: $p < 0,001$)

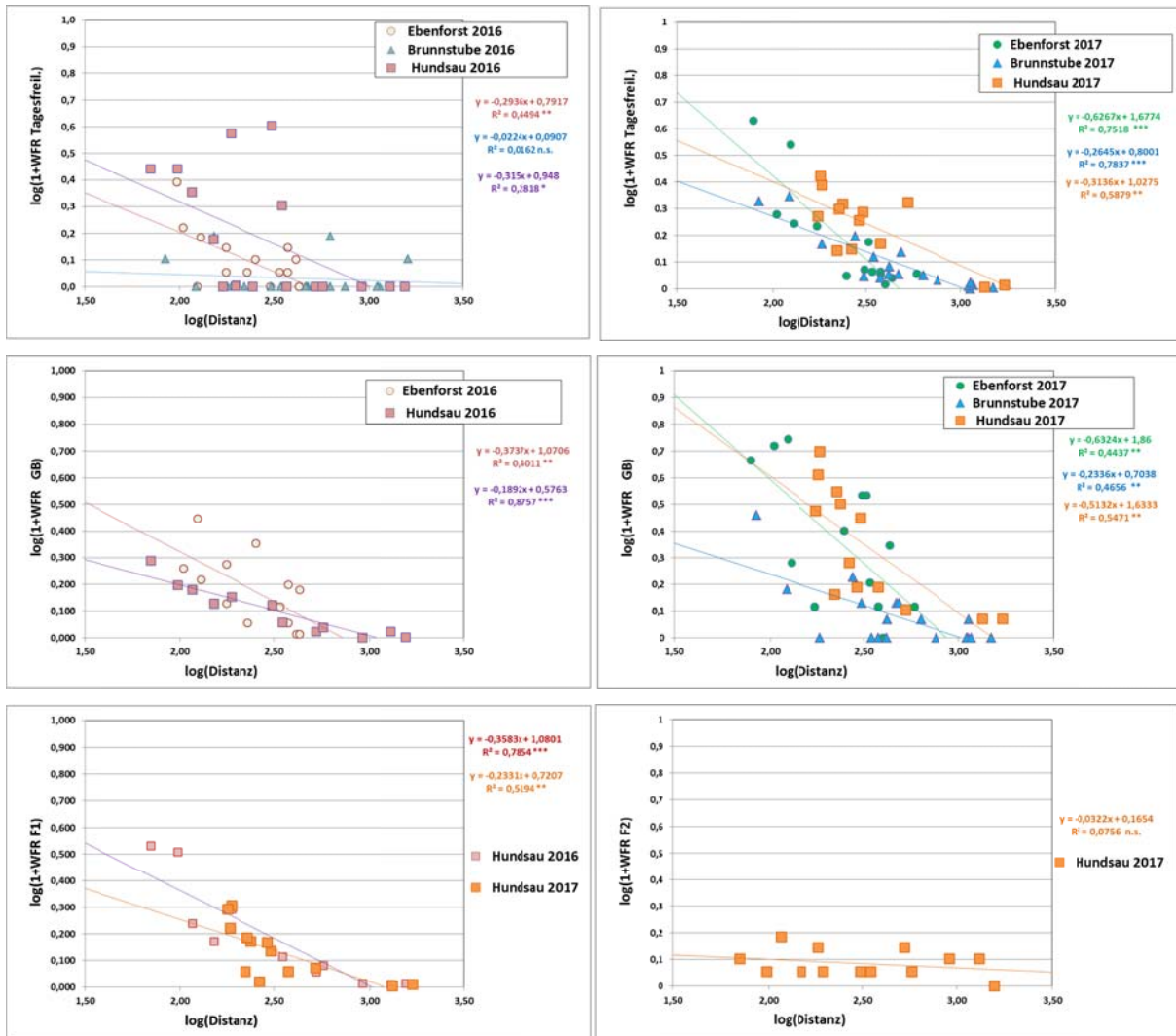


Abb. 18: Zusammenhang zwischen Wiederfangrate (WFR) und Entfernung zum Freilassungspunkt getrennt nach Untersuchungs Jahren und Standorten für die Tagesfreilassungen (oben), für den Flug von Geschwisterbruten (GB; mitte) und für den Schwärmflug der Parentalgeneration (F1) und der zweiten Generation (F2; Wiederfangraten nur für Hundsau 2016 bzw. 2017; unten) (n.s.: nicht signifikant, *: $p < 0,05$, **: $p < 0,01$, *: $p < 0,001$)**

3.1.3 Zeitlicher Verlauf der Wiederfänge

Der zeitliche Verlauf der Fallenfänge wurde wesentlich durch die jeweiligen Witterungsbedingungen im Laufe der Vegetationsperiode beeinflusst. Im Anhang sind für alle Standorte und Jahre die erhobenen Daten für die markierten und nicht markierten Buchdrucker sowohl für die täglichen Fangzahlen der automatischen Fallen als auch für die wöchentlichen Fänge der Theysohn-Schlitzfallen dargestellt (Annex Abb. 9 - Abb. 14).

Der zeitliche Verlauf des Anflugs an die Fallen wurde einerseits direkt von den Witterungsbedingungen beeinflusst. Insbesondere sind Temperatur und Sonneneinstrahlung bestimmte Faktoren für das Schwärmen der Käfer (Anzahl der Schwärmtage bzw. -stunden). In Abb. 19 sind die Zusammenhänge zwischen täglichen Witterungsparametern (Lufttemperaturmaximum, Globalstrahlungssumme, Luftfeuchte und Niederschlagssumme) und den Tagessummen der

gefangenen Buchdrucker in den automatischen Fallen dargestellt. Hinsichtlich des Tagesmaximums der Lufttemperatur bestätigte sich, dass erst ab Lufttemperaturen über 16,5 °C (Lobinger, 1994) ein bedeutender Schwärmflug des Buchdruckers möglich ist. Hohe Gesamtfangzahlen (>1000 gefangene Buchdrucker) traten an Tagen mit Temperaturen deutlich über 18°C auf. Die täglichen Gesamtfangzahlen nahmen mit zunehmender Sonneneinstrahlung deutlich zu. Intensives Schwärmen des Buchdruckers konnte ab einer Tagessumme der Globalstrahlung von mehr als 1800 Wh/m² registriert werden (Abb. 19). Mit zunehmender Luftfeuchte nahmen die Fallenfänge dagegen deutlich ab. Hohe Fangzahlen wurden nur an weitgehend niederschlagsfreien Tagen erzielt (Abb. 19).

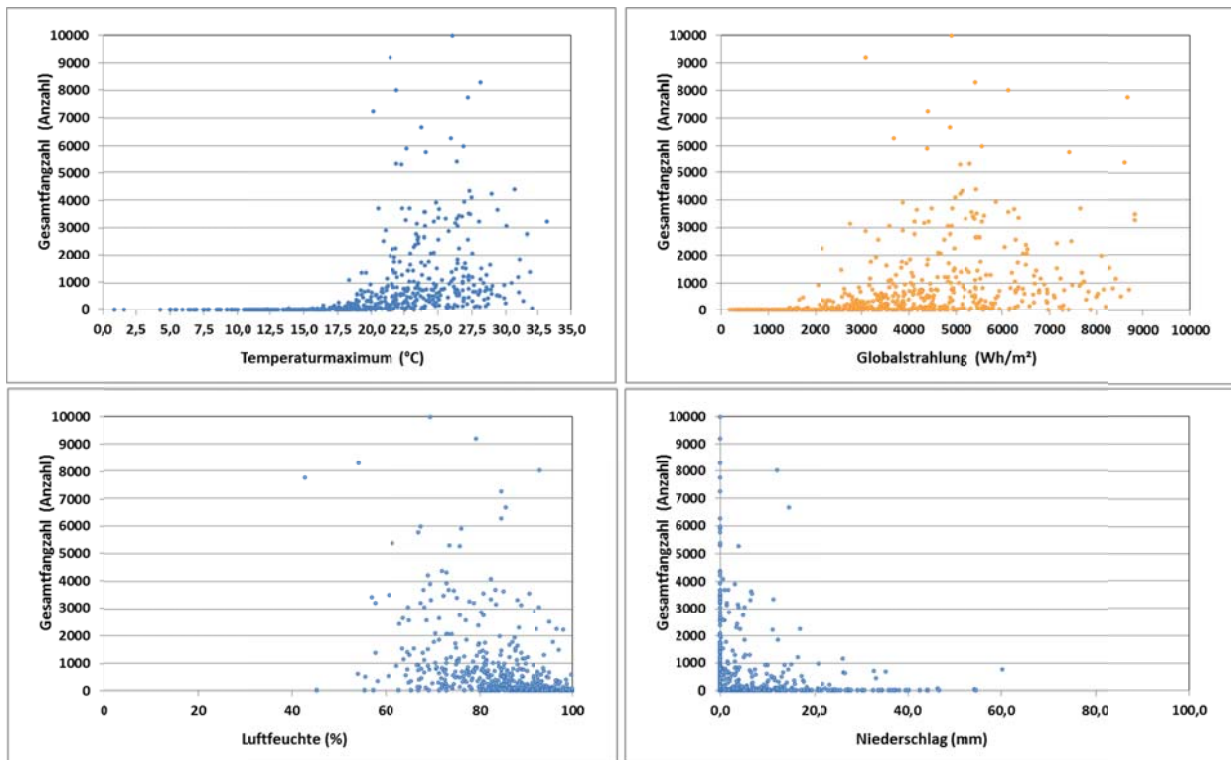


Abb. 19: Zusammenhänge zwischen täglichen Witterungsparametern (Lufttemperaturmaximum, Globalstrahlungssumme, Luftfeuchte, Niederschlagssumme) und den Tagessummen der gefangenen Buchdrucker (automatischen Fallen) für alle Standorte und Jahre

Andererseits wurde der zeitliche Verlauf der Fangzahlen und insbesondere der Wiederfang markierter Käfer, die aus den eingefärbten Stämmen ausschlüpfen, durch die im Wesentlichen von der Temperatur und der Einstrahlung abhängige Brutentwicklung bestimmt. Mit dem Modell PHENIPS wurden die relativen Temperatursummen für die potentielle maximale (TS_RT: von den einstrahlungsbedingt erhöhten Rindentemperaturen abhängige) und minimale (TS_AT: von der Lufttemperatur abhängige) Brutentwicklung berechnet. In Abb. 20 - Abb. 25 sind die relativen Temperatursummen für die potentiellen Generationen (F1: 1. Generation, GB1; GB2: erste bzw. zweite Geschwisterbrut; F2: zweite Generation; GBF2: Geschwisterbrut der zweiten Generation) für die einzelnen Untersuchungsgebiete bzw. Fangbaumserien (Hundsau 2016, Abb. 22) und der zeitliche Verlauf der Fallenfänge dargestellt. Die modellierten Entwicklungsverläufe zeigten eine sehr gute Übereinstimmung mit den beobachteten Fallenfängen und wurden für die Zuordnung der Fallenfänge sowie der Abgrenzung der Wiederfänge markierter Buchdrucker zu den jeweiligen Generationen (insbesondere in Hundsau 2016 (Abb. 22), Hundsau 2017 (Abb. 25) und Ebenforst 2016 (Abb. 20)) herangezogen.

In Ebenforst trat nach vergleichsweise geringen Wiederfängen der aus den Überwinterungstämmen schlüpfenden gelb bzw. grün markierten Käfer ein deutlicher Anstieg der Fallenfänge mit Beginn des Ausflugs der Parentalkäfer zur Anlage von Geschwisterbruten (Mitte Juni 2016) und ein weiterer deutlicher Anstieg mit Beginn des Ausflugs der Jungkäfer zur Anlage der 2. Generation (ab Ende Juli) auf (Abb. 20).

Im Untersuchungsgebiet Brunnstube waren 2016 hohe Fangzahlen von nichtmarkierten Buchdruckern und Wiederfänge markierter Käfer nur im Frühjahr/Frühsummer mit dem Schwärmflug der ersten Generation zu registrieren. Von den rosa und orange markierten Stämmen konnten ab Mitte Juni nur wenige Individuen wiedergefangen werden. Aufgrund der überwiegend univoltinen Entwicklung der Käfer (mit Geschwisterbruten frühestens ab Anfang Juli) waren auch die Fänge nichtmarkierter Buchdrucker im Laufe des Sommers 2016 in dieser Höhenlage geringer als bei den Standorten Ebenforst und Hundsau (Abb. 21).

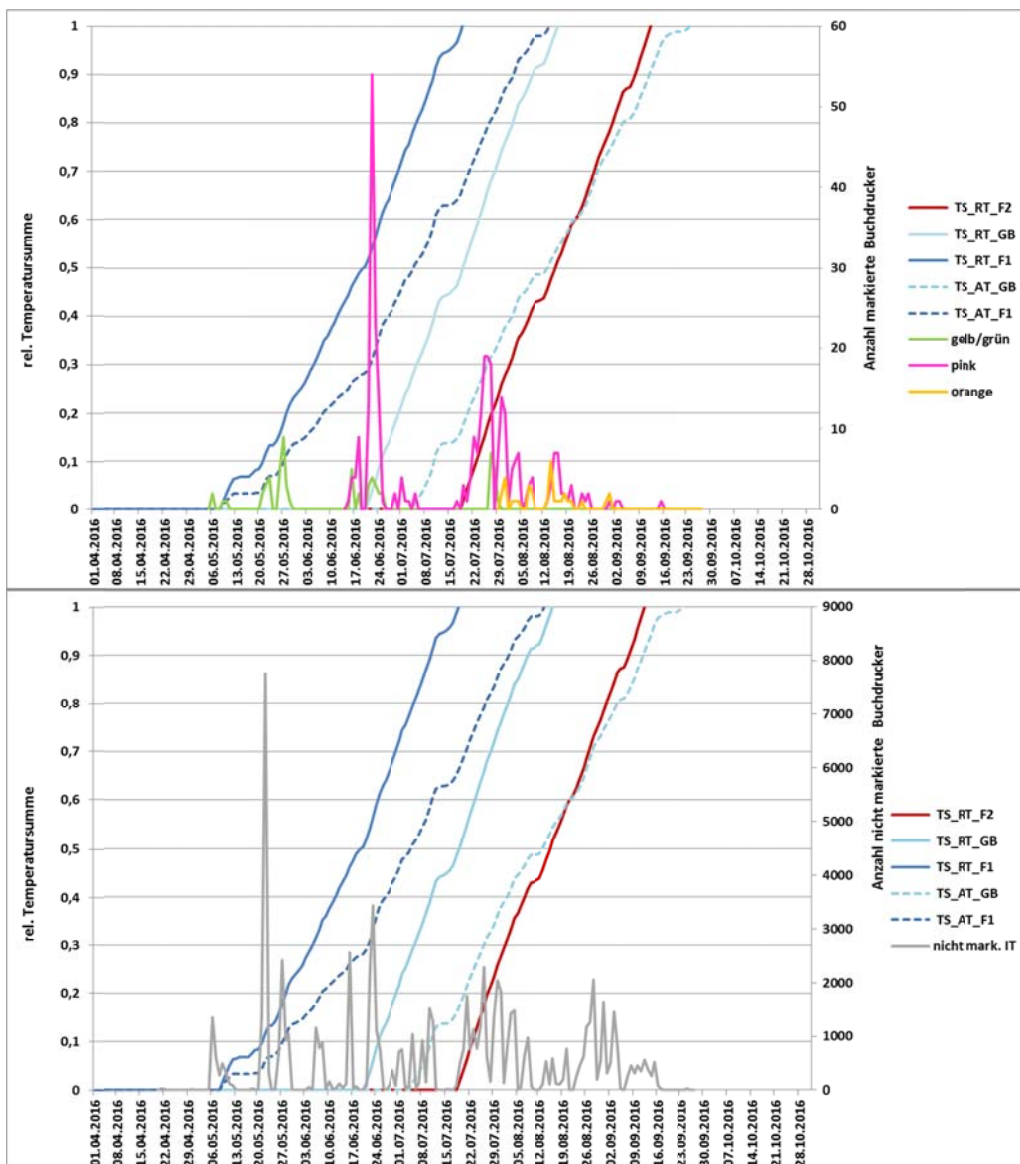


Abb. 20: Entwicklungsverlauf der Bruten am Standort Ebenforst 2016 im Vergleich zum Wiederfang der aus markierten Stämmen schlüpfenden Buchdrucker und zur Fangzahl nichtmarkierter Buchdrucker in den automatischen Fallen 2016

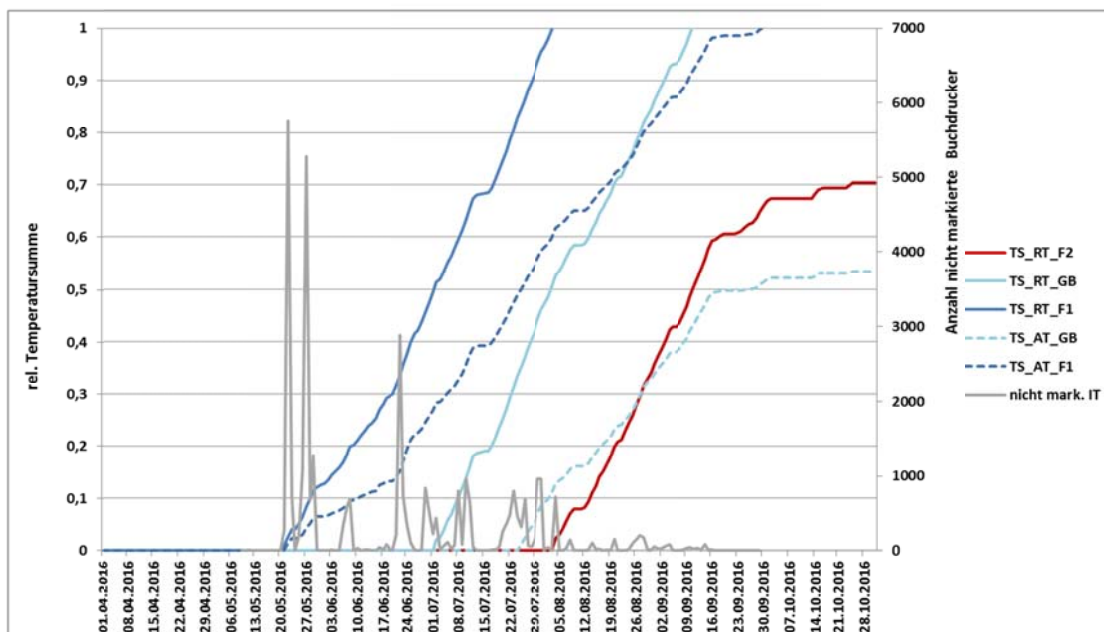
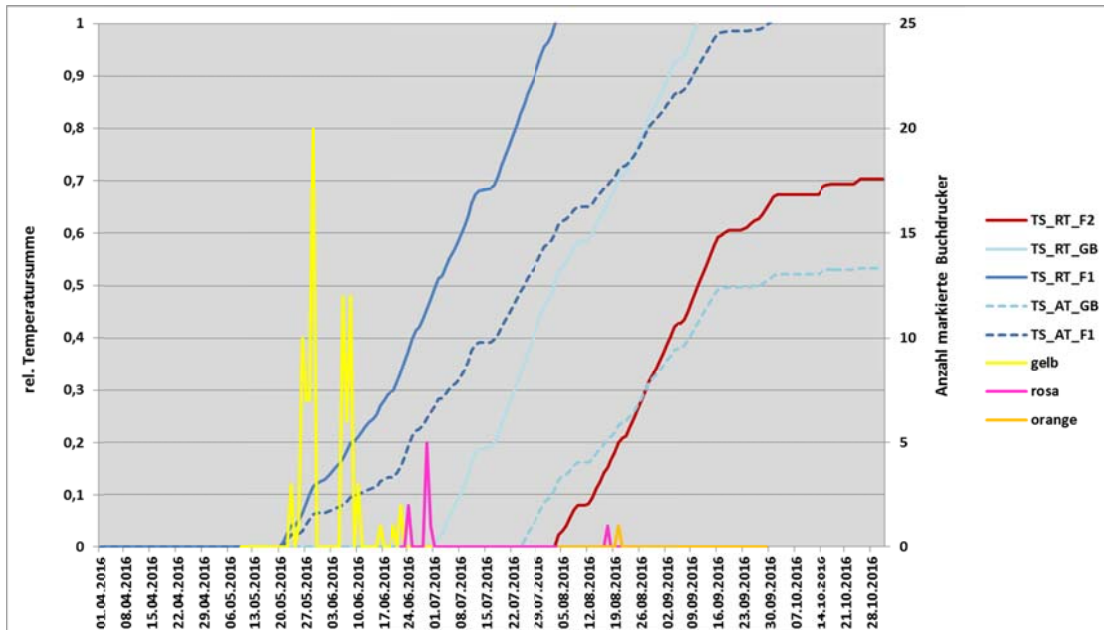


Abb. 21: Potentieller Entwicklungsverlauf und Gesamtanzahl der in den automatischen Fallen gefangenen Buchdrucker in Brunnstube 2016

Im Gebiet Hundsau wurden sehr hohe Wiederfänge von Buchdruckern, die aus den gelb (2016) bzw. orange (2017) eingefärbten Überwinterungstämmen ausschlüpfen, ermittelt (Abb. 22, Abb. 24). Im Jahr 2016 konnten zudem vergleichsweise hohe Wiederfänge von rosa markierten Buchdruckern registriert werden, die zur Anlage von Geschwisterbruten (ab Mitte Juni) bzw. von einer zweiten Generation (ab Mitte Juli) ausschwärmten. Von den orange eingefärbten, Ende Juli 2016 vorgelegten Stämmen konnten 2016 nur wenige Individuen wiedergefangen werden (Schwärmflug zur Anlage einer zweiten Geschwisterbrut). Jungkäfer aus diesen Stämmen schlüpfen erst im Frühjahr 2017 (Abb. 24). Von den blau eingefärbten Brutstämmen im Jahr 2017 wurden ab Mitte Juni bis Anfang Juli markierte Käfer wiedergefangen. Danach waren die Wiederfänge dieser markierten Buchdrucker nur mehr sehr gering, obwohl spätestens ab 20. Juli 2017 auch die Jungkäfer aus diesen Stämmen (2. Generation) ausschlüpfen (Abb. 25).

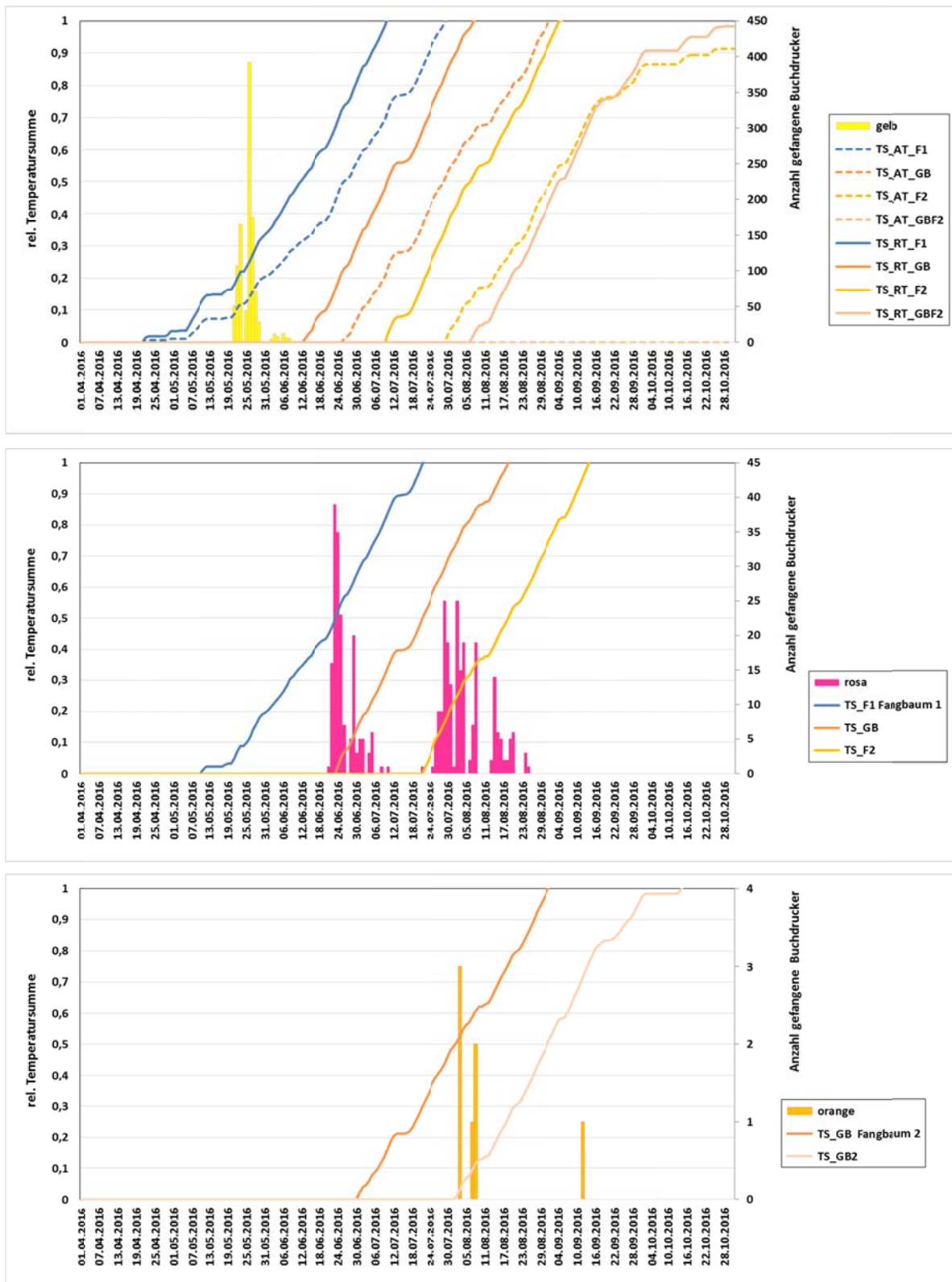


Abb. 22: Entwicklungsverlauf der Bruten für die unterschiedlichen Fangbäume im Gebiet Hundsau und Wiederfang markierter Buchdrucker Hundsau 2016

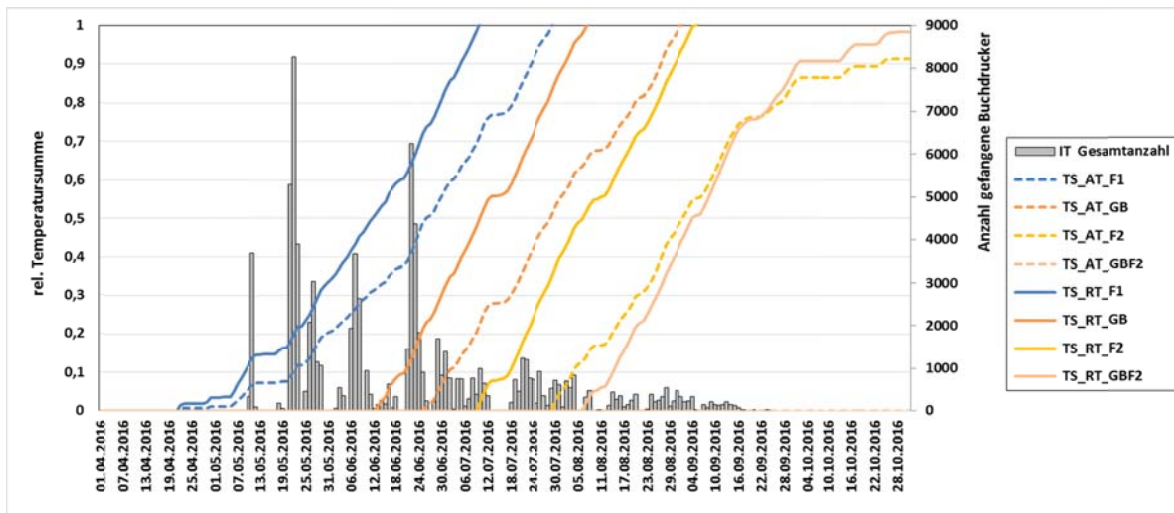


Abb. 23: Potentieller Entwicklungsverlauf und Gesamtanzahl der in den automatischen Fallen gefangenen Buchdrucker in Hundschau 2016

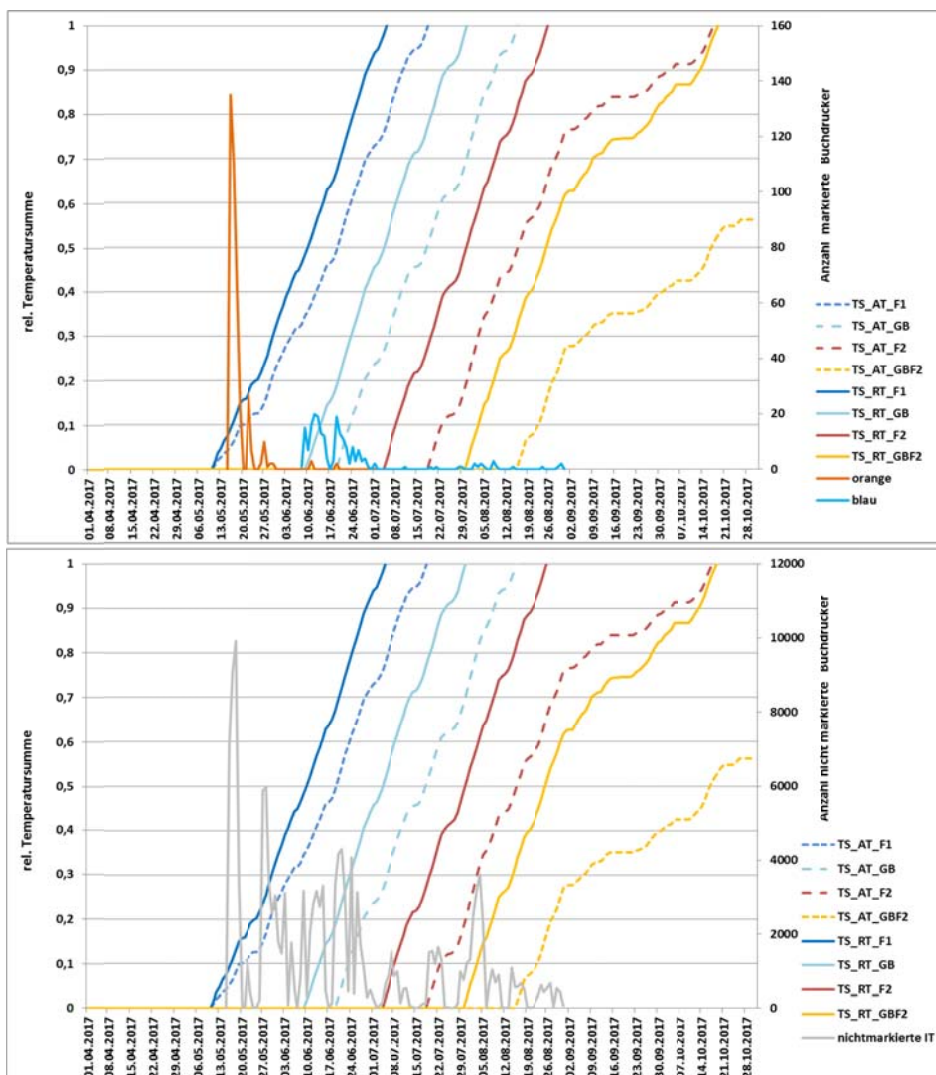


Abb. 24: Potentieller Entwicklungsverlauf und Anzahl der wiedergefangenen markierten Buchdrucker und Fänge nichtmarkierter Käfer in den automatischen Fallen im Gebiet Hundschau im Jahr 2017

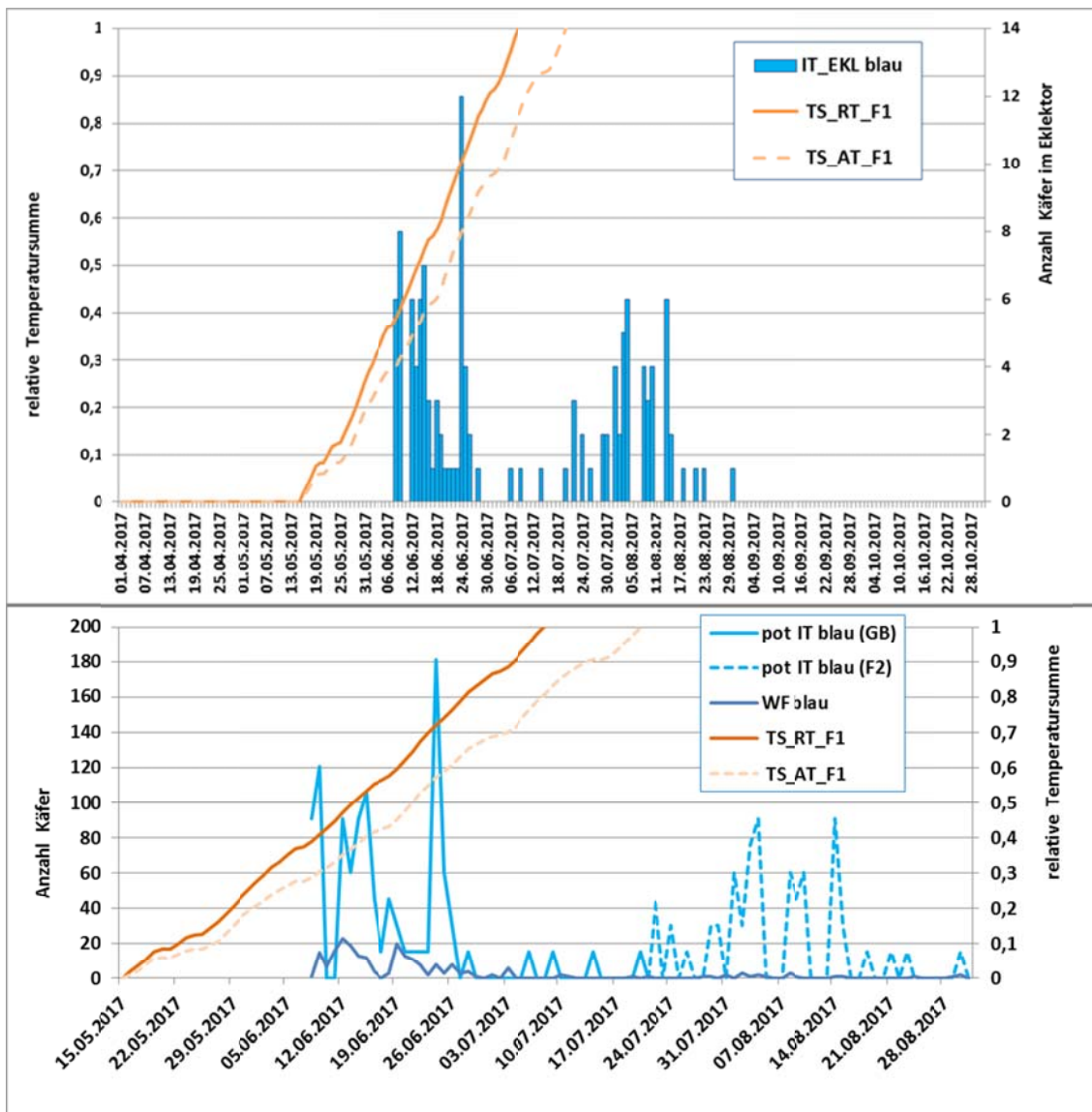


Abb. 25: Entwicklungsverlauf der Bruten in blau eingefärbten Stämmen, beobachteter Schlupf von Käfern aus dem Kontrollstamm im Stammeklektor (oben), potentielle Anzahl geschlüpfter Buchdrucker (pot IT blau GB und F2) aus den aufgelegten Stämmen und Wiederfang blau markierter Buchdrucker (unten) im Verlauf des Sommers 2017 im Gebiet Hundsau

Das Ausschlüpfen der Buchdrucker aus den eingefärbten Stämmen dürfte aber prinzipiell zeitlich sehr eng mit dem Wiederfang in den Fallen verbunden sein. Die Analyse der Bilddaten von den gelb eingefärbten Stämmen in Hundsau im Zeitraum 10.5. – 21.6.2016 (Ausschlupf der Parentalgeneration aus den Überwinterungsstämmen) ergab ein hohes Maß an Synchronität zwischen der Aktivität bei den Brutstämmen und den beobachteten Wiederfängen der entsprechend gelb markierten Käfer (Abb. 26).

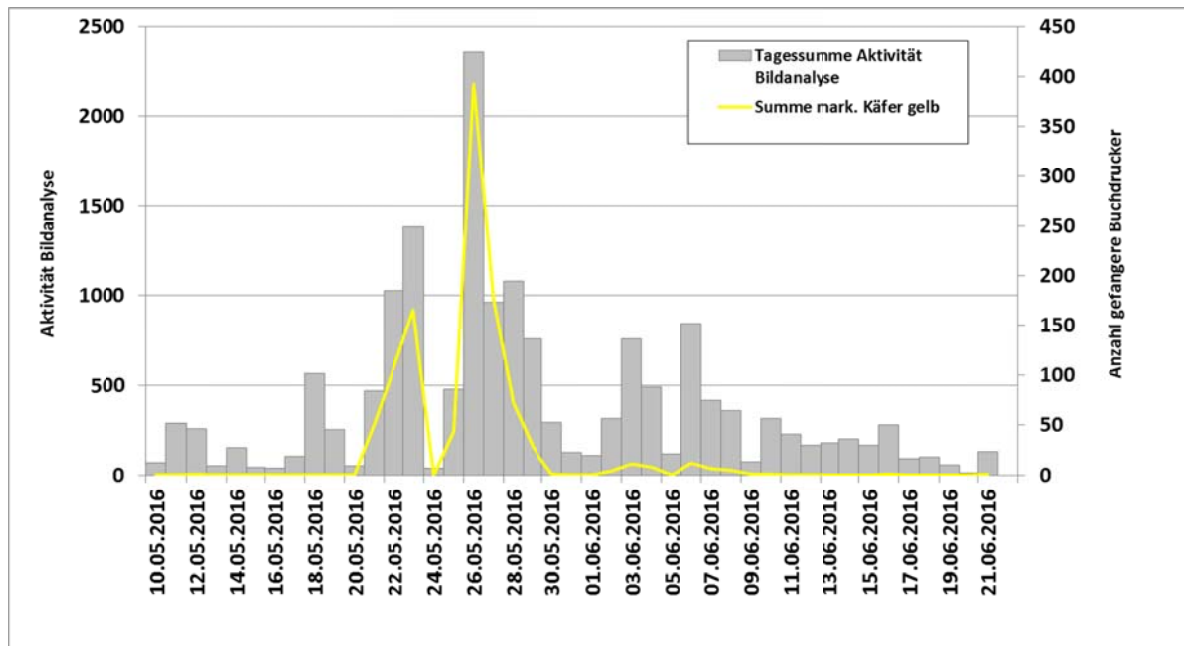


Abb. 26: Tagessummen der Aktivität bei den eingefärbten Stämmen aus Bildanalysen im Vergleich zu den täglichen Wiederfängen gelb markierter Buchdrucker im Untersuchungsgebiet Hundsau im Zeitraum 10.5. – 21.6.2016

Eine hohe zeitliche Synchronität zwischen Freisetzung und Wiederfang markierter Käfer konnte in der Regel auch bei den Tagesfreilassungen festgestellt werden. Zumeist wurden die ersten Wiederfänge schon unmittelbar nach der Freisetzung registriert. In der Regel wurde ein überwiegender Anteil der markierten, freigesetzten Buchdrucker noch am Tag der Freisetzung wiedergefangen (vgl. Tab. 8 und Tab. 9). Ausnahmen davon ergaben sich für Freilassungsversuche, die spät am Tag durchgeführt wurden (z.B. Brunnstube am 4.7.2017: Freilassung am späten Nachmittag bei vergleichsweise niedrigen Temperaturen). Zeitlich verzögerte Wiederfänge konnten auch bei Freilassungen registriert werden, die bei eher ungünstigen Witterungsbedingungen stattfanden (Freilassungen in Ebenforst am 14.7.2016 (geringe Temperatur und Einstrahlung); bzw. am 13.6.2017 (bei hohen Windgeschwindigkeiten, vgl. Annex Abb. 44).

Bei den Freilassungen in Brunnstube (insbesondere am 22.6.2017) konnte auch eine räumlich-zeitliche Verlagerung der Fallenfänge in Abhängigkeit von der Exposition beobachtet werden (Abb. 27). Die Fänge markierter als auch nichtmarkierter Buchdrucker traten bei den Fallenstandorten an der ost-bis südostexponierten, schon am Vormittag sonnenbeschienenen Talseite bereits in den Vormittagsstunden auf. Schwärmaktivität und Fallenfänge verlagerten sich dann im Laufe des Tages auf die gegenüberliegende, west- bis nordwestexponierte Talseite, die auch am späten Nachmittag noch entsprechend sonnenexponiert war.

Die am extremsten zeitlich verzögerten Wiederfänge nach Tagesfreilassungen konnten im Gebiet Hundsau registriert werden: jeweils ein, bei den Tagesfreilassungen am 3.8.2016 bzw. am 2.8.2017 markierter Buchdrucker wurde am 25.8.2016 bzw. am 30.8.2017 (22 bzw. 28 Tage nach der Freilassung) in einer automatischen Falle wiedergefangen.

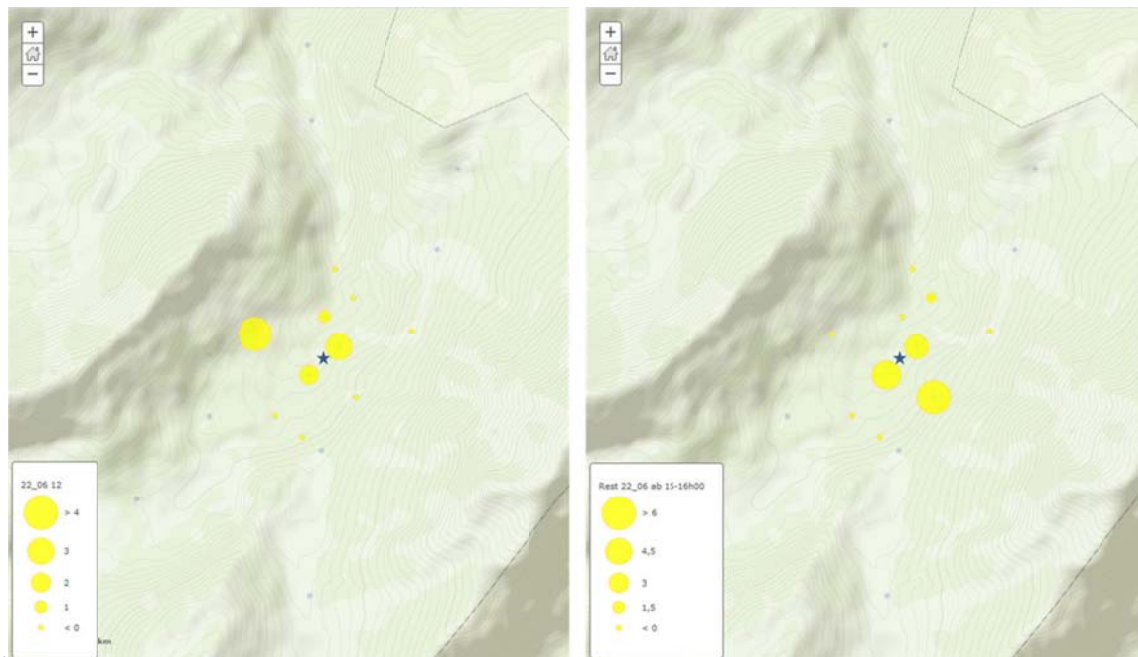


Abb. 27: Zeitlich-räumliche Differenzierung der Wiederfänge markierter Buchdrucker in Abhängigkeit von der Exposition bei der Tagesfreilassung am 22.6.2017 in Brunnstube (links: Wiederfang markierter Käfer von 11h00-12h00; rechts: Wiederfang nach 16h00)

3.2 Windbedingungen und Wiederfang

Die Ausbreitung des Buchdruckers dürfte wesentlich von den jeweiligen Luftströmungen mit beeinflusst sein. Daher wurden bei allen Automatikfallen und Freilassungsstellen in den unterschiedlichen Untersuchungsgebieten Windmessungen mit hoher zeitlicher Auflösung durchgeführt. Die Zeitreihen der Windrichtung und der Windgeschwindigkeit bei den unterschiedlichen Standorten wiesen ein für das jeweilige Gebiet typisches Muster auf. In Abb. 27 bis Abb. 30 sind die entsprechenden Zeitreihen von Windrichtung und Geschwindigkeit (10-Minutenwerte) während der gesamten Untersuchungsperioden 2016 für die Gebiete Ebenforst, Hundsau und Brunnstube dargestellt. Dieses Muster ergab sich bei stabiler Wetterlage einerseits aufgrund der topographischen Gegebenheiten (Hundsau: Südwesthang; Ebenforst: Nordhang; Gesäuse: nordexponierter Grabenstandort) und andererseits aus der tageszeitlichen Veränderung (Erwärmung und Abkühlung) der bodennahen Luftschichten mit entsprechendem Wechsel der Windrichtung zwischen Nacht- und Tagstunden (Tab. 10). Dies wurde begleitet durch zunehmende Windgeschwindigkeit im Laufe des Tages bzw. Windberuhigung in den Nachtstunden. Bei Störungseinfluss wurde dieses Muster der Windrichtungen und der Windgeschwindigkeiten standortsspezifisch entsprechend abgeändert.

Die jeweiligen Windverhältnisse bei den Fallenstandorten wurden zudem durch kleinstandörtliche Gegebenheiten (Freifläche, Waldbestand, Nähe zum Waldrand) beeinflusst. Im Anhang (Annex Abb. 45) sind die Häufigkeitsverteilungen von Windrichtungsklassen und Windgeschwindigkeitsklassen bei den Standorten der automatischen Fallen und der Freilassungsstellen im jeweiligen Untersuchungsgebiet für potentielle Schwärmtage des Buchdruckers (Lufttemperatur $\geq 16,5^{\circ}\text{C}$; Globalstrahlung $\geq 100\text{W}/\text{m}^2$) und für den Zeitraum der

Tagesfreilassungen dargestellt. Bei allen Untersuchungsgebieten zeigten die Windmessungen für Standorte im Wald bzw. in Waldnähe in der Regel eine deutlich niedrigere Windgeschwindigkeiten und auch eine erhebliche Abänderung bzw. eine erhöhte Variabilität der Windrichtung gegenüber Freiflächenstandorten auf.

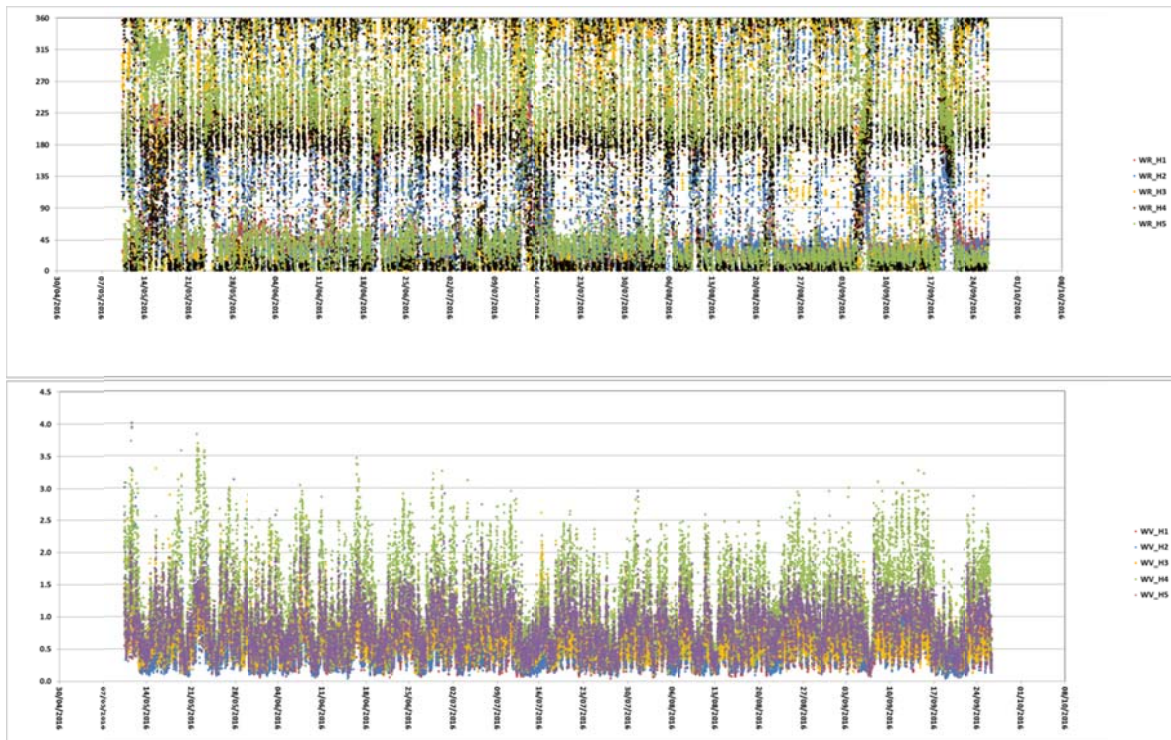


Abb. 28: Zeitreihe von Windrichtung und Windgeschwindigkeit (10-Minuten Werte) für die fünf Standorte der automatischen Fallen im Untersuchungsgebiet Hundsau 2016

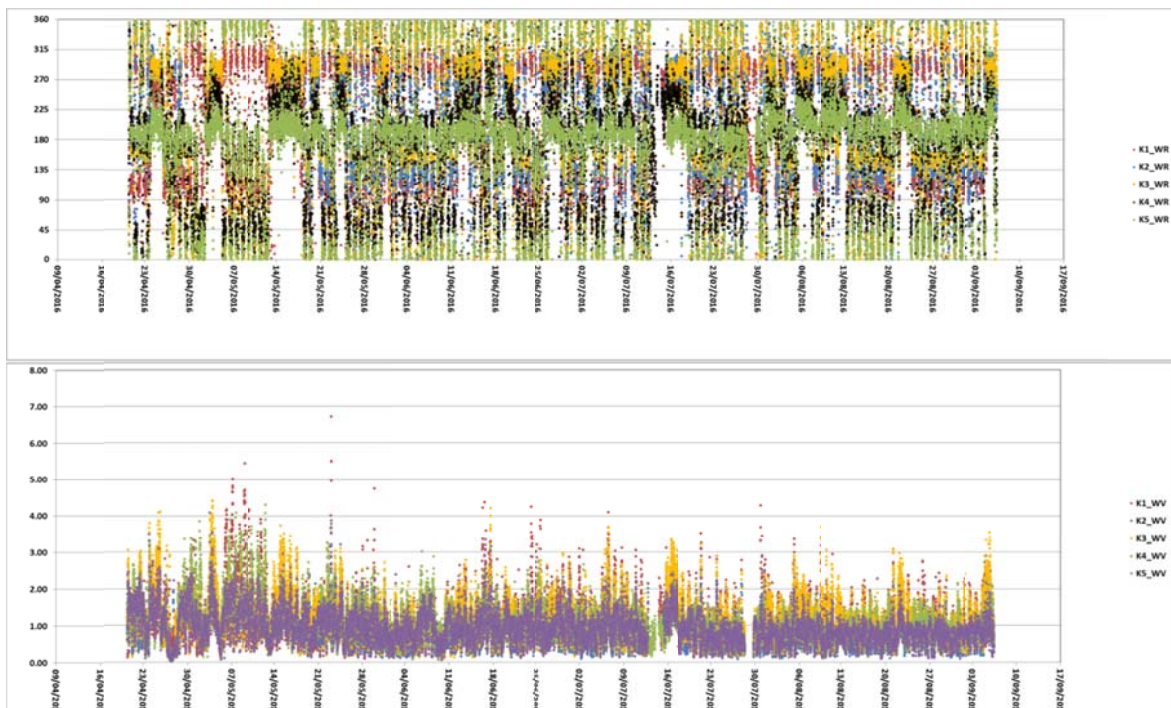


Abb. 29: Zeitreihe von Windrichtung und Windgeschwindigkeit (10-Minuten Werte) für die fünf Standorte der automatischen Fallen im Untersuchungsgebiet Ebenforst 2016

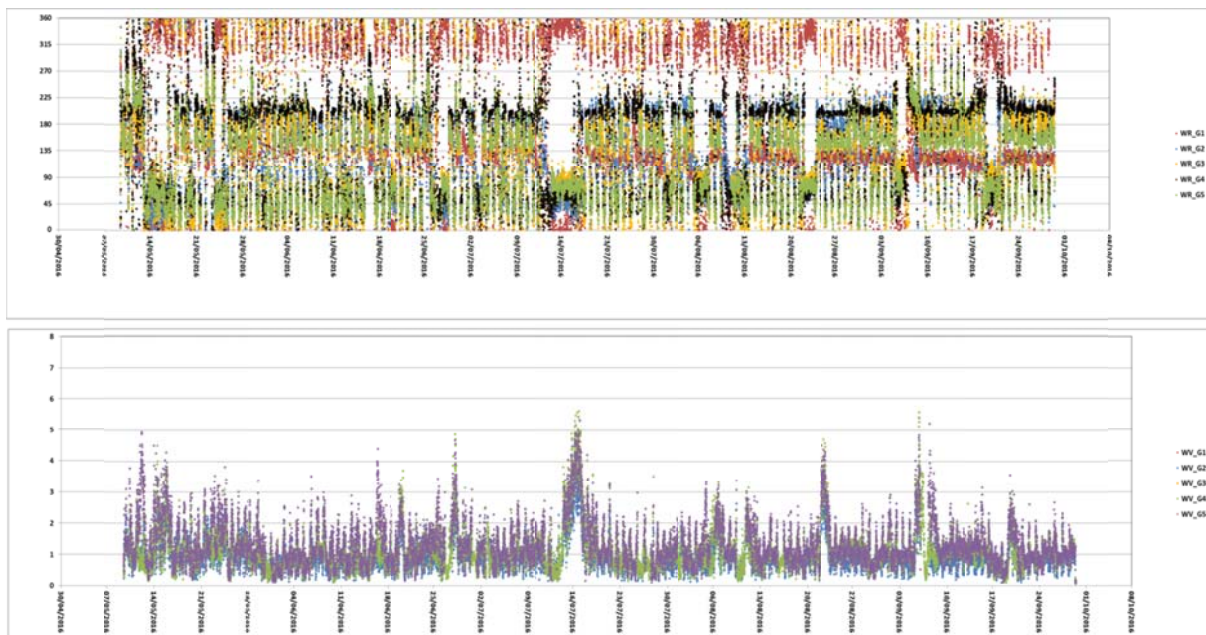


Abb. 30: Zeitreihe vom Windrichtung und Windgeschwindigkeit (10-Minuten Werte) für die fünf Standorte der automatischen Fallen im Untersuchungsgebiet Brunnstube 2016

Die bei den Freilassungsstellen beobachteten Windrichtungen während der potentiell möglichen Schwärmzeiten des Buchdruckers unterschieden sich entsprechend der Geländebedingungen zwischen den Standorten (Tab. 10). Die Standorte Ebenforst und Brunnstube zeichneten sich durch eine dominierende nördliche Windrichtung (NNW – ONO) für potentielle Flugzeiten aus, wobei die Windrichtung bei der Freilassungsstelle Brunnstube eine deutlich stärkere Streuung aufwies als in Ebenforst. In Hundsau traten beim Freilassungspunkt im Jahr 2016 überwiegend Windrichtungen aus WSW bzw. im Jahr 2017 aus SW auf.

Hinsichtlich der mittleren Windgeschwindigkeit für potentielle Schwärmzeiten des Buchdruckers zeigten sich bei allen Untersuchungsgebieten signifikante saisonale Unterschiede. Im Frühjahr bzw. Frühsommer (Flugzeit der ausschlüpfenden Parentalgeneration aus den gelb/grün (2016) bzw. rosa/orange (2017) eingefärbten Stämmen) war die mittlere Windgeschwindigkeit bei allen Untersuchungsgebieten höher als im Hoch- und Spätsommer.

Betrachtet man die Windbedingungen während der einzelnen Tagesfreilassungsexperimente (Tab. 11), wird deutlich, dass Windgeschwindigkeit und Richtung zeitlich als auch räumlich sehr variabel waren und mitunter erheblich von längerfristigen Durchschnittswerten abwichen. Die größte Variabilität der Windrichtung ergab sich bei den Freilassungen in Hundsau 2017. Die Windrichtung an der Freilassungsstelle wechselte sowohl zwischen den einzelnen Tagesfreilassungen als auch untertags und wich teils erheblich vom längerfristigen Wert (Windrichtung überwiegend aus SW) ab (Tab. 10).

Eine hohe Variabilität der Windrichtung herrschte auch während der Tagesfreilassung in Brunnstube 2016 (Windwechsel im Laufe des frühen Nachmittags von NO nach SW vor Störungsdurchzug). Während der Tagesfreilassungen 2017 in Brunnstube und Ebenforst traten dagegen vergleichsweise geringe Schwankungen der Windrichtung an der Freilassungsstelle auf (Ebenforst: Windrichtung überwiegend aus NW; Brunnstube: dominierende Windrichtung ONO).

Die registrierten Windgeschwindigkeiten zeigten ebenfalls eine hohe Variabilität zwischen den einzelnen Tagesfreilassungen und auch im Tagesverlauf (Tab. 11). Die hohen Windgeschwindigkeiten ($WG > 2\text{m/s}$) während der Freilassung am 13.6.2017 in Ebenforst führten zu einem geringen

Wiederaufstieg an diesem Tag (WFR=1,2%; Tab. 9). Die Mehrzahl der abgeflogenen markierten Käfer dürfte daher erst am darauffolgenden Tag wiedergefangen worden sein (vgl. Annex Abb. 1 und Annex Abb. 44-45). Die hohe Windgeschwindigkeit (WG =2,2 m/s ab 14h15) bei der Freilassung in Brunnstube am 21.7. 2017 führte zu einem deutlichen Rückgang der Fänge nichtmarkierter und markierter Käfer in den frühen Nachmittagsstunden (Annex Abb. 17).

Tab. 10: Windrichtungen und Windgeschwindigkeiten an den Freilassungsstellen in Abhängigkeit von den potentiellen Schwärmbedingungen des Buchdruckers getrennt nach Untersuchungsgebiet, Jahr und Markierung der Brutstämme

Flugbedingungen und Markierung:

Nacht: Zeit ab 20h00 bis 7h00;

kein Flug möglich: Zeit 7h00 – 20h00 und Tmax <16,5°C und GS<100W/m²;

gelb- blau: potentieller Flug für Käfer aus den markierten Stämmen: Zeit 7h00 – 20h00 und Tmax ≥16,5°C und GS ≥ 100W/m²

WR: mittlere Windrichtung; Stabw. WR: zirkuläre Standardabweichung der Windrichtung;

WG: mittlere Windgeschwindigkeit (Werte, gefolgt von unterschiedlichen Buchstaben, unterscheiden sich signifikant (p≤0,05))

WGmax/WGmin: maximaler bzw. minimaler 10-Minuten- bzw. 1-Minutenwert der Windgeschwindigkeit

Jahr	Standort	Flugbedingungen und Markierung	Zeitraum	WR (°)	WR Klasse	Stabw. WR (°)	WG (m/s)	Stabw. WG (m/s)	WGmax (m/s)	WGmin (m/s)	
2016	Ebenforst	Nacht	20.04.2016 - 27.09.2016	226,1	SW	61,9	0,97	a	0,52	4,5	0,1
		kein Flug möglich	20.04.2016 - 27.09.2016	297,0	WNW	78,4	1,16	c	0,61	3,9	0,2
		gelb/grün	06.05.2016 - 13.06.2016	16,2	NNO	35,6	1,52	e	0,45	3,3	0,6
		rosa	15.06.2016 - 28.07.2016	350,2	N	53,5	1,26	d	0,48	3,8	0,3
		rosa/orange	28.07.2016 - 16.09.2016	8,4	N	58,4	1,11	b	0,38	3,1	0,2
2016	Brunnstube	Nacht	09.05.2016 - 29.09.2016	214,0	SW	64,5	1,61	a	0,98	11,1	0,1
		kein Flug möglich	09.05.2016 - 29.09.2016	99,6	O	99,7	1,58	a	1,04	14,9	0,2
		gelb	11.05.2016 - 23.06.2016	31,7	NNO	85,7	1,88	b	0,64	4,1	0,4
		rosa	23.06.2016 - 04.08.2016	58,9	ONO	54,0	1,55	a	0,61	5,8	0,3
		rosa/orange	04.08.2016 - 28.09.2016	51,6	NO	68,0	1,57	a	0,51	4,1	0,3
2016	Hundsau	Nacht	10.05.2016 - 26.09.2016	76,9	ONO	44,1	0,76	a	0,34	2,6	0,1
		kein Flug möglich	10.05.2016 - 26.09.2016	156,8	SSO	104,8	0,74	a	0,35	2,9	0,1
		gelb	10.05.2016 - 22.06.2016	247,9	WSW	58,0	1,38	d	0,45	2,9	0,4
		rosa	22.06.2016 - 03.08.2016	255,5	WSW	64,9	1,04	b	0,41	2,5	0,1
		rosa/orange	03.08.2016 - 25.09.2016	254,6	WSW	51,3	1,11	c	0,43	3,0	0,1
2017	Ebenforst	Nacht	30.05.2017 - 14.06.2017	211,1	SSW	64,9	1,09	a	0,47	4,1	0,1
		kein Flug möglich	30.05.2017 - 14.06.2017	280,8	W	84,5	1,29	b	0,63	5,5	0,2
		blau /rosa orange	31.05.2017 - 14.06.2017	348,1	NNW	54,3	1,41	c	0,61	4,6	0,2
2017	Brunnstube	Nacht	22.06.2017 - 06.07.2017	219,3	SW	57,5	1,67	a	0,92	9,2	0,1
		kein Flug möglich	22.06.2017 - 06.07.2017	96,8	O	101,6	1,47	b	0,89	7,7	0,1
		blau	22.06.2017 - 06.07.2017	63,8	ONO	76,5	1,67	a	0,77	7,0	0,1
2017	Hundsau	Nacht	15.05.2017 - 31.08.2017	55,0	NO	35,1	1,06	a	0,46	5,1	0,1
		kein Flug möglich	15.05.2017 - 31.08.2017	74,2	ONO	106,7	1,25	b	0,74	6,0	0,1
		orange	15.05.2017 - 08.06.2017	233,6	SW	70,4	1,88	d	0,90	4,9	0,2
		blau GB	08.06.2017 - 19.07.2017	218,8	SW	67,4	1,73	d	0,81	5,2	0,2
		blau F2	20.07.2017 - 31.08.2017	221,9	SW	81,1	1,37	c	0,62	3,5	0,2

Tab. 11: Windrichtungen und Windgeschwindigkeiten am Freilassungspunkt während der Tagesfreilassungsexperimente 2016 und 2017 in Ebenforst, Brunnstube und Hundsau

WR: mittlere Windrichtung; Stabw. WR: zirkuläre Standardabweichung der Windrichtung;
 WR variabel: Rayleigh Test $p > 0.05$
 WG: mittlere Windgeschwindigkeit (Werte gefolgt von unterschiedlichen Buchstaben unterscheiden sich signifikant ($p \leq 0,05$))
 WGmax/WGmin: maximaler bzw. minimaler 10-Minuten bzw. 1-Minutenwert der Windgeschwindigkeit

Jahr	Standort	Tagesfreilassungen		WR	WR	Stabw. WR	WG	Stabw.	WGmax	WGmin
		Zeitraum	(°)	Klasse	(°)	(m/s)	(m/s)	(m/s)	(m/s)	
2016	Ebenforst	29.07.2016 10:30 - 18:02	309,3	NW	49,8	1,15	0,49	3,5	0,2	
2016	Brunnstube	04.08.2016 11:30 - 17:29	230,0	SW	83,5	1,40	0,63	4,0	0,2	
2016	Hundsau	03.08.2016 11:00 - 16:39	276,5	W	63,7	1,12	0,50	2,8	0,2	
2017 Ebenforst										
Freilassung 31.05.-1.06.	1	31.05.2017 08:00 - 09:09	324,2	NW	36,2	1,16	b	0,39	1,9	0,5
		31.05.2017 09:10 - 14:29	328,5	NNW	29,7	1,35	d	0,46	2,7	0,3
		31.05.2017 14:30 - 17:59	312,0	NW	32,9	1,28	c d	0,37	2,3	0,4
		01.06.2017 10:55 - 18:29	347,2	NNW	53,0	0,87	a	0,34	2,0	0,2
2017 Ebenforst										
Freilassung 13.-14.06.	1	13.06.2017 12:35 - 14:49	315,1	NW	16,0	2,57	e	0,53	3,8	1,1
		13.06.2017 14:50 - 18:59	313,1	NW	17,4	2,06	d	0,45	4,0	1,0
		14.06.2017 09:10 - 10:29	2,9	N	26,7	1,37	b	0,43	2,4	0,5
		14.06.2017 10:30 - 11:59	53,9	NO	50,4	1,13	a	0,30	1,9	0,6
		14.06.2017 12:00 - 16:59	347,9	NNW	26,9	1,77	c	0,55	3,7	0,4
2017 Brunnstube										
Freilassung 20.- 22.06.	1	20.06.2017 13:30 - 16:59	69,1	ONO	40,7	1,57	b c	0,69	3,6	0,3
		21.06.2017 11:30 - 12:39	56,6	ONO	21,4	1,71	c	0,50	2,9	0,4
		21.06.2017 12:40 - 14:14	58,3	ONO	32,4	1,57	b c	0,51	2,9	0,4
		21.06.2017 14:15 - 16:59	72,2	ONO	26,0	2,17	d	0,84	4,4	0,5
		22.06.2017 08:15 - 10:29	71,9	ONO	38,5	1,52	b c	0,56	2,8	0,4
		22.06.2017 10:30 - 13:29	72,4	ONO	65,6	1,38	a b	0,80	5,7	0,2
		22.06.2017 13:30 - 16:59	53,9	NO	32,6	1,29	a	0,51	2,8	0,3
2017 Brunnstube										
Freilassung 4. - 6.07.	1	04.07.2017 16:00 - 16:59	35,7	NO	31,1	1,25	a	0,54	2,6	0,1
		05.07.2017 12:25 - 14:14	56,3	ONO	27,8	1,87	d e	0,69	4,3	0,6
		05.07.2017 14:15 - 16:59	53,7	NO	42,0	1,38	a b	0,55	3,5	0,1
		06.07.2017 07:45 - 10:59	74,5	ONO	30,7	1,64	c d	0,59	3,5	0,3
		06.07.2017 11:00 - 13:59	59,9	ONO	37,7	1,96	e	0,81	4,9	0,3
		06.07.2017 14:00 - 14:59	72,9	ONO	34,1	1,71	c d	0,62	3,0	0,5
		06.07.2017 15:00 - 16:59	49,9	NO	34,4	1,52	b c	0,55	3,0	0,4
2017 Hundsau										
Freilassung 8.-9.06.	1	08.06.2017 11:10 - 18:20	245,4	WSW	41,1	1,90	a	0,43	2,7	0,9
		09.06.2017 07:30 - 14:10	280,7	W	87,5	1,79	a	0,71	3,0	0,5
		09.06.2017 14:20 - 19:50	variabel			1,71	a	0,59	3,3	0,9
2017 Hundsau										
Freilassung 19.-20.07	1	19.07.2017 10:30 - 14:20	232,3	SW	36,8	1,39	a	0,31	2,1	0,9
		19.07.2017 14:30 - 19:50	61,4	ONO	44,6	1,36	a	0,60	2,5	0,6
		20.07.2017 14:30 - 16:50	variabel			1,07	a	0,48	2,1	0,6
2017 Hundsau										
Freilassung 1.-2.08	1	01.08.2017 10:30 - 14:50	332,2	NNW	76,9	1,77	b	0,54	2,9	0,9
		01.08.2017 15:00 - 19:50	11,7	NNO	49,0	1,39	a	0,40	2,5	0,8
		02.08.2017 13:30 - 19:50	variabel			1,36	a	0,55	2,4	0,5

Die Zusammenhänge zwischen Windgeschwindigkeit und den Fallenfängen zeigten, dass ab einer mittleren Windgeschwindigkeit $>2\text{m/s}$ (Mittelwert für die Zeit von 7h00-20h00) nur mehr geringe Gesamtfänge und wenige Wiederfänge markierter Käfer auftraten (Abb. 31). Ab einem Minimum der Windgeschwindigkeit über 1 m/s traten keine Wiederfänge markierter Buchdrucker auf.

Der limitierende Einfluss von hohen Windgeschwindigkeiten auf die Fallenfänge zeigte sich auch für die Tagesfreilassung im Untersuchungsgebiet Rinn. Hier konnten nur wenige freigelassene Buchdrucker ausschließlich im Leebereich des Hügels (Falle 5) wiedergefangen werden (Tab. 8). Bei allen anderen Fallen und insbesondere an der Freilassungsstelle traten hohe Windgeschwindigkeiten auf. Die windberuhigte Situation im Bereich der Falle 5 ermöglichte offensichtlich die erfolgreiche Lokalisierung der Pheromonquelle und den Anflug der markierten Käfer an diese Falle (Abb. 32).

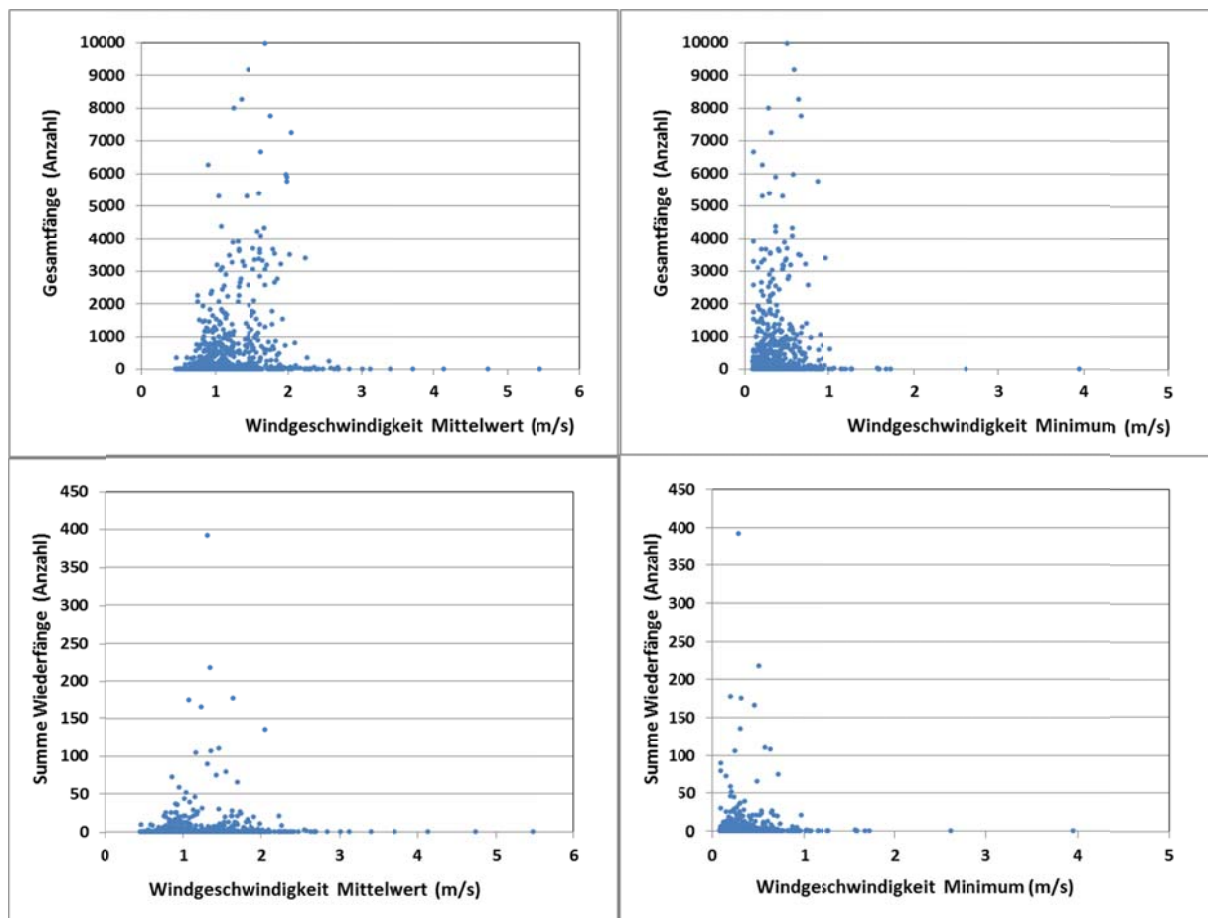


Abb. 31: Zusammenhänge zwischen täglichen Windgeschwindigkeiten (Mittelwert und Minimum von 7h00-20h00) und den Tagessummen der insgesamt gefangenen Buchdrucker und der Wiederfänge von markierten Käfern in den automatischen Fallen für alle Standorte und Jahre

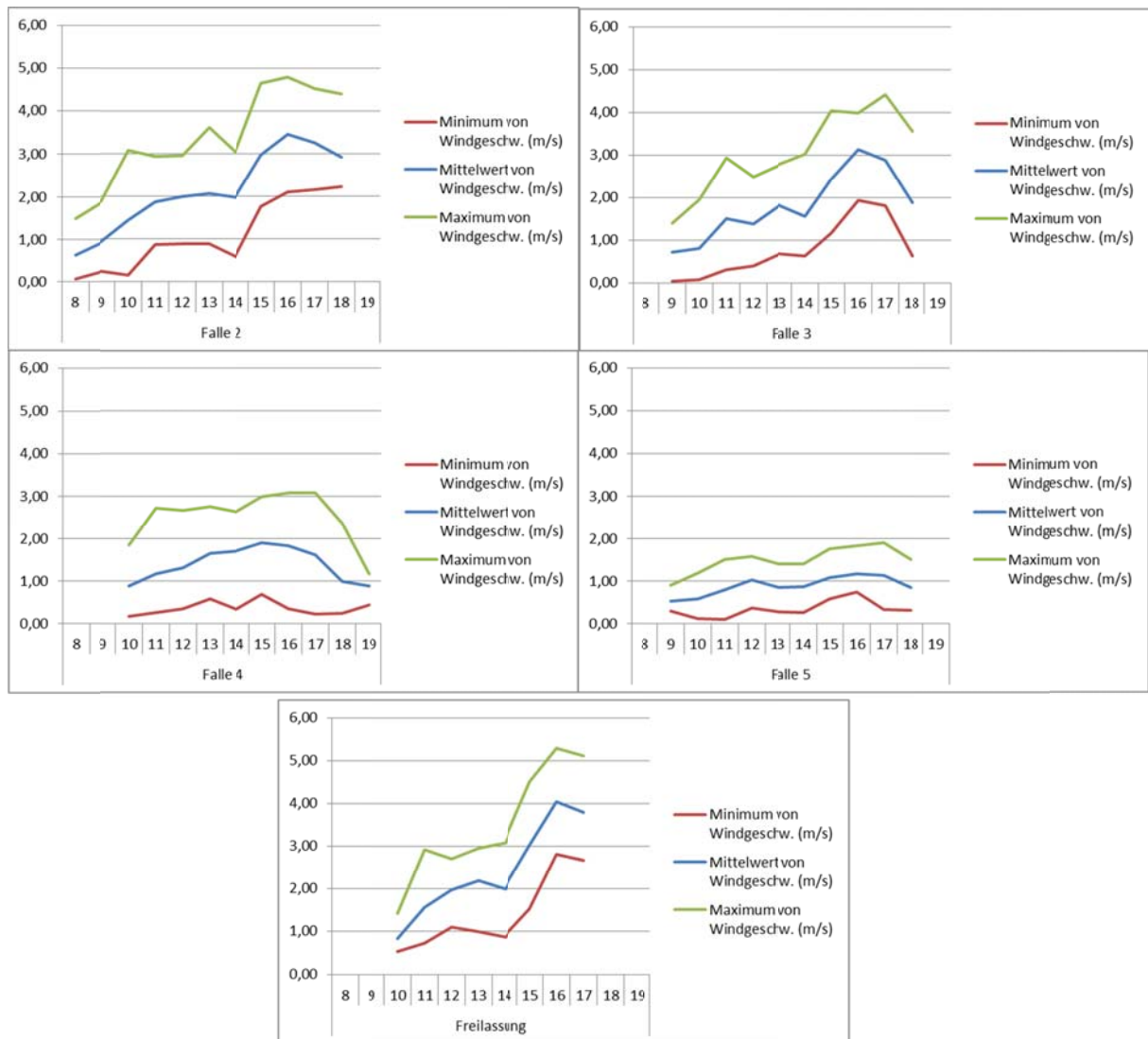


Abb. 32: Windgeschwindigkeiten (Stundenmittelwert, Minimum und Maximum) bei den Fallen und der Freilassungsstelle während der Tagesfreilassung in Rinn (20.7.2016)

In Hinblick auf die Ausbreitungsrichtung der markierten freigesetzten Buchdrucker zeigte sich eine hohe Variabilität sowohl zwischen den Standorten als auch zwischen der Art der Freisetzung (aus Stämmen schlüpfend oder frei von einer Plattform abfliegend) (Tab. 12; Tab. 13). Im Untersuchungsjahr 2016 zeigte sich für die Tagesmessungen als auch für die aus Stämmen ausschüpfenden Buchdrucker eine überwiegend variable Ausbreitungstendenz. Ausnahmen davon bildeten dabei die aus rosa markierten Stämmen ausschüpfenden Buchdrucker (Schwärmflug zur Bildung von Geschwisterbruten und 2. Generation) in Ebenforst und die gelb markierten Käfer (Parentalkäferflug nach Überwinterung) in Hundsau, die sich deutlich in Windrichtung ausbreiteten. In Hundsau führte dies im Frühjahr zu einem starken Anflug der gelb markierten Käfer an die nächstgelegenen Fallen nördlich bzw. an eine Falle östlich der Freilassungsstelle (vgl. Annex Abb. 46).

Im Jahr 2017 schwärmten die markierten Käfer aus den Brutstämmen an der Mehrzahl der untersuchten Standorte mit dem Wind. Nur in Brunnstube flogen die wiederausgebohrten, blau markierten Parentalkäfer überwiegend gegen den Wind zur nächstgelegenen Falle, während in

Hundsau 2017 die Ausbreitungsrichtung der blau markierten Buchdrucker der 2. Generation nicht eindeutig war (Tab. 12; Annex Abb. 47).

Bei den Tagesmessungen im Jahr 2017 ergab sich für den Standort Ebenforst eine überwiegend gegen den Wind gerichtete Ausbreitungstendenz der gelb markierten Buchdrucker. Insbesondere am 13.6. konnten bei vergleichsweise starken NW-Winden (Windgeschwindigkeit >2 m/s) während der Freilassung einige markierte Käfer in den nächstgelegenen Fallen (nordwestlich und südwestlich der Freilassung) abgefangen werden. Auch am 31.5.2017 und am 14.6.2017 trat bei dominierend N- bis NW-Wind die Mehrzahl der wiedergefangene Käfer in den nördlich bis südwestlich des Freilassungspunkts gelegenen Fallen auf (Tab. 12; Annex Abb. 49 und Abb. 50).

Im Untersuchungsgebiet Brunnstube zeigte sich trotz der vergleichsweise konstanten Bedingungen bzgl. der Windrichtung (dominierend talaufwärts gerichteter Wind aus ONO bei der Freilassungsstelle) eine weitgehend variable Verbreitung der markierten Buchdrucker (Tab. 12). Nur am 20.6.2017 und am 6.7.2017 ergab sich eine signifikante mittlere Ausbreitungsrichtung nach SSO durch höhere Wiederfänge in den südwestlich bis südöstlich der Freilassungsstelle gelegenen Fallen (Annex Abb. 50). Die räumliche Verteilung der Wiederfänge wurde aber sowohl 2016 als auch 2017 von den beiden nächstgelegenen automatischen Fallen im Südwesten bzw. Nordosten von der Freilassungsstelle dominiert, sodass sich für das Untersuchungsgebiet Brunnstube eine variable, indifferent Ausbreitung der markierten Käfer ergab.

Eine ebenso überwiegend indifferente Beziehung zwischen der Windströmung und der Verteilung der Fallenfänge ergab sich für die Tagesfreilassungen in Hundsau 2017 (Annex Abb. 49). Die sehr heterogenen Windbedingungen bei der Freilassungsstelle zeigten keine deutlichen Beziehungen zu den überwiegend nördlich der Freilassung (hangaufwärts) registrierten Wiederfängen.

Tab. 12: Windbedingungen beim Freilassungspunkt und mittlere Flugrichtung und Ausbreitung markierter Buchdrucker von unterschiedlich eingefärbten Brutstämmen

Sig.: Signifikanzniveau des Rayleigh Tests für die mittlere Flugrichtung; ns.: nicht signifikant; *: $p \leq 0,05$; **: $p \leq 0,01$; ***: $p \leq 0,001$; WR: mittlere Windrichtung; WG: mittlere Windgeschwindigkeit

Jahr	Standort	Markierung	WR	WG	Flugrichtung		Ausbreitungstendenz	
			Klasse	(m/s)	(°)	Sig.		
2016	Ebenforst	gelb/grün	NNO	1,52		ns	variabel	
		rosa	N	1,26	234,1	***	SW	mit dem Wind
		orange	N	1,11		ns	variabel	
	Brunnstube	gelb	NNO	1,88		ns	variabel	
		rosa	ONO	1,55		ns	variabel	
	Hundsau	gelb	WSW	1,38	46,3	***	NO	mit dem Wind
rosa		WSW	1,04		ns	variabel		
2017	Ebenforst	rosa orange	NNW	1,41	115,2	*	OSO	mit dem Wind
		blau	NNW	1,41	170,4	*	S	mit dem Wind
	Brunnstube	blau	ONO	1,67	102,1	**	OSO	gegen den Wind
		orange	SW	1,88	357,1	***	N	mit dem Wind
	Hundsau	blau GB	SW	1,73	15,4	***	NNO	mit dem Wind
		blau F2	SW	1,37		ns	variabel	

Tab. 13: Windbedingungen beim Freilassungspunkt und mittlere Flugrichtung und Ausbreitung markierter Buchdrucker für die Tagesfreilassungen

Sig.: Signifikanzniveau des Rayleigh Tests für die mittlere Flugrichtung; ns.: nicht signifikant; *: $p \leq 0,05$; **: $p \leq 0,01$; ***: $p \leq 0,001$; WR: mittlere Windrichtung; WR variabel: Rayleigh Test $p > 0,05$; WG: mittlere Windgeschwindigkeit

Tagesfreilassungen			WR	WG	Flugrichtung		Ausbreitungstendenz	
Jahr	Standort	Datum	Klasse	(m/s)	(°)	Sig.		
2016	Ebenforst	29.07.2016	NW	1,15		ns	variabel	
	Brunnstube	04.08.2016	SW	1,40		ns	variabel	
	Hundsau	03.08.2016	W	1,12		ns	variabel	
2017	Ebenforst	31.05.2017	NW	1,26	295,0	***	WNW	gegen den Wind
		01.06.2017	NNW	0,87		ns	variabel	
		13.06.2017	NW	2,32	261,6	**	W	gegen den Wind
	Brunnstube	14.06.2017	N	1,42	329,2	*	NNW	gegen den Wind
		20.06.2017	ONO	1,57	156,5	***	SSO	indifferent, quer zum Wind
		21.06.2017	ONO	1,82		ns	variabel	
		22.06.2017	ONO	1,39		ns	variabel	
		05.07.2017	NO	1,56		ns	variabel	
	Hundsau	06.07.2017	ONO	1,67	163,4	***	SSO	indifferent, quer zum Wind
		8.-9.06.2017	W	1,85	36,2	***	NO	mit dem Wind
		19.07.2017	variabel	1,37	6,1	**	N	
20.07.2017		variabel	1,07	319,0	***	NW		
	01.08.2017	NNW	1,77		ns	variabel		
	01.08.2017 *)	NNO	1,39	288,0	***	WNW	indifferent, quer zum Wind	
	02.08.2017	variabel	1,36	13,0	***	NNO		

*) Freilassung 1.8.2017 nachmittags; orange markierte Buchdrucker

3.3 Flugmühlenexperimente und Flugkapazität des Buchdruckers

Anhand einer Flugmühle wurde die Flugkapazität von insgesamt 80 Käfern untersucht. Flugwillige Käfer waren in der Lage, selbstständig (ohne Starthilfe) die Flugmühle in Gang zu setzen. Durch schnelle Drehung der am Rotationsarm fixierten Versuchstiere um die eigene Achse konnten in der Regel auch vorerst inaktive Tiere zu Flügen animiert werden. Die untersuchten Tiere zeigten eine enorme Spannweite hinsichtlich ihres Flugvermögens. Einerseits vollführten einige Individuen nur einzelne, wenige Sekunden andauernde Flugversuche. Andererseits dauerte der längste durchgehende Flug 215 Minuten.

Insgesamt konnten 80% der untersuchten Tiere dauerhafte Flugversuche durchführen (Tab. 14). Käfer, die nur sehr kurze Flugaktivitäten zeigten, wurden als flugunfähig eingestuft. Für die weiteren Auswertungen wurden nur jene Individuen ausgewählt die zumindest eine Flugphase von mehr als 100 Rotationen absolvierten oder eine Flugdauer von mehr als einer Minute aufwiesen (70%; Tab. 14). Von den insgesamt 943 beobachteten Flugversuchen waren 30.3 % von sehr kurzer Dauer (Tab. 15). Sowohl die Flugfähigkeit als auch die Anzahl dauerhafter Flugversuche unterschieden sich nicht signifikant zwischen den Geschlechtern ((Flugfähigkeit: $\chi^2= 0,46$, n.s.; dauerhafte Flüge: $\chi^2= 0,093$, n.s). Für die Fluggeschwindigkeit (T-Test: $t= -0,858$, n.s), die Flugdauer, die Flugdistanz und die Dauer der nonstop-Flüge (Mann-Whitney U-Test, alle n.s.) ergaben sich keine signifikanten Unterschiede zwischen Männchen und Weibchen.

Tab. 14: Anzahl der flugfähigen Buchdrucker und Anzahl der Flüge mit einer Dauer von mehr als 60 Sekunden bzw. mit mehr als 100 Rotationen, getrennt nach Männchen und Weibchen

Anzahl				
	Männchen	Weibchen	Gesamt	rel. Anteil (%)
flugunfähig	8	8	16	20,00
flugfähig	26	38	64	80,00
Gesamt	34	46	80	

Anzahl Flüge				
	Männchen	Weibchen	Gesamt	rel. Anteil (%)
Dauer < 60 Sek. oder Rotationen < 100	121	165	286	30,33
Dauer >= 60 Sek. oder Rotationen >=100	285	372	657	69,67
Gesamt	406	537	943	

Die durchschnittliche Fluggeschwindigkeit selektierter Einzelflüge mit einer Dauer von mehr als 60 Sekunden oder mehr als 100 Rotationen betrug $0,96 \pm 0,23$ m/s und lag damit deutlich niedriger als die bisher angenommene Geschwindigkeit von 2 m/s (Byers, 1989). Die niedrigste gemessene Geschwindigkeit betrug 0,15 m/s, das Maximum 1,58 m/s (Tab. 15). Die Fluggeschwindigkeit variierte erheblich zwischen den einzelnen Individuen und im Verlauf der Flugaktivität. Mitunter konnte bei einzelnen Individuen während eines Flugs und über die gesamte Dauer der Flugaktivität ein

mehrmaliger Wechsel der Fluggeschwindigkeit beobachtet werden. Generell blieb aber bei den meisten Versuchstieren die individuelle Geschwindigkeit über die gesamte Dauer der Flugaktivität auf konstantem Niveau (Abb. 34).

Tab. 15: Fluggeschwindigkeit, Flugdauer und Distanz sowie Dauer von non-stop Flügen

	n	Mittelwert	Stabw.	Minimum	Maximum	Median
Einzelflüge *)						
Dauer Flugaktivität (min)	277	12,3	20,6	1,0	215,0	6,0
Flugdistanz (m)	277	647,7	992,0	17,6	9029,1	304,1
Fluggeschwindigkeit (m/s)	657	0,96	0,23	0,15	1,58	0,95
nonstop Flüge **)						
Dauer (min)	258	15,4	21,5	2,0	215,0	9,0
Gesamt ***)						
Anzahl Flugversuche	64	8,2	7,0	1	42	7
Dauer der Flugaktivität (min)	64	65,3	83,2	1,8	348,4	30,6
Flugstrecke (Meter)	64	3526,8	4592,6	85,9	20347,2	1503,9

*) selektierte Einzelflüge mit Dauer ≥ 60 Sek. oder mehr als 100 Rotationen (Anzahl = 277) und wiederholter Messung der Geschwindigkeit (n=657)

**) Flüge mit einer Dauer von mehr als 2 Minuten

***) Gesamtsummen für flugfähige Käfer (Tiere mit mehrmaligen Flugversuchen oder Einzelflügen mit Dauer ≥ 60 Sek. oder mehr als 100 Rotationen; n=64)

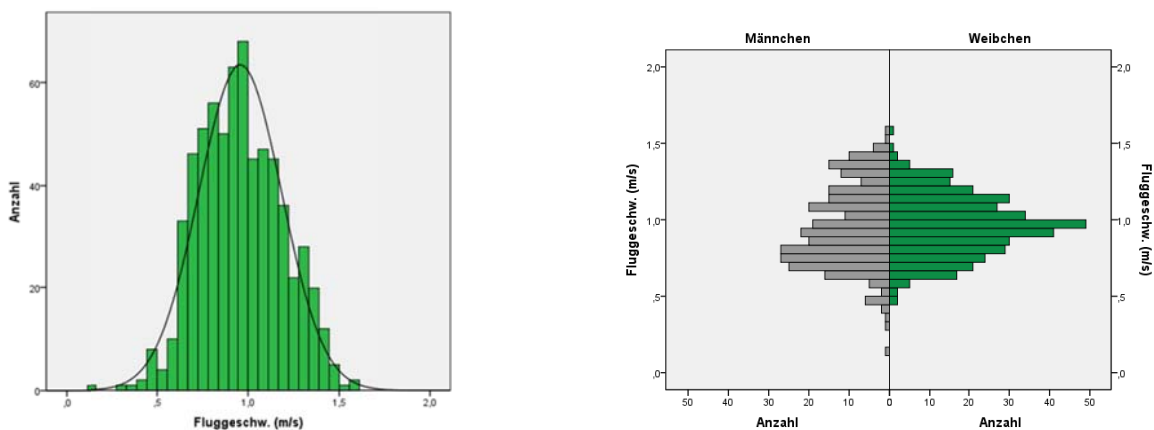


Abb. 33: Häufigkeitsverteilung der Fluggeschwindigkeit für die Gesamtanzahl der in Flugexperimenten untersuchten Buchdrucker und getrennt nach Geschlecht

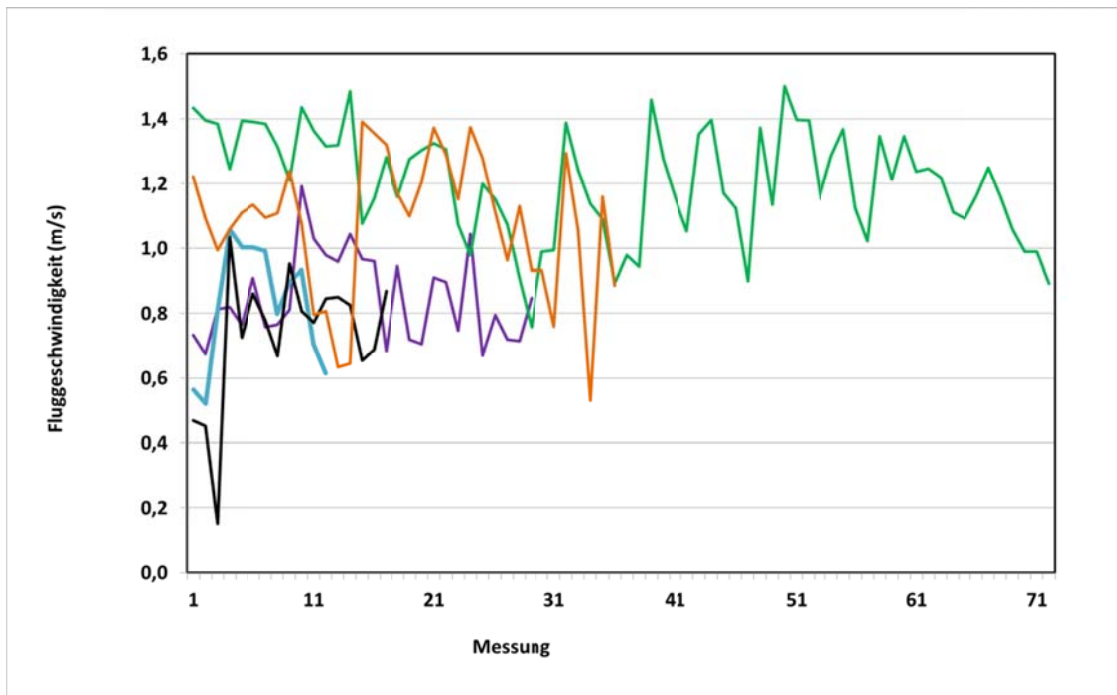


Abb. 34: Individuelle Verläufe der Fluggeschwindigkeit von fünf ausgewählten Käfern mit unterschiedlicher Dauer der Flugaktivität

Generell absolvierten die untersuchten Buchdrucker meist mehrere Flugversuche von unterschiedlicher Dauer (Tab. 15). Einzelne Käfer unternahmen auch noch mehrere Tage (2 – 4 Tage) nach Beginn des Versuchs erfolgreiche Flugversuche. Im Gegensatz zur Fluggeschwindigkeit ergaben sich für die Anzahl der Flugversuche, Flugdauer und Flugdistanz eine linksschiefe Verteilungen (Abb. 35). Nur 10% der getesteten Buchdrucker konnten extrem weite Flugstrecken (über 10 km) erreichen (maximale beobachtete Flugdistanz: 20,4 km) und lediglich 22% der untersuchten Käfer bewältigte Distanzen von mehr als 5 km. Der Median der absolvierten Gesamtflugdistanz der getesteten Käfer betrug 1,5 km. Etwa ein Drittel der untersuchten Buchdrucker erzielten eine geringere Flugdistanz als 500 m.

Die Verteilung der Gesamtflugdauer, der Anzahl der unternommenen Flüge und der Dauer von non-stop Flügen und Einzelflügen zeigten, dass die Buchdrucker bei den Flugmühlenexperimenten überwiegend wenige einzelne Flüge (Median: 7 Flüge) von relativ kurzer Dauer (Median: Einzelflugdauer: 6 Min., Gesamtflugdauer: 30,6 Min.) absolvierten.

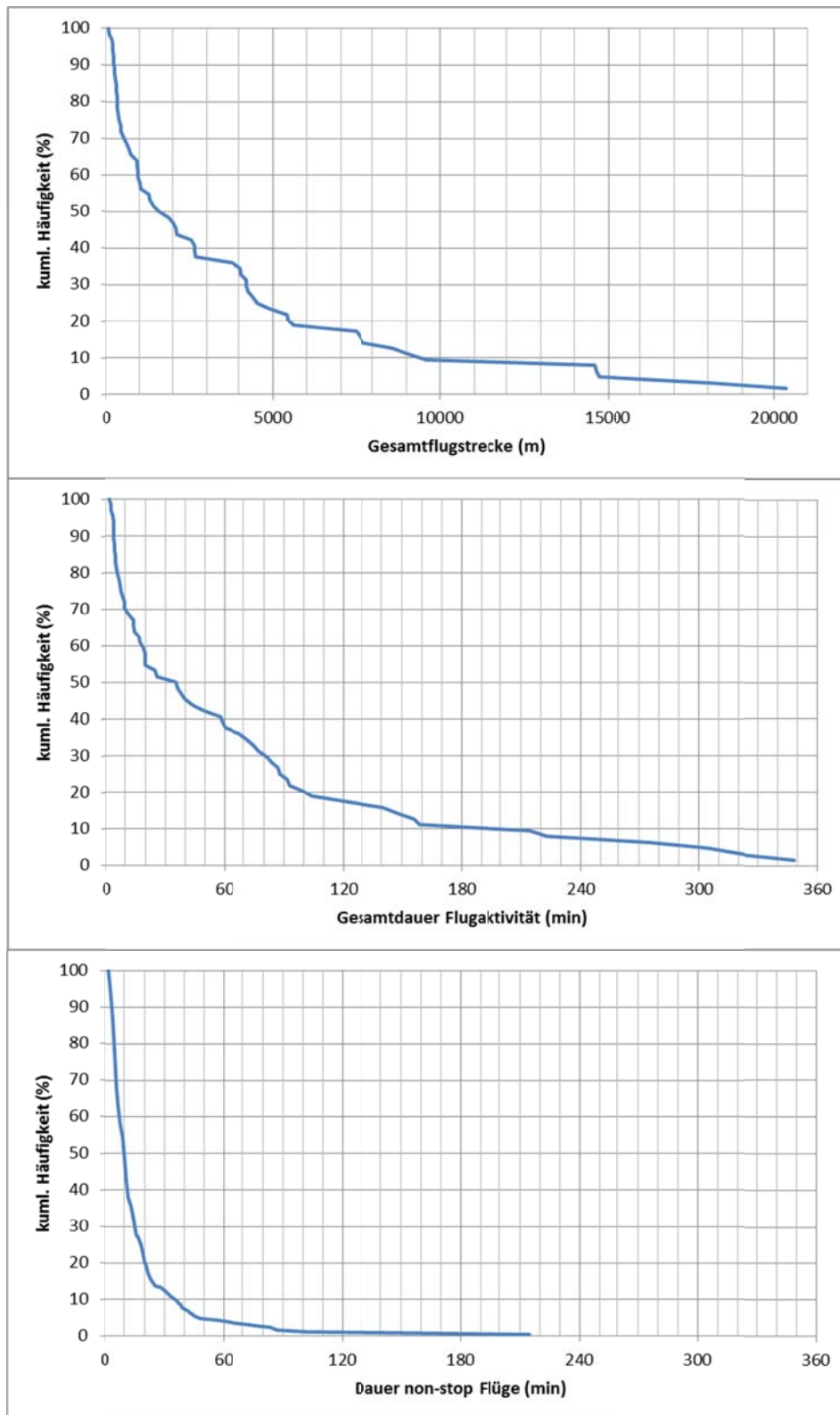


Abb. 35: Kumulative relative Häufigkeitsverteilung von Gesamtflugstrecke, Gesamtdauer der Flugaktivität und Dauer von non-stop Flügen

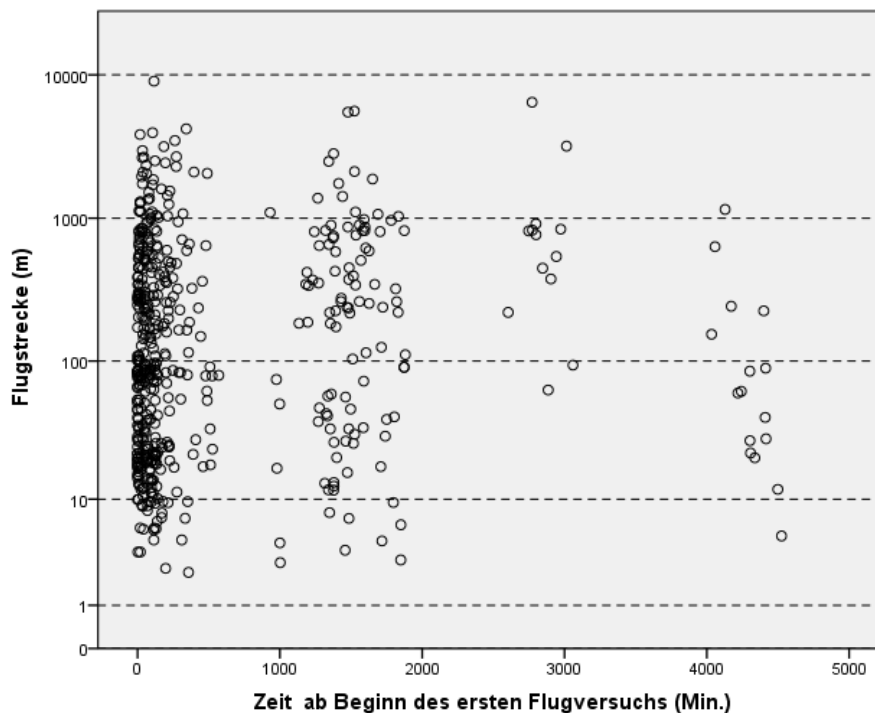


Abb. 36: Flugdistanzen einzelner Flüge (logarithmische Skala) in Abhängigkeit von der Zeit ab Beginn des ersten Flugs

3.4 Simulation der Ausbreitung des Buchdruckers

Das entwickelte Borkenkäferausbreitungsmodell (BBDS) ermöglicht Darstellung jeweiligen zeitlich-räumlichen Windströmungssituationen in den Untersuchungsgebieten in Abhängigkeit von der Waldverteilung und der topographischen Gegebenheiten. Dies stellt somit die Grundlage für die Abschätzung der Ausbreitung der Käfer in einem zeitlich-räumlich dynamischen drei-dimensionalen Windfeld dar (Abb. 37). Grundlegende Eingangsdaten dafür sind die jeweiligen Messdaten der Windmessstationen bei den automatischen Fallen und der Freilassungsstelle sowie die räumliche Verteilung der Waldbestände.

Basierend auf diesen Windfelddaten kann die, von multiplen Quellen (Dispensern der einzelnen Fallen) ausgehende Diffusion der Pheromone errechnet und visualisiert werden. Durch die Parametrisierung eines Schwellenwerts für die Pheromonkonzentration, ab dem schwärmende Käfer auf das Pheromon reagieren, kann somit auch der aktive Bereich einer Pheromonfahne visualisiert werden, der zur Anlockung der Käfer führt.

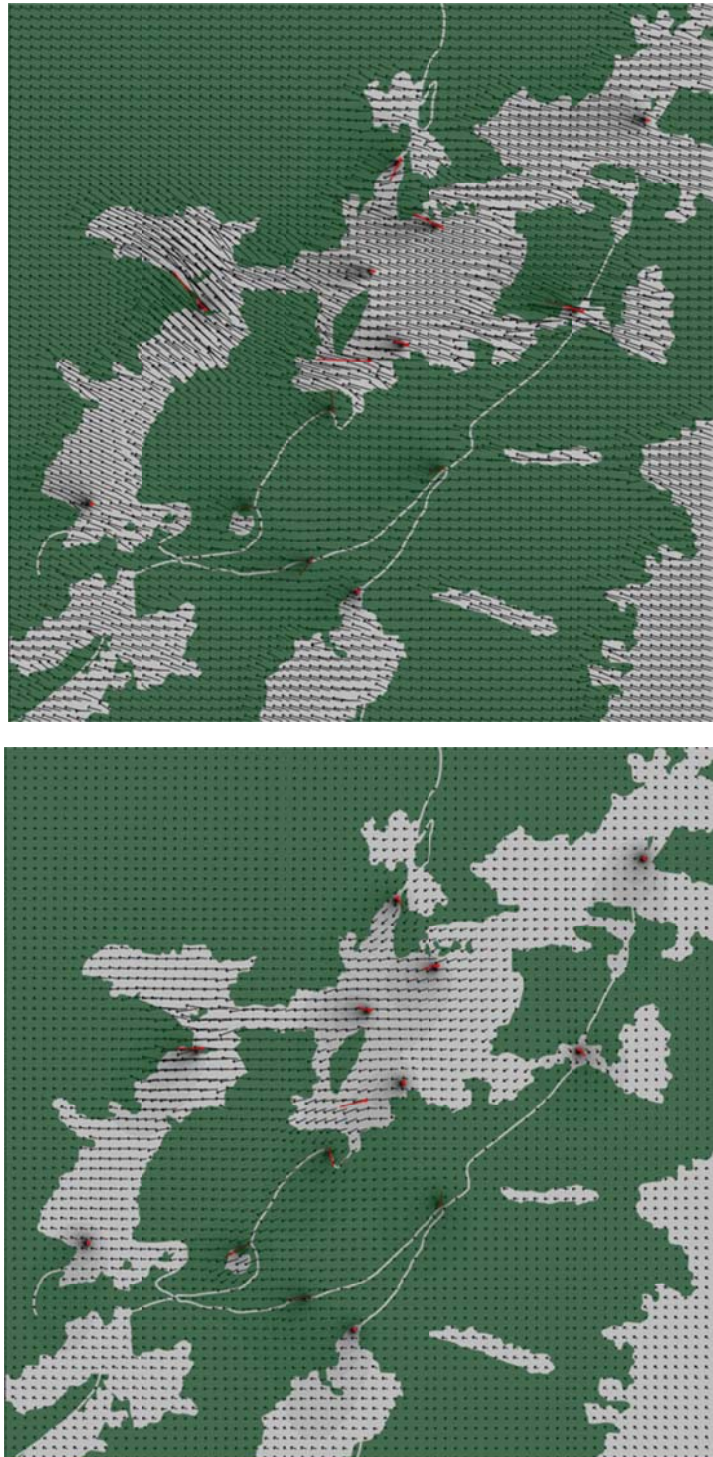


Abb. 37: Beispielhafte Darstellung der Windmessdaten, des modellierten Windfeldes (Richtung und Geschwindigkeit in 2m Höhe) und der Pheromonausbreitung für den Standort Brunnstube (22.06.2017 10h42 (oben) bzw. 11h00 (unten))

- rote Punkte: Messstationen am Freilassungspunkt und den Fallenautomaten
- rote Pfeile: beobachtete Windrichtung und Windgeschwindigkeit bei den Messstationen
- rote Punkte ohne Pfeil: Theysohn-Schlitzfallen
- schwarze Pfeile: simulierte Windgeschwindigkeit und Richtung des Windfeldes in der jeweiligen Höhe über Grund
- grüne bzw. weiße Flächen: Waldflächen bzw. Freiflächen/Forststraße
- grau bis schwarze Flächen: Pheromonkonzentration

Die zeitlich-räumliche Ausdehnung der Pheromonwolke und die für die Anlockung und Orientierung der schwärmenden Buchdrucker relevante Momentankonzentration (zeitliche Auflösung: 1 Sekunde) zeigt einerseits eine starke Abhängigkeit von der Variabilität des Windfeldes (Windstärke und Strömungsrichtung). In Abb. 38 sind zwei unterschiedliche Strömungssituationen und die daraus resultierende Diffusion der emittierten Pheromone für die Standorte Brunnstube und Ebenforst dargestellt. Bei häufig wechselnder Windrichtung und gleichzeitig geringer Windgeschwindigkeit ergaben sich für Brunnstube (22.6.2017 11h03) eher konzentrisch um die Pheromonquellen sich ausbreitende Lockstoffwolken. Für Ebenforst zeigten die Simulationen bei hohen Windgeschwindigkeiten und überwiegend gerichteter NW-Strömung am 13.6.2017 sehr langgestreckte, teils stark fragmentierte Duftfahnen, die sehr geringe Wiederfänge und verringerte Fangzahlen von Käfern insbesondere bei den exponierten Fallen im Bereich der Freifläche bewirkten (vgl. Annex Abb. 44).

Andererseits wird die Ausdehnung und Konzentration der Duftwolke und damit auch der wirksame Bereich der Pheromonwolke, der zu einer gerichteten Anlockwirkung der Käfer führen kann, von der jeweiligen temperatur- und füllstandsabhängigen Emissionsrate des einzelnen Pheromondispensers bestimmt. Fallweise kann es dabei auch zu Überlagerungen mehrerer Duftwolken kommen. Die parametrisierbare Wirkungsdauer des Pheromons (Zeitspanne, wie lange ein emittierter Puff Einfluss auf die Simulation haben kann) ergibt deutliche Unterschiede in der Ausdehnung der Duftwolken (Abb. 39Abb. 39: Simulation der Pheromonausbreitung und der momentanen Konzentration bei unterschiedlicher Wirkungsdauer des Pheromons für Brunnstube (22.06.2017 11h30; von links nach rechts: Wirkungsdauer: 10 min., 5 min. bzw. 2,5 min.)). Das Meandern der Pheromonwolke wird zudem wesentlich durch die verfügbaren Strömungsdaten und deren zeitliche Auflösung (1 Minute- oder 10 Minuten-Mittelwerte) bestimmt.

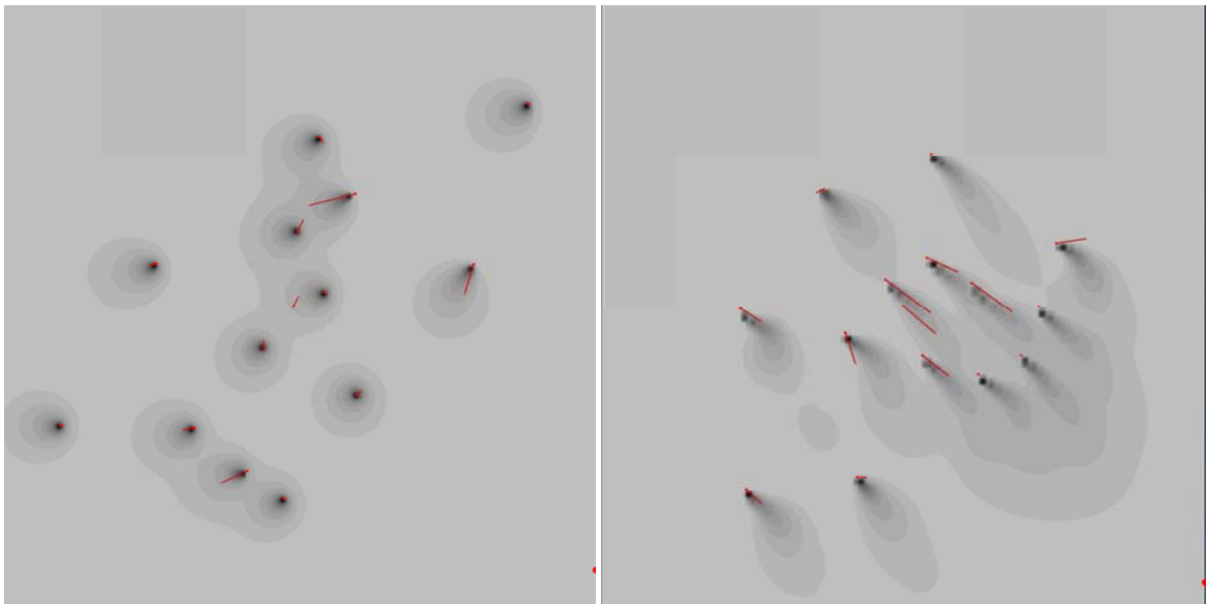


Abb. 38: Simulationen der Pheromonausbreitung bei vergleichsweise geringen (links: Brunnstube 22.6.2017 11h03) und hohen Windgeschwindigkeiten (rechts: Ebenforst 13.6.2017 15h35)

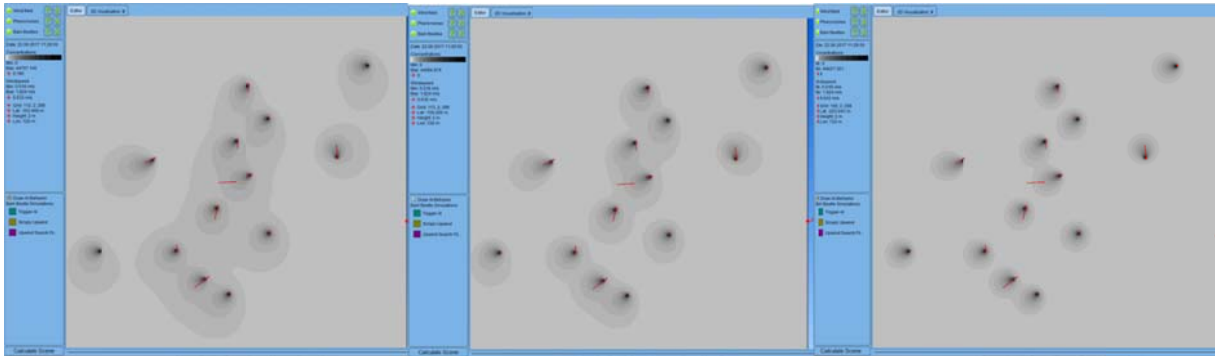


Abb. 39: Simulation der Pheromonausbreitung und der momentanen Konzentration bei unterschiedlicher Wirkungsdauer des Pheromons für Brunnstube (22.06.2017 11h30; von links nach rechts: Wirkungsdauer: 10 min., 5 min. bzw. 2,5 min.)

Die Simulationen der Ausbreitung punktuell freigesetzter Buchdrucker bei unterschiedlichem Flugverhalten und Reaktionsvarianten nach Pheromonkontakt ergaben für die jeweiligen Varianten sehr verschiedene Dispersionsmuster (Abb. 40 bis Abb. 43). Bei passivem Verhalten oder bei aktivem Flug mit dem Wind zeigten die Simulationen, dass die Käfer in vielen Fällen nach einer Stunde das betrachtete Gebiet zumeist verlassen hatten (Abb. 40). Simulationsvarianten mit einer Orientierung der Käfer entlang des Pheromongradienten führten hingegen zu einer eher unrealistischen Akkumulation der Käfer im aktiven Bereich der Pheromonwolke.

Eine bessere Übereinstimmung mit den beobachteten Wiederfängen markierter Käfer ergab sich für Varianten mit einer Flugorientierung der Käfer gegen den Wind bzw. für Varianten mit komplexen Suchstrategien und Verhaltensweisen. Insbesondere die variable räumliche Verteilung der Wiederfänge in Brunnstube und Hundsau konnten am besten durch eine Orientierung gegen den Wind bzw. durch komplexe, randomisierte Suchstrategien erklärt werden (Abb. 41).

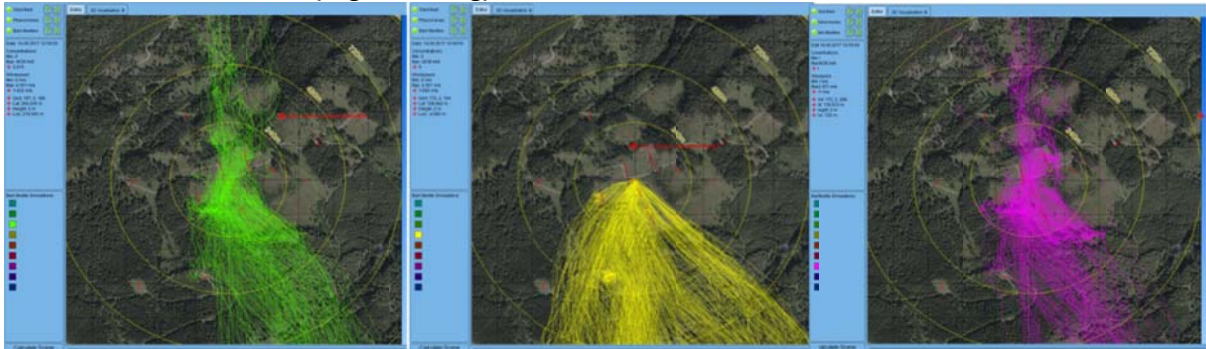
Die Simulationen mit unterschiedlichen Suchstrategien nach Bau und Cardé (2015) ergaben Großteils ähnliche Ausbreitungsverteilungen. In vielen Fällen zeigten diese Simulationen mit komplexen Flugverhalten ähnliche Verteilungen wie vereinfachte Simulationen der Ausbreitung von Buchdruckern mit unterschiedlicher Fluggeschwindigkeit (Spannweite der Eigengeschwindigkeit der virtuell freigesetzten Käfer von 0,4 m/s bis 1,5 m/s), die sich gegen den Wind orientieren.

Vielfach wurden bei Ausbreitungssimulationen von Käfern, die sich gegen den Wind orientierten, auffällige Akkumulationen in Übergangsbereichen von Wald- zu Freiflächen festgestellt (Abb. 43). Diese Verdichtungen entlang von Bestandesrändern traten stets dann auf, wenn bei zeitweilig gleichbleibenden Windgeschwindigkeiten gegen den Wind orientierte Käfer aufgrund ihrer zu geringen Eigengeschwindigkeit gegen die höheren Windgeschwindigkeiten auf Freiflächen nicht weiter voran kommen. Dieser durch die Konvergenz der Eigenbewegung der Käfer und der Windströmungen verursachte Effekt trat auch dann auf, wenn mit dem Wind verdriftete Käfer in Waldbereiche mit abgeschwächter Windgeschwindigkeit gelangten. Die durch die Konvergenz verursachte, zeitweilige Akkumulation entlang von Bestandesrändern weist auf besonders bevorzugte Flugbereiche des Buchdruckers hin.

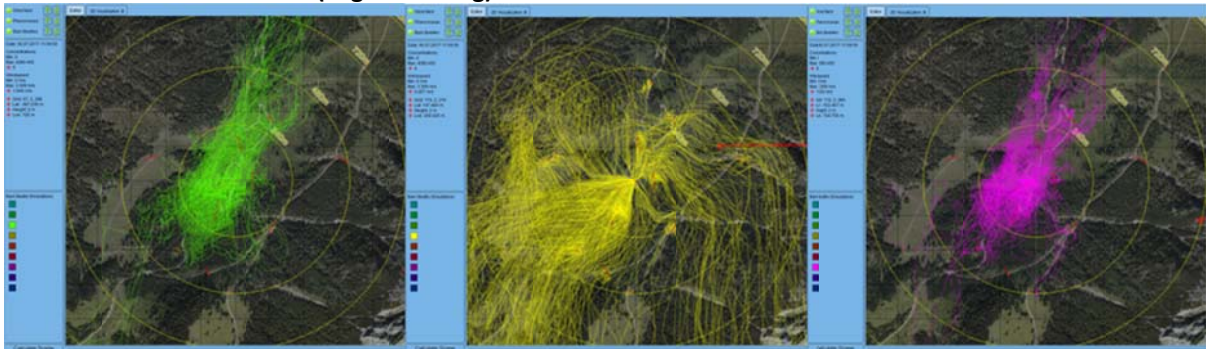
Die Anzahl und die Verteilung der Wiederfänge markierter Käfer bei den Tagesmessungen 2017 in Ebenforst zeigten, dass die Tiere bei hohen Windgeschwindigkeiten den Flug weitestgehend einstellen bzw. bei kurzzeitig nachlassender Windgeschwindigkeit gegen die Windrichtung zu den nächstgelegenen Fallen fliegen.

Die Simulation der Ausbreitung der freigelassenen Käfer in Rinn zeigte deutlich, dass aktiv mit dem Wind fliegende bzw. passiv mit der Strömung verdriften Käfer fallweise mit der Windströmung in den windberuhigten Bereich im Lee des Hügels bzw. in die Pheromonplume bei der Falle im Südwesten des Freilassungspunkt gelangten (Abb. 42).

Ebenforst 14.6.2017 12h00 (Tagesmessung)



Brunnstube 6.7.2017 11h00 (Tagesmessung)



Hundsau 26.5.2016 14h00 (Flug markierter Käfer aus Brutstämmen)

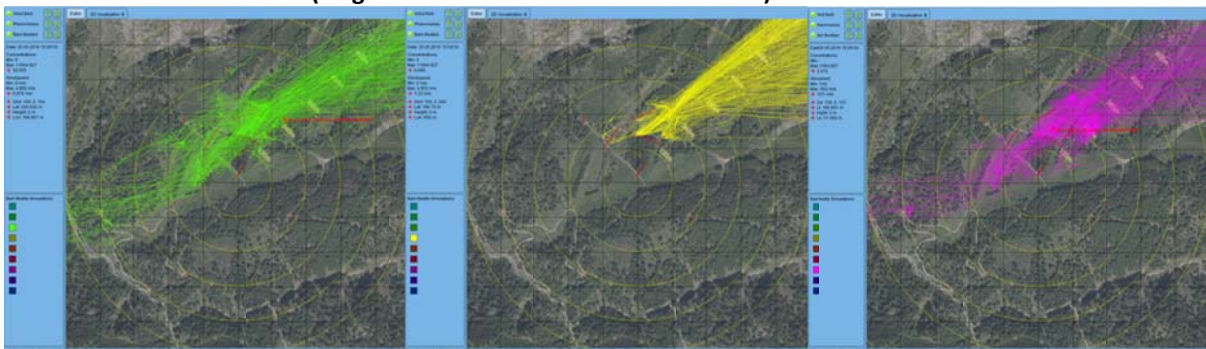


Abb. 40: Simulierte Ausbreitung freigesetzter Buchdrucker anhand unterschiedlicher Verhaltensvarianten für verschiedene Termine in den Untersuchungsgebieten Ebenforst, Brunnstube und Hundsau

Verhaltensvarianten: grün: Flug gegen den Wind; gelb: Flug mit dem Wind/ bei Pheromonkontakt Flug gegen den Pheromongradienten/nach Kontaktverlust Flug mit dem Wind; rosa: Flug gegen den Wind / bei Pheromonkontakt Flug gegen den Pheromongradienten / nach Kontaktverlust Flug gegen den Wind

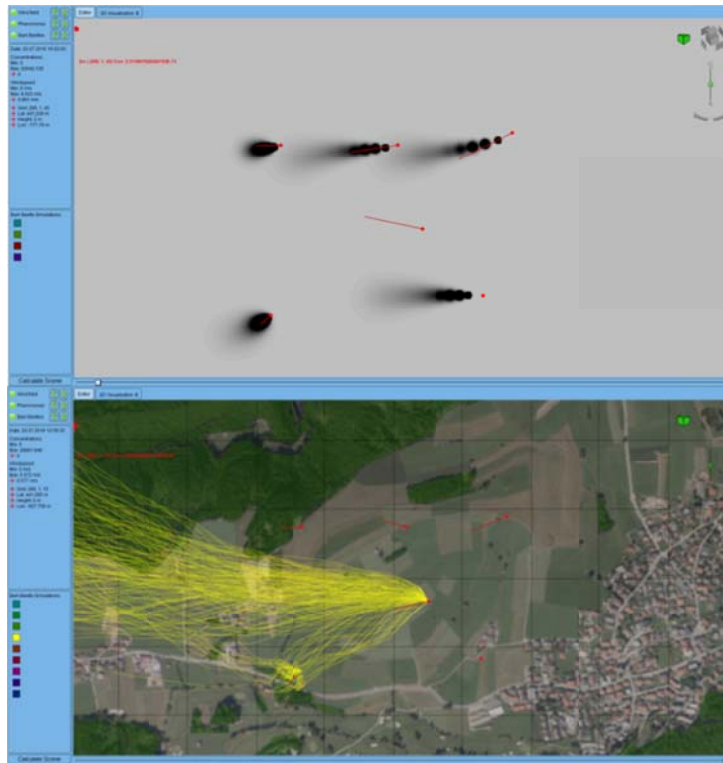


Abb. 42: Pheromonausbreitung und simulierte Dispersion freigesetzter Buchdrucker bei der Tagesfreilassung in Rinn 2016

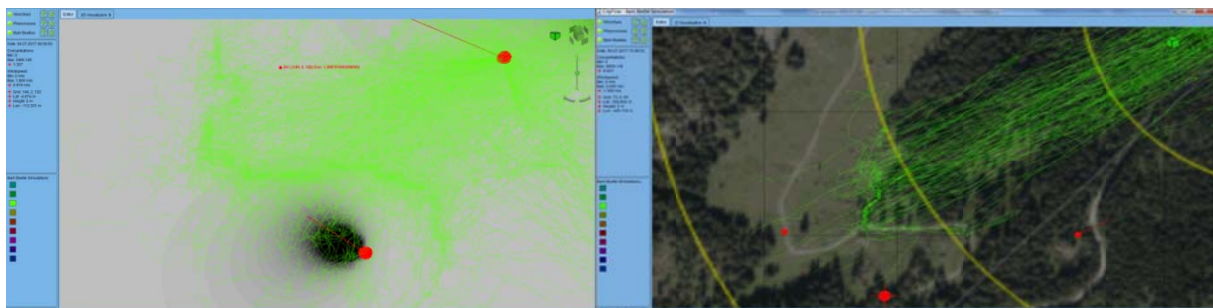


Abb. 43: Simulierte Verdichtung der Flugbahnen im Bereich des Waldrandes von gegen den Wind orientierten Buchdruckern

Links: Detailsicht eines Bereichs südwestlich der Freilassung Brunnstube mit deutlich erkennbarer Verdichtung der Flugtrajektorien entlang des Bestandesrandes

Rechts: Ausschnitt eines Bereichs im Untersuchungsgebiet Brunnstube („Kuhleitn“) südwestlich der Freilassungsstelle mit Verdichtung der simulierten Flugbahnen entlang des Bestandesrandes

4 Diskussion

Die Ergebnisse der Untersuchungen zur Dispersion des Buchdruckers mittels Freisetzung und Wiederfang von markierten Käfern zeigten für die verschiedenen Untersuchungsgebiete eine erhebliche Variabilität in Abhängigkeit von den jeweiligen topographischen Verhältnissen und klimatischen Bedingungen.

Ebenfalls unterschied sich die Anzahl selbstmarkierter Käfer, die von den Brutstämmen freigesetzt wurden, saisonal deutlich. Die meisten Käfer schlüpfen aus den gefärbten Stämmen jeweils im Frühjahr nach der Überwinterung. In Abhängigkeit von der Brutdichte und der standortspezifischen, temperaturabhängigen Generationsentwicklung war die Freisetzung von markierten Tieren von Brutstämmen, die im Laufe des Sommers vorgelegt wurden, entsprechend geringer. Markierte Käfer der 2. Generation wurden nur an den thermisch günstigeren Standorten Ebenforst (2016) und Hundsau (2016 und 2017) freigesetzt. Beim hochgelegenen Standort Brunnstube im Nationalpark Gesäuse konnte sich aufgrund der Temperaturbedingungen keine 2. Generation im Laufe des Sommers entwickeln. Besonders hoch waren die berechneten Wiederfangraten für den zweiten Flug der Parentalkäfer zur Anlage der Geschwisterbrut im Jahr 2017 in Hundsau und Ebenforst. Vergleichsweise gering dagegen waren die Wiederfänge der Sommergenerationen (zweite Geschwisterbrut bzw. zweite Tochtergeneration) in Hundsau und Ebenforst.

Die Flugbereitschaft der markierten Käfer bei den Tagesfreilassungen waren in der Regel sehr hoch (>80%). Nur bei der Tagesfreilassung in Hundsau im Juni 2017 flogen nur wenige markierte Käfer vom Freilassungspunkt ab, wobei dies wahrscheinlich auf die schwache Fitness der in diesem Fall verwendeten Käfer zurückzuführen war. Besonders hohe Abflugeraten ergaben sich für die in Pheromonfallen abgefangenen und innerhalb weniger Stunden markierten und wiederfreigelassenen Buchdrucker.

Die Wiederfangraten der bei Tagesfreilassungen freigesetzten Versuchstiere variierte stark zwischen den Untersuchungsgebieten und den einzelnen Terminen der Tagesfreilassungen. Am geringsten war die Gesamtwiederfangrate für den Hochlagenstandort Brunnstube. Die Wiederfänge bei den Tagesfreilassungen waren jeweils stark beeinflusst von den Witterungsbedingungen am Tag der Freilassung. In der Regel wurde zwar die Mehrzahl der Wiederfänge noch am Tag der Freilassung registriert. Bei eher ungünstigen Witterungsbedingungen oder verspätet durchgeführter Freilassung traten Wiederfänge auch noch an den Folgetagen auf.

Hinsichtlich der Witterungsbedingungen für den Flug des Buchdruckers konnten die bereits bekannten Schwellenwerte weitestgehend bestätigt werden (Botterweg, 1982; Lobinger, 1994; Lobinger und Skatulla, 1996; Hurling, 2002). Die Fangzahlen nichtmarkierter Buchdrucker und die Wiederfänge nahmen ab einer Temperatur von mehr als 16,5°C und einer Tagessumme der Globalstrahlung von mehr als 1800 Wh/m² deutlich zu. Zusätzlich limitiert waren die Fallenfänge bei hoher Luftfeuchte und hohen Windgeschwindigkeiten. Betrug die minimalen Windgeschwindigkeiten untermtags mehr als 1 m/s traten nur noch geringe Fallenfänge bzw. keine Wiederfänge markierter Käfer auf. Bei mittleren Windgeschwindigkeiten am Tag von mehr als 2 m/s nahmen die Fallenfänge erheblich ab. Auch Niederschläge hatten einen negativen Einfluss auf die Anzahl der gefangenen Käfer: hohe Fangzahlen traten nur an weitgehend niederschlagsfreien Tagen auf. Die Intensität der Niederschläge hatte insgesamt jedoch nur geringen Einfluss auf die Fangzahlen. Zeitpunkt und Dauer des Niederschlags und die meist mit Niederschlagsperioden einhergehende Abkühlung waren ausschlaggebend.

Für alle Untersuchungsgebiete zeigte sich, dass die Anzahl der Fänge von markierten Käfern exponentiell mit der Entfernung der Fallen von der Freilassungsstelle abnahm. Bei Distanzen von mehr als 500 m wurden nur mehr vereinzelt markierte Käfer gefangen. Mit Ausnahme der Untersuchungsstandorte Ebenforst und Brunnstube im Jahr 2016 konnten deutlich mehr als 75% der Variabilität der Wiederfänge durch die Entfernung zwischen Freilassungs- und Wiederfangpunkt

erklärt werden (vgl. Abb. 16; Abb. 17). Dies ist in Übereinstimmung mit früheren Untersuchungen zur Ausbreitung des Buchdruckers im Bereich des Nationalparks Gesäuse (Grünwald, 2014) und des Wildnisgebiets Dürrenstein (Schopf *et al.*, 2012; Oberhollenzer, 2015). Eine exponentielle Abnahme der Wiederfänge mit zunehmender Entfernung zeigten auch Studien zur Ausbreitung des Buchdruckers von einem Holzlager (Putz, 2014) sowie ähnliche Untersuchungen und Experimente zur Migration des Buchdruckers und anderer Borkenkäferarten (Weslien und Lindelöw, 1990; Safranyik *et al.*, 1992; Zurr, 1992; Turchin und Thoeny, 1993; Zolubas und Byers, 1995; Duelli *et al.*, 1997; Franklin *et al.*, 2000; Dolezal *et al.*, 2016). Diese enge Beziehung zwischen Distanz und Wiederfangrate wird auch durch indirekte Untersuchungen zur Ausbreitung des Buchdruckers anhand der zeitlich-räumlichen Analyse von Befallsflächen gestützt (Ravn, 1985; Kautz *et al.*, 2011).

Ein wesentlicher Grund für diese rasche Abnahme der Wiederfänge mit zunehmender Distanz zwischen Freilassungspunkt und Fallen dürfte darin gelegen sein, dass nur ein geringer Anteil einer Buchdruckerpopulation über längere Zeit flugaktiv ist. Die Ergebnisse der Flugmühlenexperimente zeigten, dass zwar ein Großteil der untersuchten Tiere ausgedehnte Flüge vollführen konnten, aber nur wenige Individuen (<10%) in der Lage waren extrem lange Flugdistanzen von mehr als 10 km zurückzulegen. Die Mehrzahl der untersuchten Buchdrucker absolvierten nur wenige einzelne Flüge von relativ kurzer Dauer. Etwa 20 % der untersuchten Tiere absolvierten keine oder nur extrem kurze Flüge und wurden daher als flugunfähig eingestuft. Ähnliche Ergebnisse hinsichtlich der individuellen Variabilität der Flugdistanzen und der Flugdauer zeigten auch die Flugmühlenexperimente für den Buchdrucker von Forsse und Solbreck (1985) und für *Ips sexdentatus* (Jactel, 1991).

Zudem ergab sich anhand der Flugmühlenexperimente, dass die Fluggeschwindigkeit des Buchdruckers deutlich niedriger als 2 m/s sein dürfte, wie bisher angenommen (Byers, 1989, 2000). Die Experimente ergaben eine durchschnittliche Eigengeschwindigkeit von 0,96 m/s (Spannweite: 0,15 – 1,58 m/s). Eine ähnliche mittlere Fluggeschwindigkeit wurde auch für *Ips sexdentatus* (1,3 m/s) festgestellt (Jactel, 1991). Erheblich niedrigere Fluggeschwindigkeiten werden für *Dendroctonus ponderosae* angegeben (0,43 – 0,54 m/s) (Evenden *et al.*, 2014). Die geringe Fluggeschwindigkeit des Buchdruckers erklärt auch die geringen Fallenfänge bei minimalen Windgeschwindigkeiten von mehr als 1 m/s und entspricht den Beobachtungen von Botterweg (1982), dass Buchdrucker ab Windgeschwindigkeiten >1 m/s sich mit dem Wind ausbreiten bzw. verdriftet werden.

Jedoch zeigten die Ergebnisse für die Tagesfreilassungen am Standort Ebenforst 2017, dass trotz hoher mittlerer Windgeschwindigkeiten (teilweise >2 m/s) Wiederfänge freigelassener Buchdrucker, die vorrangig in den zur Freilassungsstelle nächstgelegenen Fallen auftraten, gegen die Windrichtung vorkommen können.

Mit einer durchschnittlichen Gesamtflugdistanz von ca. 3,5 km (Median: 1,5 km) und wiederholten Flugversuchen (zum Teil über mehrere Tage in Folge), waren bei den Flugmühlenexperimenten Buchdrucker in der Lage ausgedehnte Flüge zu unternehmen. Im Freiland können Windströmungen bei solchen Flügen sowohl limitierend als auch unterstützend wirken. Mit dem Wind fliegend können bei entsprechend starken, gerichteten Luftströmungen Käfer so auch größere Distanzen überwinden. Demnach ist es ihnen somit auch möglich, den Überflug von größeren Nichtwaldgebieten zu bewältigen (Forsse und Solbreck, 1985; Duelli *et al.*, 1986). In den eigenen Untersuchungen wurden sowohl in Hundsau als auch in Brunnstube in den von der Freilassungsstelle am weitest entfernten Fallen (>1,5 km) einzelne markierte Buchdrucker gefangen. Die Simulationen der Dispersion mit dem Ausbreitungsmodell BBDS zeigen, dass bei passivem Verhalten bzw. aktivem Flug mit dem Wind die Käfer insbesondere bei konstanter Windrichtung und vergleichsweise hoher Windgeschwindigkeit schon in kurzer Zeit große Distanzen überwinden könnten. Dieses Verhalten führt aber in der Regel auch zu einer starken Verdünnung der Population mit zunehmender Distanz. Da aggressive Borkenkäferarten wie der Buchdrucker zur Überwindung der Abwehrmechanismen ihrer Wirtsbäume auf die Aggregation ihrer Artgenossen in der Regel angewiesen sind, ist eine Ausbreitungsstrategie von Vorteil, die eine optimale Ausnutzung lokal vorhandener Ressourcen und gleichzeitig die Aggregation möglichst vieler Käfer ermöglicht (Byers, 1989; Raffa *et al.*, 2016). Insbesondere unter

endemischen Bedingungen sind Buchdrucker auf das Auffinden von (zeitlich wie räumlich) spärlich vorhandenem Brutmaterial angewiesen und von der Wahrnehmung der chemischen Signale abhängig, die von ihren Artgenossen ausgehen (Louis *et al.*, 2016). Grundsätzlich ist somit davon auszugehen, dass schwärmende Buchdrucker zum Auffinden von attraktiven Duftquellen, die entweder als baumbürtige Substanzen von befallstauglichen Wirtsbäumen oder als Aggregationspheromone von Artgenossen ausgehen, sich gegen den Wind orientieren (Byers, 1988, 1989). Dies wird durch die Modellsimulationen bezüglich der Ausbreitung der Käfer bestätigt. In den meisten Fällen ergab eine Orientierung der Tiere gegen den Wind oder eine komplexe, randomisierte Verhaltensstrategie (Bau und Cardé, 2015) eine bessere Übereinstimmung mit den im Freiland beobachteten Wiederfängen als für berechnete Flugtrajektorien bei passivem Flugverhalten oder Flug der Käfer mit dem Wind. Zudem zeigte sich für Käfer, die sich gegen den Wind orientieren, eine temporäre Akkumulation der Flugtrajektorien an Bestandesrändern durch die Konvergenz von Eigenbewegung der Käfer und Windgeschwindigkeit. Bestandesränder sind daher und auf Grund der höheren Wahrscheinlichkeit in exponierten Waldrandbereichen befallstaugliche, gestresste Wirtsbäume zu finden, offensichtlich bevorzugte Aggregations- und Schwärmflugbereiche des Buchdruckers (Sanders, 1987).

Mit dem entwickelten Ausbreitungsmodell kann das von der Windströmung beeinflusste Flugverhalten schwärmender Buchdrucker simuliert und dessen Reaktion auf multiple Duftstoffquellen visualisiert werden. Das Simulationsmodell ermöglicht zudem die zeitlich-räumliche Darstellung der Ausbreitung der Duftstoffe, die von Pheromondispensern emittiert werden. Da aber wesentliche Grundlagen zur genauen Abschätzung der Emissionsrate von Pheromondispensern unter Freilandbedingungen fehlen bzw. noch in Bearbeitung sind (Staatsbetrieb Sachsenforst, 2005), können die im Simulationsmodell verwendeten Werte für die Lockstoffabgabe nur als Näherungswerte angesehen werden. Die Simulationen der Duftstoffausbreitung in Abhängigkeit von den modellierten Windströmungen in den topographisch sehr unterschiedlichen Untersuchungsgebieten zeigen aber deutlich wie variabel die Ausprägung der aktiven Bereiche einer Duftfahne sein können, die letztlich zur Anlockung schwärmender Buchdrucker führt. Die Möglichkeit der Visualisierung dieses aktiven Bereichs einer Pheromonwolke erlaubt jedenfalls eine erheblich bessere Einschätzung der Attraktivität einer Falle für den Borkenkäfer als das eher artifizielle Modell des „effektiven Attraktionsradius“ (Schlyter, 1992; Byers, 2008).

5 Schlußfolgerungen

Die Untersuchungen zur Ausbreitung des Buchdruckers in Abhängigkeit von den spezifischen topoklimatischen Gegebenheit in den verschiedenen Untersuchungsgebieten lassen eine hohe Variabilität hinsichtlich des Migrationspotentials des Buchdruckers erkennen. Jedoch ermöglichen die Daten aus den detaillierten Messungen der Windbedingungen an den topographisch heterogenen Versuchsstandorten und die neu gewonnenen Ergebnisse zur Flugkapazität des Buchdruckers ein besseres Verständnis des Schwärmverhaltens und der Migration des Buchdruckers.

Die entwickelten Modelle erlauben eine diagnostische, zeitlich-räumliche Simulation von möglichen Ausbreitungsbereichen, die für eine verbesserte Einschätzung der Befallsgefährdung von Beständen herangezogen werden können. Darüber hinaus können die Modelle, insbesondere die Simulation der Pheromonausbreitung, für die Optimierung von Monitoring- und Fangsystemen eingesetzt werden. Die Möglichkeit der Visualisierung der Pheromonausbreitung und die Abschätzung der Reaktion der Käfer liefern zudem essentielle Informationen für die räumliche Anordnung und Anzahl von Fangbäumen und Fallen zum Schutz vor Stehendbefall.

6 Danksagung

Das Forschungsprojekt wurde finanziell unterstützt durch das Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus, durch das Land Tirol, das Land Oberösterreich, das Land Steiermark und durch die Österreichischen Bundesforste AG.

Das Ergänzungsprojekt wurde gefördert vom Land Salzburg und vom Land Steiermark.

Für die Betreuung der Messstationen und Fallenautomaten bedanken wir uns bei Bogner&Lehner Messtechnik GmbH.

Besonderer Dank gilt den zahlreichen Unterstützern und Mitarbeitern im Nationalpark Kalkalpen (Nationalparkforstverwaltung Reichraming), im Nationalpark Gesäuse und im Wildnisgebiet Dürrenstein für die Bereitstellung der Versuchflächen und für die praktische Mitarbeit bei der Durchführung des Projekts vor Ort.

In traurigem Gedenken an unsere Projektbetreuerin im Nationalpark Gesäuse, Tamara Höbinger.

7 Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Untersuchungszeiträume und Vorlage von eingefärbten Stämmen.....	7
Tab. 2: Tagesfreilassungen, Herkunft und Anzahl der markierten bzw. von der Freilassungsplattform abgeflogenen Buchdrucker 2016	8
Tab. 3: Tagesfreilassungen, Herkunft und Anzahl der markierten bzw. von der Freilassungsstelle abgeflogenen Buchdrucker 2017	9
Tab. 4: Seehöhe der jeweiligen Freilassungsstelle und Distanzen der Fallenstandorte zur Freilassung.....	12
Tab. 5: Charakteristiken der unterschiedlichen Suchstrategien zum Auffinden einer Pheromonwolke nach Bau und Cardé (2003)	19
Tab. 6: Gesamtsummen der gefangenen nichtmarkierten und wiedergefangenen markierten Buchdrucker aus eingefärbten Stämmen und Tagesfreilassungen für die unterschiedlichen Untersuchungsgebiete getrennt nach Untersuchungsjahr	22
Tab. 7: Wiederfangraten (WFR) für geschlüpfte Buchdrucker aus unterschiedlich markierten Stämmen, getrennt nach Jahr, Standort und Fangbaumvorlage bzw. Generation.....	23
Tab. 8: Wiederfang (WF) und Wiederfangraten (WFR) für die Tagesfreilassungen 2016 getrennt nach Standort und Gesamt (inklusive der Wiederfänge in den Folgetagen nach der Freisetzung)	24
Tab. 9: Wiederfangraten (WFR) für die Tagesfreilassungen 2017 getrennt nach Standort, Tag der Freilassung, Markierungsfarbe für den Tag der Freisetzung und Gesamt (inklusive der registrierten Wiederfänge in den Folgetagen)	25
Tab. 10: Windrichtungen und Windgeschwindigkeiten an den Freilassungsstellen in Abhängigkeit von den potentiellen Schwärmbedingungen des Buchdruckers getrennt nach Untersuchungsgebiet, Jahr und Markierung der Brutstämme	47
Tab. 11: Windrichtungen und Windgeschwindigkeiten am Freilassungspunkt während der Tagesfreilassungsexperimente 2016 und 2017 in Ebenforst, Brunnstube und Hundsau	48
Tab. 12: Windbedingungen beim Freilassungspunkt und mittlere Flugrichtung und Ausbreitung markierter Buchdrucker von unterschiedlich eingefärbten Brutstämmen	52
Tab. 13: Windbedingungen beim Freilassungspunkt und mittlere Flugrichtung und Ausbreitung markierter Buchdrucker für die Tagesfreilassungen	52
Tab. 14: Anzahl der flugfähigen Buchdrucker und Anzahl der Flüge mit einer Dauer von mehr als 60 Sekunden bzw. mit mehr als 100 Rotationen, getrennt nach Männchen und Weibchen	53
Tab. 15: Fluggeschwindigkeit, Flugdauer und Distanz sowie Dauer von non-stop Flügen	54

8 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Lage der Untersuchungsstandorte	5
Abb. 2: Freilassungsstelle im Untersuchungsgebiet Hundsau im Wildnisgebiet Dürrenstein 2016	7
Abb. 3: Fallenautomat (links) und zeitgesteuerter Drehteller mit 14 Auffangbehältern (rechts, Ansicht von unten).....	11
Abb. 4: Kontrollstämme in Käfigen (links) und Stammeklektor mit Fallenautomat (rechts) zur Ermittlung der ausschlüpfenden Buchdrucker aus eingefärbten Stämmen	13
Abb. 5: Benutzeroberfläche des Bildanalysetools zur automatischen Zählung schlüpfender Buchdrucker aus markierten Stämmen (Quellbild links, bearbeitbares Analysebild rechts und Histogramm unterhalb der Bilder, welches die momentanen Aktivitäten als Balken für jedes Bild in chronologischer Anordnung anzeigt).....	14
Abb. 6: Seitenansicht der Flugmühle	16
Abb. 7: Buchdrucker während des Flugs im Flugmühlenexperiment mit am Halsschild fixiertem Rotationsarm der Flugmühle	16
Abb. 8: Anzahl und räumliche Verteilung gefangener unmarkierter und markierter Buchdrucker im Untersuchungsgebiet Hundsau (Wildnisgebiet Dürrenstein) 2016	27
Abb. 9: Anzahl und räumliche Verteilung gefangener unmarkierter und markierter Buchdrucker im Untersuchungsgebiet Hundsau (Wildnisgebiet Dürrenstein) 2017	28
Abb. 10: Anzahl und räumliche Verteilung gefangener unmarkierter und markierter Buchdrucker im Untersuchungsgebiet Ebenforst (NP Kalkalpen) 2016	29
Abb. 11: Anzahl und räumliche Verteilung gefangener unmarkierter und markierter Buchdrucker im Untersuchungsgebiet Ebenforst (NP Kalkalpen) 2017	30
Abb. 12: Anzahl und räumliche Verteilung gefangener unmarkierter und markierter Buchdrucker im Untersuchungsgebiet Brunnstube (NP Gesäuse) 2016	31
Abb. 13: Anzahl und räumliche Verteilung gefangener unmarkierter und markierter Buchdrucker im Untersuchungsgebiet Brunnstube (NP Gesäuse) 2017	32
Abb. 14: Anzahl und räumliche Verteilung gefangener gelb markierter Buchdrucker für die Tagesfreilassungen 2016 in den Untersuchungsgebieten Hundsau am 3.8.2016 und Ebenforst (Tagesfreilassung am 29.7.2016) ...	33
Abb. 15: Anzahl und räumliche Verteilung gefangener gelb markierter Buchdrucker im Untersuchungsgebiet Brunnstube (NP Gesäuse) für die Tagesfreilassung (4.8.2016).....	33
Abb. 16: Anzahl gefangener markierter Buchdrucker in Abhängigkeit von der Entfernung zur Freilassungsstelle 2016 (**: $p < 0.01$; ***: $p < 0.001$)	34
Abb. 17: Anzahl gefangener markierter Buchdrucker (WF) in Abhängigkeit von der Entfernung zur Freilassungsstelle 2017 (***: $p < 0,001$).....	35
Abb. 18: Zusammenhang zwischen Wiederfangrate (WFR) und Entfernung zum Freilassungspunkt getrennt nach Untersuchungsjahren und Standorten für die Tagesfreilassungen (oben), für den Flug von Geschwisterbruten (GB; mitte) und für den Schwärmflug der Parentalgeneration (F1) und der zweiten Generation (F2; Wiederfangraten nur für Hundsau 2016 bzw. 2017; unten) (n.s.: nicht signifikant, *: $p < 0,05$, **: $p < 0,01$, ***: $p < 0,001$)	36
Abb. 19: Zusammenhänge zwischen täglichen Witterungsparametern (Lufttemperaturmaximum, Globalstrahlungssumme, Luftfeuchte, Niederschlagssumme) und den Tagessummen der gefangenen Buchdrucker (automatischen Fallen) für alle Standorte und Jahre	37
Abb. 20: Entwicklungsverlauf der Bruten am Standort Ebenforst 2016 im Vergleich zum Wiederfang der aus markierten Stämmen schlüpfenden Buchdrucker und zur Fangzahl nichtmarkierter Buchdrucker in den automatischen Fallen 2016.....	38

Abb. 21: Potentieller Entwicklungsverlauf und Gesamtanzahl der in den automatischen Fallen gefangenen Buchdrucker in Brunnstube 2016	39
Abb. 22: Entwicklungsverlauf der Bruten für die unterschiedlichen Fangbäume im Gebiet Hundsau und Wiederfang markierter Buchdrucker Hundsau 2016	40
Abb. 23: Potentieller Entwicklungsverlauf und Gesamtanzahl der in den automatischen Fallen gefangenen Buchdrucker in Hundsau 2016	41
Abb. 24: Potentieller Entwicklungsverlauf und Anzahl der wiedergefangenen markierten Buchdrucker und Fänge nichtmarkierter Käfer in den automatischen Fallen im Gebiet Hundsau im Jahr 2017	41
Abb. 25: Entwicklungsverlauf der Bruten in blau eingefärbten Stämmen, beobachteter Schlupf von Käfern aus dem Kontrollstamm im Stammeklektor (oben), potentielle Anzahl geschlüpfter Buchdrucker (pot IT blau GB und F2) aus den aufgelegten Stämmen und Wiederfang blau markierter Buchdrucker (unten) im Verlauf des Sommers 2017 im Gebiet Hundsau	42
Abb. 26: Tagessummen der Aktivität bei den eingefärbten Stämmen aus Bildanalysen im Vergleich zu den täglichen Wiederfängen gelb markierter Buchdrucker im Untersuchungsgebiet Hundsau im Zeitraum 10.5. – 21.6.2016	43
Abb. 27: Zeitlich-räumliche Differenzierung der Wiederfänge markierter Buchdrucker in Abhängigkeit von der Exposition bei der Tagesfreilassung am 22.6.2017 in Brunnstube (links: Wiederfang markierter Käfer von 11h00-12h00; rechts: Wiederfang nach 16h00).....	44
Abb. 28: Zeitreihe von Windrichtung und Windgeschwindigkeit (10-Minuten Werte) für die fünf Standorte der automatischen Fallen im Untersuchungsgebiet Hundsau 2016	45
Abb. 29: Zeitreihe von Windrichtung und Windgeschwindigkeit (10-Minuten Werte) für die fünf Standorte der automatischen Fallen im Untersuchungsgebiet Ebenforst 2016	45
Abb. 30: Zeitreihe vom Windrichtung und Windgeschwindigkeit (10-Minuten Werte) für die fünf Standorte der automatischen Fallen im Untersuchungsgebiet Brunnstube 2016.....	46
Abb. 31: Zusammenhänge zwischen täglichen Windgeschwindigkeiten (Mittelwert und Minimum von 7h00-20h00) und den Tagessummen der insgesamt gefangenen Buchdrucker und der Wiederfänge von markierten Käfern in den automatischen Fallen für alle Standorte und Jahre.....	49
Abb. 32: Windgeschwindigkeiten (Stundenmittelwert, Minimum und Maximum) bei den Fallen und der Freilassungsstelle während der Tagesfreilassung in Rinn (20.7.2016).....	50
Abb. 33: Häufigkeitsverteilung der Fluggeschwindigkeit für die Gesamtanzahl der in Flugexperimenten untersuchten Buchdrucker und getrennt nach Geschlecht	54
Abb. 34: Individuelle Verläufe der Fluggeschwindigkeit von fünf ausgewählten Käfern mit unterschiedlicher Dauer der Flugaktivität	55
Abb. 35: Kumulative relative Häufigkeitsverteilung von Gesamtflugstrecke, Gesamtdauer der Flugaktivität und Dauer von non-stop Flügen.....	56
Abb. 36: Flugdistanzen einzelner Flüge (logarithmische Skala) in Abhängigkeit von der Zeit ab Beginn des ersten Flugs	57
Abb. 37: Beispielhafte Darstellung der Windmessdaten, des modellierten Windfeldes (Richtung und Geschwindigkeit in 2m Höhe) und der Pheromonausbreitung für den Standort Brunnstube (22.06.2017 10h42 (oben) bzw. 11h00 (unten)	58
Abb. 38: Simulationen der Pheromonausbreitung bei vergleichsweise geringen (links: Brunnstube 22.6.2017 11h03) und hohen Windgeschwindigkeiten (rechts: Ebenforst 13.6.2017 15h35)	59
Abb. 39: Simulation der Pheromonausbreitung und der momentanen Konzentration bei unterschiedlicher Wirkungsdauer des Pheromons für Brunnstube (22.06.2017 11h30; von links nach rechts: Wirkungsdauer: 10 min., 5 min. bzw. 2,5 min.).....	60
Abb. 40: Simulierte Ausbreitung freigesetzter Buchdrucker anhand unterschiedlicher Verhaltensvarianten für verschiedene Termine in den Untersuchungsgebieten Ebenforst, Brunnstube und Hundsau.....	61

Abb. 41: Simulierte Ausbreitung freigesetzter Buchdrucker für Brunnstube (22.06.2017 10h30) anhand unterschiedlicher Verhaltensvarianten.....	62
Abb. 42: Pheromonausbreitung und simulierte Dispersion freigesetzter Buchdrucker bei der Tagesfreilassung in Rinn 2016	63
Abb. 43: Simulierte Verdichtung der Flugbahnen im Bereich des Waldrandes von gegen den Wind orientierten Buchdruckern.....	63

9 Literaturverzeichnis

- 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. *For.Ecol.Manage.* 249, 171-186.
- Bau, J., Cardé, R.T., 2015. Modeling Optimal Strategies for Finding a Resource-Linked, Windborne Odor Plume: Theories, Robotics, and Biomimetic Lessons from Flying Insects. *Integrative and Comparative Biology*, pp. 1–17. doi:10.1093/icb/icv036.
- Blackadar, A.K., 1997. *Turbulence and Diffusion in the Atmosphere*. Springer, 185p.
- Botterweg, P.F., 1982. Dispersal and flight behaviour of the spruce bark beetle *Ips typographus* in relation to sex, size and fat content. *Zeitschrift für angewandte Entomologie* 94 466-489.
- Byers, J.A., 1988. Upwind flight orientation to pheromone in western pine beetle tested with rotating windvane traps. *Journal of Chemical Ecology* 14, 189-198.
- Byers, J.A., 1989. Chemical ecology of bark beetles. *Experientia* 45, 271-283.
- Byers, J.A., 2000. Wind-aided dispersal of simulated bark beetles flying through forests. *Ecological Modelling* 125 231-243.
- Byers, J.A., 2008. Active Space of Pheromone Plume and its Relationship to Effective Attraction Radius in Applied Models. *Journal of Chemical Ecology* 34, 1134-1145.
- Dolezal, P., Okrouhlik, J., Davidkova, M., 2016. Fine fluorescent powder marking study of dispersal in the spruce bark beetle, *Ips typographus* (Coleoptera: Scolytidae). *EJE* 113, 1-8.
- Duelli, P., Studer, M., Näf, W., 1986. Der Borkenkäferflug ausserhalb des Waldes. *Journal of Applied Entomology* 102 139-148.
- Duelli, P., Zahradnik, P., Knizek, M., Kalinova, B., 1997. Migration in spruce bark beetle (*Ips typographus* L.) and the efficiency of pheromone traps. *Journal of Applied Entomology* 121, 297-303.
- Evenden, M.L., Whitehouse, C.M., Sykes, J., 2014. Factors Influencing Flight Capacity of the Mountain Pine Beetle (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae). *Environmental Entomology* 43, 187-196.
- Forsse, E., Solbreck, C., 1985. Migration in the bark beetle *Ips typographus* L.: duration, timing and height of flight. *Zeitschrift für angewandte Entomologie* 100 47-57.
- Franklin, A.J., Debruyne, C., Gregoire, J.C., 2000. Recapture of *Ips typographus* L. (Col., Scolytidae) with attractants of low release rates: localized dispersion and environmental influences. *Agricultural and Forest Entomology*, 259-270.
- Grünwald, M., 2014. Untersuchungen zur Phänologie und zum Ausbreitungsverhalten des Buchdruckers „*Ips typographus*“ im alpinen Raum. Diploma-thesis, BOKU Wien, pp. 74.
- Hurling, R., 2002. Zur Flugaktivität und Brutherdentwicklung des Buchdruckers *Ips typographus* (L.). Diss., Univ. Göttingen, pp.278.
- Jactel, H., 1991. Dispersal and flight behavior of *Ips sexdentatus* (Coleoptera: Scolytidae) in pine forest. *Ann. For. Sci.* 48, 417-428.
- Jakuš, R., Šimko, J., 2000. The use of dispensers with different release rates at pheromone trap barriers for *Ips typographus*. *Anzeiger für Schädlingkunde* 73, 33-36.
- Kautz, M., Dworschak, K., Gruppe, A., Schopf, R., 2011. Quantifying spatio-temporal dispersion of bark beetle infestations in epidemic and non-epidemic conditions. *For.Ecol.Manage.* 262, 598–608.

- Lobinger, G., 1994. Die Lufttemperatur als limitierender Faktor für die Schwärmaktivität zweier rindenbrütender Fichtenborkenkäferarten, *Ips typographus* L. und *Pityogenes chalcographus* L. (Col., Scolytidae). Anzeiger für Schädlingskunde, Pflanzenschutz, Umweltschutz 67, 14-17.
- Lobinger, G., Skatulla, U., 1996. Untersuchungen zum Einfluß von Sonnenlicht auf das Schwärmverhalten von Borkenkäfern. Anzeiger für Schädlingskunde, Pflanzenschutz, Umweltschutz 69, 183-185.
- Louis, M., Toffin, E., Gregoire, J.-C., Deneubourg, J.-L., 2016. Modelling collective foraging in endemic bark beetle populations. Ecological Modelling 337, 188-199.
- Mursch-Radlgruber, A., 2017. Benutzerhandbuch Bark Beetle Image Analyzer Anwendung. pp 7.
- Oberhollenzer, J., 2015. Ausbreitung und Entwicklung des Buchdruckers (*Ips typographus* L.) im Wildnisgebiet Dürrenstein. Master thesis, BOKU Wien. pp. 62.
- Putz, J., 2014. Dispersion des Buchdruckers, *Ips typographus*, von einem Holzlager in Wälder der Umgebung. Masterarbeit. Universität für Bodenkultur Wien. pp. 64.
- Raffa, K.F., Andersson, M.N., Schlyter, F., 2016. Host Selection by Bark Beetles: Playing the Odds in a High-Stakes Game. In: Claus Tittiger and Gary J. Blomquist, editors, Advances in Insect Physiology, Vol. 50, Oxford: Academic Press, 2016, pp. 1-74.
- Ravn, H.P., 1985. Expansion of the populations of *Ips typographus* (L.) (Coleoptera, Scolytidae) and their local dispersal following gale disaster in Denmark. Zeitschrift für angewandte Entomologie 99, 26-33.
- Röckle, R., 1990. Bestimmung der Strömungsverhältnisse im Bereich von komplexen Bebauungsstrukturen. Dissertation Darmstadt, pp. 150.
- Safranyik, L., Linton, D.A., Silversides, R., McMullen, L.H., 1992. Dispersal of released mountain pine beetles under the canopy of a mature lodgepole pine stand. J.Appl.Entomol. 113, 441-450.
- Sanders, W., 1987. Untersuchungen über die Aktivitätsdichte des Buchdruckers *Ips typographus* in Laubwäldern und in offener Landschaft. Journal of Applied Entomology 103, 240-249.
- Sasaki, Y., 1958. An objective analysis based in the variational method. J. Met. Soc. Japan 36, 77-78.
- Schlyter, F., 1992. Sampling range, attraction range, and effective attraction radius: Estimates of trap efficiency and communication distance in coleopteran pheromone and host attractant systems. Journal of Applied Entomology 114, 439-454.
- Schlyter, F., Cederholm, I., 1981. Separation of the sexes of living spruce bark beetles, *Ips typographus* (L.), (Coleoptera, Scolytidae). Zeitschrift für angewandte Entomologie 92, 42-47.
- Schopf, A., Blackwell, E., Wimmer, V., 2012. Untersuchungen zum Einfluss des Klimas auf Voltinismus und Ausbreitung des Buchdruckers, *Ips typographus*, im alpinen Raum. Endbericht von StartClim2011.A in StartClim2011: Anpassung an den Klimawandel in Österreich: Themenfeld Wald. Auftraggeber: BMLFUW, BMWF, ÖBf. pp. 34.
- Staatsbetrieb Sachsenforst, 2005. Untersuchungen zur Fangleistung verschiedener Dispenser für den Buchdrucker und Kupferstecher. Bericht Staatsbetrieb Sachsenforst. pp. 20.
- Strand, T., Lamb, B., Thistle, H., Allwine, E., Peterson, H., 2009. A simple model for simulation of insect pheromone dispersion within forest canopies. Ecological Modelling 220, 640-656.
- Turchin, P., Thoeny, W.T., 1993. Quantifying Dispersal of Southern Pine Beetles with Mark-Recapture Experiments and a Diffusion Model. Ecological Applications 3, 187-198.
- Weslien, J., Lindelöv, Å., 1990. Recapture of marked spruce bark beetles (*Ips typographus*) in pheromone traps using area-wide mass trapping. Can.J.For.Res. 20, 1786-1790.
- Zannetti, P., 1990. Air Pollution Modelling, Theories, Computational Methods and Available Software. Van Nostrand Reinhold, New York, 444p.

- Zolubas, P., Byers, J.A., 1995. Recapture of dispersing bark beetle *Ips typographus* L. (Col., Scolytidae) in pheromone-baited traps: regression models. *Journal of Applied Entomology* 119, 285-289.
- Zumr, V., 1992. Dispersal of the spruce bark beetle *Ips typographus* (L.) (Col., Scolytidae) in spruce woods. *Journal of Applied Entomology* 114, 348-352.