

Abschlussbericht

Titel

Erstellung eines Expertensystems zur Planung der Insektizidstrategie im Kartoffelbau unter Einbezug der Resistenzentwicklung

Aktenzeichen: 27716-34

Laufzeit: 01.01.2011 – 31.12.2014

Ausführende Stellen

Dienstleistungszentrum Ländlicher Raum - Rheinhessen - Nahe - Hunsrück
(DLR-RNH)

Abteilung Landwirtschaft

Rüdesheimer Straße 60-68; 55545 Bad Kreuznach

Projektbearbeitung:

B.Sc. Claudia Tebbe

Birgit Breckheimer

Dr. Paolo Racca

Dr. Benno Kleinhenz

Dipl.-Ing. (FH) Barbara Keil

Dipl.-Ing. (FH) Beate Tschöpe

Projektleitung:

Dr. Benno Kleinhenz

Tel.: 0671 820 426

Fax: 0671 820 402

Email: benno.kleinhenz@dlr.rlp.de

Kooperationspartner

Informationssystem Integrierte Pflanzenproduktion (ISIP) e.V.

Rüdesheimer Str. 60-68; 55545 Bad Kreuznach

Dr. Manfred Röhrig

Tel.: 0671 820 427

Fax: 0671 820 402

Email: roehrig@isip.de

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis.....	3
Abbildungsverzeichnis.....	4
Tabellenverzeichnis.....	5
I Zusammenfassung.....	6
II Anlass und Zielsetzung des Projektes	8
III Darstellung der Arbeitsschritte und angewandten Methoden	10
1 Gewinnung von Daten zur Modellierung der Insektizidresistenzentwicklung im Labor ...	10
1.1 Kartoffelkäferzucht.....	10
1.2 Selektionsexperimente.....	12
1.3 Versuche zur Bestimmung der Überlebensrate der Kartoffelkäfer in einzelnen Entwicklungsstadien.....	17
2 Modellentwicklung.....	17
IV Ergebnisse.....	18
1 Gewinnung von Daten zur Modellierung der Insektizidresistenzentwicklung im Labor ...	18
1.1 Selektionsexperimente.....	18
1.2 Versuche zur Bestimmung der Überlebensrate der Kartoffelkäfer in einzelnen Entwicklungsstadien.....	23
2 Erstellung des Expertensystems	23
2.1 Modell SIMRESI	23
2.2 Parametrisierung des Modells SIMRESI für Kartoffelkäfer	30
2.3 Modellnutzungskonzept für das Modell SIMRESI.....	32
2.4 Umsetzung des Expertensystems SIMLEP-Res im Onlineportal ISIP	34
V Diskussion	37
VI Öffentlichkeitsarbeit.....	42
VII Fazit.....	44
VIII Literaturverzeichnis	45

Abkürzungsverzeichnis

°C	Grad Celsius
BBCH	Entwicklungsstadien nach Biologische Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft, Bundessortenamt und Chemische Industrie
bzw.	beziehungsweise
cm	Zentimeter
DDT	Dichlordiphenyltrichlorethan
DLR RNH	Dienstleistungszentrum Ländlicher Raum Rheinhessen-Nahe-Hunsrück
et al.	et alii = und andere
F _x	Filialgeneration X
g	Gramm
ha	Hektar
IRAC	Insecticide Resistance Action Committee
ISIP	Informationssystem Integrierte Pflanzenproduktion e.V.
kdr	Knockdown resistance = Knockdown-Resistenz
kg	Kilogramm
l	Liter
LD _x	letale Dosis X
mm	Millimeter
Nr.	Nummer
ppm	parts per million
vgl.	vergleiche
z.B.	zum Beispiel

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Unterschiedliche Entwicklungsstadien des Kartoffelkäfers im Zuchtraum	11
Abbildung 2: Zuchtschema für die Population Mz-H	13
Abbildung 3: Zuchtschema für die Population P01-01	15
Abbildung 4: Dosis-Wirkungskurven gegenüber dem Produkt Karate Zeon für verschiedene Zuchtlinien der Population Mz-H nach Behandlung mit steigender Aufwandmenge desselben Produktes.....	19
Abbildung 5: Dosis-Wirkungskurven für verschiedene Generationen der Population P01-01 gegenüber dem Produkt Karate Zeon, Vergleich von Zuchtlinien mit und ohne Neonicotinoid-Behandlung	20
Abbildung 6: Entwicklung von Kartoffelkäferlarven nach Behandlung (Behandlungszeitraum 6 Tage) mit dem Produkt NeemAzal-T/S, 13 Tage nach Versuchsansatz (Zuchtlinie Mz-H F, F ₁₈)	21
Abbildung 7: Mortalität von Kartoffelkäferlarven der Zuchtlinie Mz-H F (F ₁₈) nach Behandlung mit dem Produkt Novodor FC, Behandlungszeitraum 6 Tage	22
Abbildung 8: Entwicklung von Kartoffelkäferlarven nach Behandlung (Behandlungszeitraum 6 Tage) mit 0,3 %, 0,75 % und 1,5 % der Feldaufwandmenge des Produktes Novodor FC im Vergleich zur unbehandelten Kontrolle, 13 Tage nach Versuchsansatz (Zuchtlinie Mz-H F, F ₁₈)	22
Abbildung 9: Strukturdiagramm für das Modell SIMRESI zur Berechnung des Resistenzniveaus von Insekten	24
Abbildung 10: Berechneter Anteil resistenter Individuen in einer Population (Resist.Pop), Anfangsbedingungen: Dominanzniveau (DN) = 0,01 – 0,5; genetische Fitness = 0,5; Vermehrungsfaktor = 0,5.....	26
Abbildung 11: Modellierung des berechneten Anteils resistenter Individuen in einer Population (Resist. Pop.), Anfangsbedingungen: Dominanzniveau = 0,01 – 0,5; genetische Fitness = 0,5; Vermehrungsfaktor = 0,5.....	27
Abbildung 12: Modellierter Formparameter „a“ in Abhängigkeit von der genetischen Fitness und dem Vermehrungsfaktor	29
Abbildung 13: SIMRESI-Modelloutput mit den Anfangswerten genetische Fitness = 0,2; Vermehrungsfaktor = 0,2 und Dominanzniveau (D.N.) = 0,01; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4 und 0,5	30
Abbildung 14: Modelliertes Dominanzniveau für die Population Mz-H bei Verwendung des Produktes Karate Zeon, Referenzpopulation: unbehandelte Linie der Population P01-01, LD ₅₀ = 0,779 ppm.....	31
Abbildung 15: Simulierter Anteil resistenter Individuen in einer Kartoffelkäferpopulation bei neunmaliger Pyrethroidanwendung in den letzten fünf Jahren	33

Abbildung 16: Simulierter Anteil resistenter Individuen in einer Kartoffelkäferpopulation bei bekannter Anzahl von Pyrethroidanwendungen in den letzten fünf Jahren	34
Abbildung 17: Eingabemaske (Standort) für das Modell SIMRESI unter www.isip.de	35
Abbildung 18: Eingabemaske (Insektizidbehandlungen in den letzten fünf Jahren) für das Modell SIMRESI unter www.isip.de	35
Abbildung 19: Ausgabe des Modells SIMRESI unter www.isip.de	36

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Im Rahmen des Projektes verwendete Kartoffelkäferpopulationen, die sich am Standort Bad Kreuznach in Zucht befanden	10
Tabelle 2: Untersuchte Kombinationen von Konzentration des Insektizids NeemAzal-T/S und Behandlungszeitraum.....	16
Tabelle 3: Populationen, die in den Versuchen zur Bestimmung der Überlebensrate verwendet wurden, und Untersuchungszeiträume	17
Tabelle 4: Ergebnisse der Versuche zur Überlebensrate einzelner Entwicklungsstadien mit verschiedenen Kartoffelkäferpopulationen unter Zuchtbedingungen	23
Tabelle 5: Parameter der Chapman-Funktion für 30 Kombinationen der Faktoren der Resistenzrate (Alle Formparameter a, b, c, und d signifikant mit $\alpha=0,05$)	28
Tabelle 6: Durchgeführte Untersuchungen, die zur Parametrisierung des Modells SIMRESI für Kartoffelkäfer genutzt wurden.....	30
Tabelle 7: Berechnete Wachstumsraten für unterschiedliche Entwicklungsstadien und daraus resultierende genetische Fitness für die adulten Käfer der Populationen Mz-H (unbehandelte Zuchtlinie A, $F_8 + F_9$) und HS (F_8); Referenz: unbehandelte Zuchtlinie A (F_{50}) der Population P01-01.....	32

I Zusammenfassung

Der Kartoffelkäfer (*Leptinotarsa decemlineata* SAY) ist der wichtigste Schädling im Kartoffelanbau, der hohe Ertragsverluste bis hin zum Totalausfall verursachen kann. Seine Bekämpfung erfolgt in erster Linie durch den Einsatz von Insektiziden. Deren intensive Anwendung führte allerdings zur Ausbildung zahlreicher Resistenzen, die zum einen die Bekämpfung des Kartoffelkäfers erschweren und zum anderen Umweltbelastungen zur Folge haben können.

Eine Ausbildung von Resistenzen kann durch ein konsequentes Anti-Resistenzmanagement verhindert bzw. hinausgezögert werden. Um Landwirte und Berater bei dessen Umsetzung zu unterstützen, wurde im Rahmen des Projektes das Expertensystem SIMLEP-Res entwickelt, mit dem die Insektizidstrategie zur Bekämpfung des Kartoffelkäfers unter Einbezug der Resistenzentwicklung geplant werden kann. Neben den bereits vorhandenen Prognosemodellen zur Populationsentwicklung des Kartoffelkäfers, Hinweisen und Beraterempfehlungen umfasst dieses System ein neu entwickeltes Modul, mit dem die Resistenzentwicklung von (holometabolen) Insekten abgebildet werden kann. Hierbei handelt es sich um das Simulationsmodell SIMRESI, das die Entwicklung von Resistenzen anhand der Parameter Dominanzniveau, genetische Fitness, Vermehrungsfaktor und Immigrationsfaktor beschreibt.

Für das Expertensystem SIMLEP-Res wurde das Modell SIMRESI beispielhaft an die Entwicklung von Resistenzen des Kartoffelkäfers gegenüber Insektiziden aus der Wirkstoffklasse der Pyrethroide angepasst. Die Anpassung erfolgte auf Basis von Literaturangaben und Laborversuchen, für deren Durchführung ganzjährige Kartoffelkäferzuchten verschiedener Herkünfte etabliert wurden. Sie umfassten neben einer Freilandpopulation jeweils eine sensible und eine Pyrethroid-resistente Referenzpopulation. Zur Bestimmung des Dominanzniveaus wurden Selektionsexperimente im Labor durchgeführt. Durch die wiederholte Behandlung der Kartoffelkäferlarven mit einer kontinuierlich gesteigerten Dosis des Produktes Karate Zeon (100 g/l Lambda-Cyhalothrin) konnte eine 44fache Steigerung des Resistenzniveaus gegenüber diesem Pyrethroid erreicht werden. Es wurde keine Rückentwicklung einer vorhandenen Pyrethroidresistenz bei mehrfacher Behandlung mit dem Produkt Actara (250 g/kg Thiamethoxam, Wirkstoffklasse Neonicotinoide) beobachtet. Versuche zur Resistenzrückentwicklung unter Verwendung der biologischen Insektizide NeemAzal-T/S (10,6 g/l Azadirachtin) und Novodor FC (20 g/kg *Bacillus thuringiensis* subspecies *tenebrionis*, Stamm NB 176, 10.000BTTU/g) führten ebenfalls zu keinem Ergebnis. Auf Grundlage dieser Ergebnisse wird im Modell SIMRESI davon ausgegangen, dass sich der Resistenzstatus gegenüber Pyrethroiden erhöht, wenn Insektizide aus dieser Wirkstoffklasse eingesetzt werden. Falls keine Behandlung des

Kartoffelkäfers erfolgt oder eine andere Wirkstoffklasse eingesetzt wird, bleibt das Resistenzniveau gegenüber Pyrethroiden unverändert.

Der Vermehrungsfaktor im Modell SIMRESI wurde anhand von Literaturangaben und eigenen Ergebnissen aus Überwinterungsversuchen bestimmt. Im Mittel betrug die natürliche Sterblichkeit der Kartoffelkäfer 86 %, sodass der Vermehrungsfaktor auf einen Wert von 0,14 festgelegt wurde.

Für die Anpassung des Parameters genetische Fitness wurden die Wachstumsraten verschiedener Kartoffelkäferpopulationen bestimmt und zueinander ins Verhältnis gesetzt. Grundlage hierfür waren Versuche, die im Labor durchgeführt wurden. Ausgehend von der Anzahl Eier wurde die Zahl der sich daraus entwickelnden Individuen in verschiedenen Stadien bestimmt und die Wachstumsraten berechnet.

Der Immigrationsfaktor wurde zunächst auf den Wert 1 festgelegt. Dies bedeutet, dass im Modell derzeit noch keine Einwanderung berücksichtigt wird und dass das entwickelte Expertensystem nur Gültigkeit in abgeschlossenen, intensiven Kartoffelanbaugebieten besitzt. Um das System auch in anderen Anbauregionen nutzbar zu machen, sollen über die Projektlaufzeit hinaus Kreuzungsversuche durchgeführt werden. Hierbei sollen eine Pyrethroid-resistente und eine Pyrethroid-sensible Population in unterschiedlichem Verhältnis miteinander gekreuzt werden.

Das Expertensystem SIMLEP-Res ist unter www.isip.de im Internet verfügbar. Um seine Übertragbarkeit und Praxistauglichkeit zu prüfen, soll den Beratern der Pflanzenschutzdienste der Länder für die Saison 2015 eine Testversion zur Verfügung gestellt werden. Zur Überprüfung des Modells SIMRESI soll außerdem ein Monitoring nach IRAC-Methode Nr. 7 an Standorten durchgeführt werden, von denen die Insektizidmaßnahmen der letzten Jahre bekannt sind.

Prinzipiell wäre es möglich das Modell SIMRESI um die Resistenzentwicklung gegenüber anderen Wirkstoffklassen zu erweitern oder auf andere (holometabole) Insekten zu übertragen. Zur Bestimmung der Parameter wären entsprechende Versuche bzw. Angaben aus der Literatur notwendig.

II Anlass und Zielsetzung des Projektes

Der Kartoffelkäfer (*Leptinotarsa decemlineata* SAY) ist der wichtigste Schädling im Kartoffelanbau, der durch seine Fraßaktivität hohe Ertragsverluste bis hin zum Totalausfall verursachen kann (Börner, 2009; Radtke *et al.*, 2000). Da er kaum natürliche Feinde besitzt (Weber, 2003) und das Absammeln der Käfer sehr zeit- und kostenintensiv ist, erfolgt die Bekämpfung in erster Linie durch den Einsatz von Insektiziden (Hare, 1990).

Gleichzeitig zählt der Kartoffelkäfer zu den resistentesten Schädlingen weltweit (Whalon *et al.*, 2008). Insgesamt sind laut Whalon *et al.* (2015) 279 Resistenzfälle gegenüber 54 verschiedenen Wirkstoffen bekannt. Auch in Deutschland wurden Resistenzen beispielsweise gegenüber Wirkstoffen aus der Klasse der Organophosphate, Carbamate und Pyrethroide beobachtet (Richerzhagen & Tschöpe, 2010). In einem Monitoring, das in den Jahren 2011 - 2014 vom Dienstleistungszentrum Ländlicher Raum Rheinhessen-Nahe-Hunsrück (DLR RNH) durchgeführt wurde, konnten ebenfalls Pyrethroidresistenzen an verschiedenen Standorten in Deutschland nachgewiesen werden. Zusätzlich wurde im Jahr 2013 in Zusammenarbeit mit dem Kooperationspartner Bayer CropScience, Monheim, ein Monitoring auf das Vorhandensein der Knockdown-Resistenz (*kdr*) durchgeführt. Diese Form der Wirkort-Resistenz vermittelt eine Unempfindlichkeit gegenüber Pyrethroiden und verwandten Wirkstoffen (DDT, Pyrethrine) (Lee *et al.*, 1999). Im Rahmen des Monitorings wurden Stichproben von 142 Standorten in Deutschland untersucht. In 92 % der Proben konnte die Mutation nachgewiesen werden, die der *kdr* zugrunde liegt. Da das *kdr*-Gen geschlechtschromosomal rezessiv vererbt wird, sind allerdings nicht in jedem Fall Resistenzerscheinungen im Feld zu beobachten (Lee *et al.*, 1999). Mit dem Nachweis der *kdr*-Mutation geht jedoch ein erhöhtes Resistenzbildungspotential einher.

Resistente Schädlingspopulationen können nur mit einem Insektizid erfolgreich bekämpft werden, wenn die Dosierung und/oder die Häufigkeit der Behandlung erhöht wird. Da im Rahmen der Zulassung jedoch Höchstgrenzen bezüglich Aufwandmenge und Anwendungshäufigkeit festgelegt werden, kann der Insektizideinsatz nicht uneingeschränkt intensiviert werden. Mögliche Folgen einer gesteigerten Anwendung von Insektiziden sind erhöhte Umweltbelastungen und ein finanzieller Mehraufwand für die Landwirte, denen höhere Kosten für Produktionsmittel und deren Ausbringung entstehen (Grafius, 1997).

Die Ausbildung von Resistenzen ist eine natürliche Reaktion von Schaderregern auf Selektionsdruck (Thacker, 2002). Aus diesem Grund lässt sie sich meist nicht gänzlich vermeiden. Es gibt jedoch verschiedene Strategien, mit denen eine Resistenzbildung zumindest hinausgezögert werden kann. Ein wichtiger Baustein im Anti-Resistenzmanagement ist ein konsequenter Wechsel der Wirkstoffklasse, wodurch der Selektionsdruck auf einzelne Wirkstoffe und Wirkstoffgruppen reduziert werden soll (Metcalf, 1994). Derzeit sind zur Bekämpfung des Kartoffelkäfers im Kartoffelanbau 47 Produkte aus 7

Wirkstoffgruppen (Pyrethroide, Neonicotinoide, Diamide, Semicarbazone, Spinosyne, *Bacillus thuringiensis*, Wirkstoffe mit unbekannter Wirkungsweise) in Deutschland zugelassen (Stand 14.01.2015) (BVL, 2015), sodass ein effektiver Wechsel der Wirkstoffklassen möglich ist.

Ziel des Projektes war es ein Expertensystem (SIMLEP-Res) zu entwickeln, mit dem die Insektizidstrategie zur Bekämpfung des Kartoffelkäfers geplant werden kann. Besonders berücksichtigt werden soll hierbei die Resistenzbildung der Schädlinge gegenüber Insektiziden bzw. Wirkstoffen, die mit dem Simulationsmodell SIMRESI beschrieben wird. Dieses Modell soll als Modul im Expertensystem mit bereits vorhandenen Prognosemodellen zur Populationsentwicklung, Bekämpfungsschwellen, pflanzenbaulichen Maßnahmen und Beraterhinweisen verknüpft werden, sodass die Notwendigkeit einer Insektizidbehandlung unter ökologischen und ökonomischen Aspekten analysiert werden kann. Mit Hilfe des Systems sollen individuelle und regionale Pflanzenschutzmittelstrategien so angepasst werden, dass eine Resistenzbildung verzögert bzw. vermieden wird. Auf diese Weise wird einer verstärkten Anwendung von Insektiziden entgegengewirkt und mögliche Auswirkungen auf die Umwelt können reduziert werden.

Das Resistenzmodul wurde am Beispiel der Pyrethroidresistenz des Kartoffelkäfers entwickelt. Grundlage hierfür waren Untersuchungen, die mit verschiedenen Populationen aus einer ganzjährigen Zucht des Dienstleistungszentrum Ländlicher Raum Rheinhessen-Nahe-Hunsrück (DLR RNH) am Standort Bad Kreuznach durchgeführt wurden. Das zu entwickelnde Modul sollte so gestaltet werden, dass es leicht an andere Insekten angepasst werden kann.

III Darstellung der Arbeitsschritte und angewandten Methoden

1 Gewinnung von Daten zur Modellierung der Insektizidresistenzentwicklung im Labor

1.1 Kartoffelkäferzucht

Am DLR RNH wurde eine ganzjährige Kartoffelkäferzucht mit verschiedenen Populationen etabliert. Sie umfasste zum einen langjährige Laborpopulationen, die von Bayer CropScience zur Verfügung gestellt wurden, und zum anderen eine Population, die im Jahr 2011 im Freiland gesammelt und unter Laborbedingungen weiter entwickelt wurde (Tabelle 1).

Tabelle 1: Im Rahmen des Projektes verwendete Kartoffelkäferpopulationen, die sich am Standort Bad Kreuznach in Zucht befanden

Bezeichnung	Herkunft		Resistenzstatus Pyrethroide	in Zucht seit
P01-01	Portugal	Laborpopulation	resistent (<i>kdR</i>)	2001
HS	Frankfurt/Main	Laborpopulation	sensibel	nicht bekannt
Mz-H	Mainz-Hechtsheim	Freilandpopulation	resistent (<i>kdR</i>)	Mai 2011

Die Kartoffelkäfer durchliefen fast ihre gesamte Entwicklung in Zuchtkäfigen aus Plexiglas (45 cm x 50 cm x 58 cm), in die Kartoffelpflanzen gestellt wurden (Abbildung 1a). Die Pflanzen wurden regelmäßig auf abgelegte Eigelege untersucht, die aus den Blättern ausgeschnitten und auf einen angefeuchteten Rundfilter (Rotilabo®-Rundfilter, Typ 111A, ø 125 mm, Roth) in eine Petrischale (ø 145 mm, Höhe 20 mm, mit Belüftungsnocken, Roth) gelegt wurden (Abbildung 1b). Die Larven schlüpfen in den Petrischalen aus den Eiern und wurden mit frischen Kartoffelblättern versorgt (Abbildung 1c). Wenn sie etwa das L2-Stadium erreicht hatten, wurden sie entweder in den Versuchen verwendet oder zur Weiterzucht auf eine Kartoffelpflanze in einen Zuchtkäfig gesetzt. Dort entwickelten sich die Larven bis zum L4-Stadium weiter und vergruben sich anschließend zur Verpuppung in der Erde der Pflanzschalen. Nach durchlaufener Puppenruhe schlüpfen die Jungkäfer aus dem Boden.

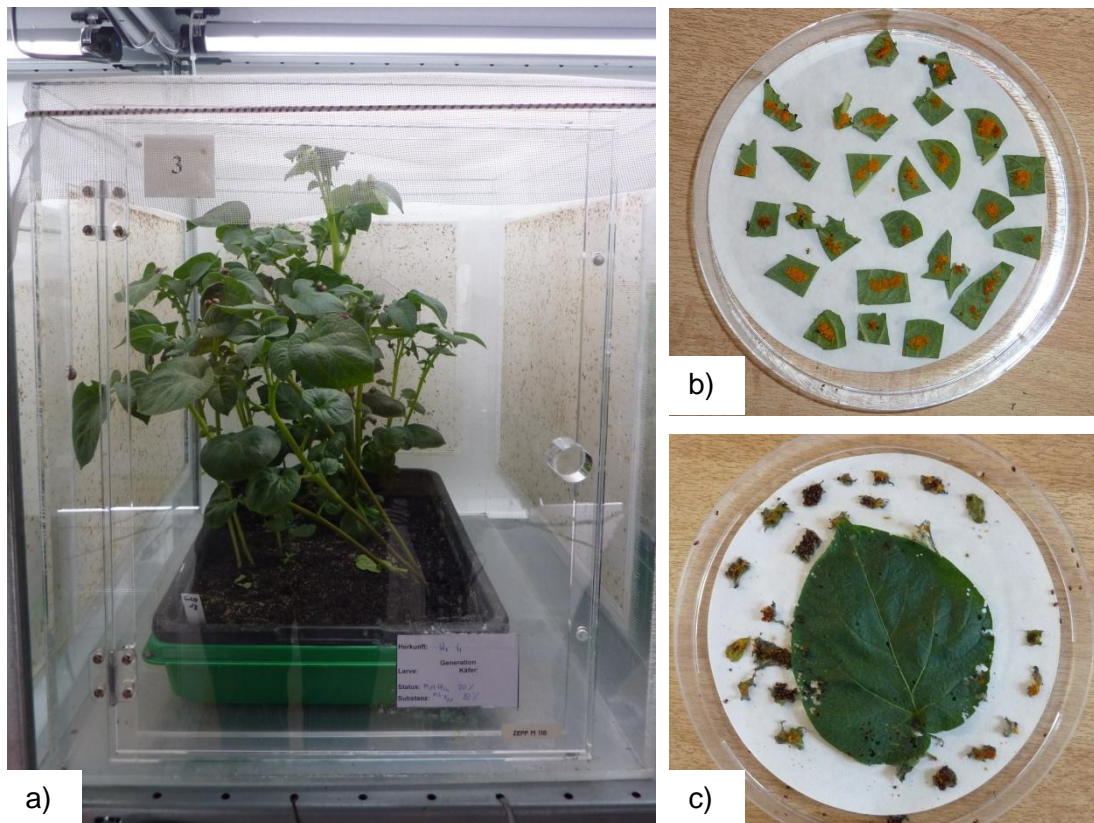


Abbildung 1: Unterschiedliche Entwicklungsstadien des Kartoffelkäfers im Zuchttraum

- a) Zuchtkäfig aus Plexiglas mit adulten Kartoffelkäfern
- b) Kartoffelkäfer-Eigelege auf befeuchtem Rundfilter in einer Petrischale
- c) Frisch geschlüpfte Kartoffelkäferlarven in einer Petrischale

Das Pflanzenmaterial in den Zuchtkäfigen wurde je nach Bedarf erneuert. Neben Kartoffelpflanzen wurden insbesondere im Herbst Auberginenpflanzen für die Fütterung der Kartoffelkäfer verwendet. Die Pflanzenanzucht erfolgte in Kunststofftöpfen bzw. Pikierkisten, die je nach Jahreszeit entweder im Gewächshaus oder im Freiland aufgestellt wurden.

Die Tiere wurden unter künstlicher Belichtung (Biolux, 30 Watt, Osram) bei einem Tag-Nachtrhythmus von 16:8 Stunden gehalten. Um eine optimale Entwicklung sowohl der adulten Käfer als auch der Larven zu gewährleisten, wurde eine mittlere Temperatur von 22 ± 2 °C und eine relative Luftfeuchtigkeit von 60 - 75 % im Zuchttraum angestrebt. Die Klimabedingungen wurden fortlaufend mit Datenloggern (TV-4500 TinyView, BMC) an unterschiedlichen Stellen im Zuchttraum überwacht und dokumentiert. Unter diesen Klimabedingungen wurde eine Diapause der Kartoffelkäfer verhindert, sodass sich etwa 7 Generationen pro Jahr entwickeln konnten.

1.2 Selektionsexperimente

Mit der Population Mz-H wurden Selektionsexperimente zur Resistenzentwicklung durchgeführt. Hierfür wurden Junglarven im L1/L2-Stadium mit dem Produkt Karate Zeon (100 g/l Lambda-Cyhalothrin, Wirkstoffklasse: Pyrethroide) für die Dauer von 48 Stunden in Kontakt gebracht. Durch eine Behandlung zu unterschiedlichen Zeitpunkten wurden verschiedene Zuchtlinien entwickelt. Hierbei blieb die Ursprungspopulation als unbehandelte Zuchtlinie erhalten und diente als Referenz. In Abbildung 2 ist das Zuchtschema für die Population Mz-H dargestellt. Einzelne Zuchtlinien konnten nicht fortgeführt werden, weil die Anzahl erschienener Jungkäfer zu gering war. Zusätzlich wurden bestimmte Linien aus arbeitswirtschaftlichen Gründen aufgegeben.

Die Behandlungen der Kartoffelkäferlarven wurden in Anlehnung an die Methode Nr. 7 des Insecticide Resistance Action Committee (IRAC) zur Resistenzuntersuchung bei blattfressenden Schmetterlingen und Käfern durchgeführt (IRAC, 2014). Zunächst wurden Kartoffelblätter, vorzugsweise der Sorte Cilena, in eine Insektizidlösung getaucht. Nach dem Abtrocknen der Blätter wurden diese in Petrischalen gelegt, die mit einem Rundfilter (Rotilabo®-Rundfilter, Typ 111A, ø 125 mm, Roth) versehen waren. Auf die behandelten Blätter wurden anschließend 20 - 25 Junglarven (L1/2-Stadium) gesetzt. Die Petrischalen wurden bei etwa 20 °C in einer Klimakammer aufbewahrt, bevor nach 48 Stunden die Mortalität der Larven bestimmt wurde. Überlebende Larven wurden für die Weiterzucht verwendet und auf eine Kartoffelpflanze in einen Zuchtkäfig gegeben, in dem sie ihre weitere Entwicklung durchliefen.

Als Dosierung wurden zunächst 0,375 ppm Lambda-Cyhalothrin gewählt, was 2 % der Feldaufwandmenge von Karate Zeon bei einem Wasseraufwand von 400 l/ha entspricht und die LD₄₀ der Ausgangspopulation aus dem Freiland darstellt. Dieser Wert kennzeichnet die Dosis, die für 40 % der behandelten Individuen tödlich wirkt. Die Konzentrationen in den Behandlungen wurden in aufeinanderfolgenden Generationen stufenweise gesteigert (4 %, 10 %, 20 %, 50 % und 100 % der maximal zugelassenen Feldaufwandmenge von Karate Zeon).

Der Resistenzstatus der Kartoffelkäferpopulationen gegenüber dem Produkt Karate Zeon wurde regelmäßig mit der IRAC-Methode Nr. 7 (IRAC, 2014) untersucht. Dabei wurden 4 - 7 Konzentrationen zwischen 0 und 400 % der Feldaufwandmenge getestet. Die Versuche wurden in 3-4facher Wiederholung zu je 10 Junglarven (L1/2) durchgeführt. Nach einer 48-stündigen Aufbewahrung bei 20 °C wurde die Mortalität der Larven bestimmt. Hierbei wurde zwischen lebenden und toten bzw. beeinträchtigten Tieren unterschieden. Als beeinträchtigt galten Larven, die eine anormale Reaktion auf Stimulation oder ein anormales Wachstum zeigten. Auf Grundlage der Boniturdaten wurden sowohl die LD₅₀- und LD₉₀-Werte mittels Probit-Analyse (Finney, 1971) als auch der Wirkungsgrad der Felddrate (maximal zugelassene Aufwandmenge) berechnet. Die Berechnungen wurden mit der Software XLSTAT (Version 2012.1.02) ausgeführt. Zusätzlich wurden einzelne Tiere verschiedener Zuchtlinien und Generationen in Anlehnung an Nauen *et al.* (2012) mittels Pyrosequenzierung auf das Vorhandensein der *kdr*-Mutation L1014F untersucht.

Neben den Selektionsexperimenten zur Resistenzentwicklung wurden Untersuchungen zur Resistenzrückentwicklung durchgeführt. Hierfür wurde die Pyrethroid-resistente Population P01-01 verwendet. Entsprechend der Selektionsexperimente zur Resistenzentwicklung wurden die Larven dieser Population mit dem Produkt Actara (250 g/kg Thiamethoxam, Wirkstoffklasse Neonicotinoide) behandelt, wodurch verschiedene Zuchtlinien entwickelt wurden. Auch in diesem Fall blieb die Ausgangspopulation in Form der unbehandelten Zuchtlinie erhalten (Abbildung 3). Die in den Behandlungen verwendete Dosis lag bei 0,5 ppm Thiamethoxam und entspricht 1 % der Feldaufwandmenge von Actara bei einem Wasseraufwand von 400 l/ha. Diese Dosis reicht aus um 40 % der Individuen der Ausgangspopulation abzutöten (LD₄₀). Im Gegensatz zu den Untersuchungen zur Resistenzentwicklung blieb die Konzentration des verwendeten Insektizids im Laufe der Behandlungen gleich. Der Resistenzstatus der Tiere gegenüber den Produkten Karate Zeon und Actara wurde wie oben beschrieben regelmäßig mittels IRAC-Methode Nr. 7 bestimmt.

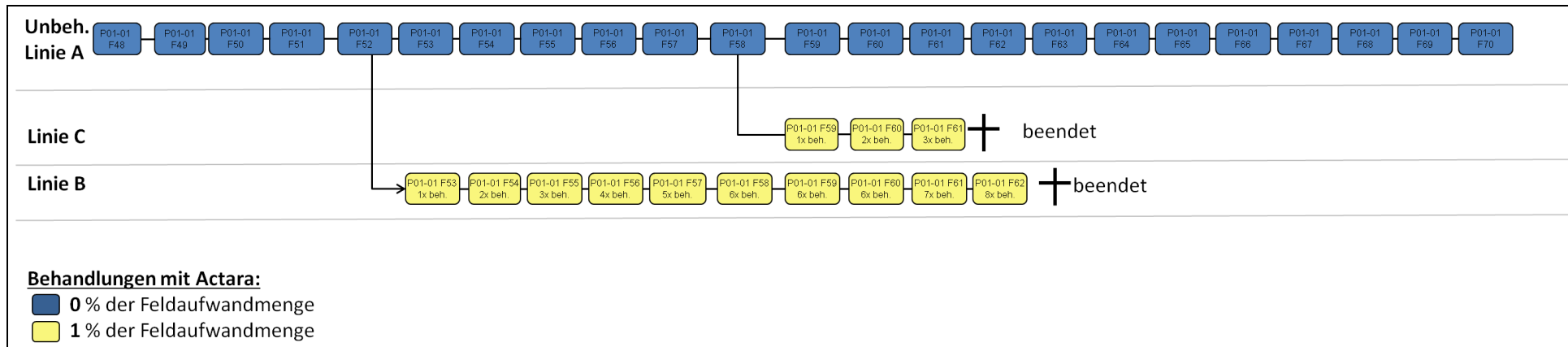


Abbildung 3: Zuchtschema für die Population P01-01

unbeh. = unbehandelt

beh. = behandelt

Zusätzlich wurden Untersuchungen zur Resistenzrückentwicklung unter Verwendung von biologischen Insektiziden durchgeführt. Hierfür wurde die selektierte, hochresistente Zuchtlinie Mz-H F (F₁₈) der Population Mz-H verwendet, die in Kontakt mit den Produkten NeemAzal-T/S (10,6 g/l Azadirachtin) und Novodor FC (20 g/kg *Bacillus thuringiensis* subspecies *tenebrionis*, Stamm NB 176, 10.000BTTU/g) gebracht wurde. Zunächst wurde der Resistenzstatus dieser Zuchtlinie gegenüber den beiden Testprodukten mittels IRAC-Methode Nr. 7 untersucht und der LD₄₀-Wert bestimmt. Im Gegensatz zu den Versuchen mit Produkten aus den Wirkstoffklassen der Pyrethroide und Neonicotinoide wurden die Larven den biologischen Präparaten über einen Zeitraum von 2 x 72 Stunden ausgesetzt.

Um die Entwicklung und Sterblichkeit der Larven zu beobachten, wurden sie nach Abschluss der Resistenzuntersuchungen auf unbehandelte Kartoffelblätter umgesetzt. Die Petrischalen wurden solange bei Raumtemperatur im Zuchtraum aufbewahrt bis die Tiere in der Kontrolle das L4-Stadium erreicht hatten.

Behandlungen wurden nur mit dem Produkt NeemAzal-T/S durchgeführt. Sie erfolgten analog zu den Applikationen in den Untersuchungen mit der Population P01-01. Zunächst wurde eine Dosierung von 0,976 ppm Azadirachtin verwendet, die 1,5 % der Feldaufwandmenge von NeemAzal-T/S bei einem Wasseraufwand von 400 l/ha entspricht. Da die erwartete Sterblichkeit von 40 % nicht erreicht wurde, wurden sowohl die Dosierung als auch der Behandlungszeitraum variiert. Die untersuchten Kombinationen können Tabelle 2 entnommen werden.

Tabelle 2: Untersuchte Kombinationen von Konzentration des Insektizids NeemAzal-T/S und Behandlungszeitraum

Konzentration [% der Feldaufwandmenge von NeemAzal-T/S]	Behandlungszeitraum [Tage]
3	4
	5
	6
0,5	1
	2
	3

1.3 Versuche zur Bestimmung der Überlebensrate der Kartoffelkäfer in einzelnen Entwicklungsstadien

In den Versuchen wurde untersucht, wie viele Individuen sich ausgehend von einer bestimmten Anzahl an Eiern zu den verschiedenen Entwicklungsstadien des Kartoffelkäfers weiterentwickeln. Dazu wurde die Zahl der Eier von etwa 10 Eigelegern bestimmt, die anschließend auf eine Kartoffelpflanze in einen Zuchtkäfig gelegt wurden. In regelmäßigen Abständen wurde die Anzahl der vorhandenen Tiere in den verschiedenen Entwicklungsstadien (Junglarve (L1/L2), Altlarve (L3/L4) und Jungkäfer) bestimmt. Dieser Versuch wurde zu verschiedenen Zeitpunkten mit unterschiedlichen Populationen durchgeführt (Tabelle 3).

Tabelle 3: Populationen, die in den Versuchen zur Bestimmung der Überlebensrate verwendet wurden, und Untersuchungszeiträume

Population	Generation	Untersuchungszeitraum
P01-01 (unbehandelte Zuchtlinie A)	F ₅₀	21.09. - 08.11.2011
Mz-H (unbehandelte Zuchtlinie A)	F ₈ und F ₉	29.06. - 12.11.2012
HS	F ₈	30.09. - 18.11.2014

2 Modellentwicklung

Die Entwicklung des Modells SIMRESI zur Abbildung der Resistenzentwicklung erfolgte auf Grundlage von Daten aus den Zuchtexperimenten bzw. Literaturangaben. Es wurden verschiedene Quellen (Argentine *et al.*, 1994; Dowd *et al.*, 1984; Hoy, 1998; Tabashnik, 1990) herangezogen und unterschiedliche Ansätze kombiniert um einen neuen, eigenen Modellansatz zu schaffen.

IV Ergebnisse

1 Gewinnung von Daten zur Modellierung der Insektizidresistenzentwicklung im Labor

1.1 Selektionsexperimente

Durch die wiederholte Behandlung mit einer steigenden Aufwandmenge des Produktes Karate Zeon konnte über die Weiterentwicklung mehrerer Generationen bei der Population Mz-H eine Resistenz gegenüber diesem Insektizid induziert werden. Dies ist daran erkennbar, dass sich die Probit-Kurven mit steigender Dosierung nach rechts verschieben und die LD₅₀-Werte zunehmen. In Abbildung 4 sind die Ergebnisse für verschiedene Zuchtlinien der Population Mz-H getrennt nach Aufwandmenge in der zuletzt erfolgten Behandlung dargestellt. Für die unbehandelte Zuchtlinie A lag die LD₅₀ im Mittel bei 0,218 ppm, während sie nach der Behandlung mit 100 % der Feldaufwandmenge auf durchschnittlich 9,587 ppm Lambda-Cyhalothrin stieg. Dies entspricht einer 44fachen Steigerung. Die LD₅₀-Werte der unbehandelten Zuchtlinie sowie der Behandlungen mit 2 %, 4 %, 10 % und 20 % der Feldaufwandmenge unterschieden sich jeweils signifikant voneinander. Durch die Applikation einer höheren Konzentration von Lambda-Cyhalothrin konnte jedoch keine weitere Zunahme der Resistenz in den nachfolgenden Generationen erreicht werden. Zwischen den LD₅₀-Werten für die Behandlungen mit 20 % und 100 % der Feldrate konnten keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden.

Sowohl in der unbehandelten als auch in den behandelten Zuchtlinien der Population Mz-H konnte die *kdr*-Mutation L1014F in verschiedenen Generationen homozygot nachgewiesen werden.

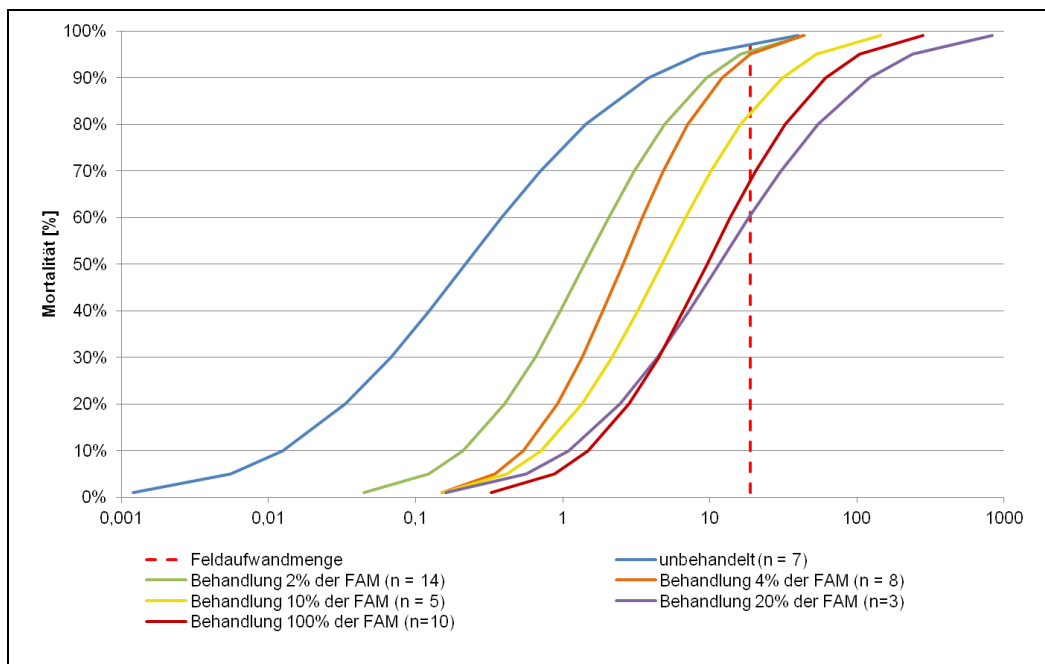


Abbildung 4: Dosis-Wirkungskurven gegenüber dem Produkt Karate Zeon für verschiedene Zuchtlinien der Population Mz-H nach Behandlung mit steigender Aufwandmenge desselben Produktes
 FAM = Feldaufwandmenge

Nachdem die Zuchtlinie B der Population P01-01 in acht verschiedenen Generationen mit dem Produkt Actara behandelt worden ist, konnte in den Selektionsexperimenten zur Resistenzrückentwicklung keine abnehmende Pyrethroidresistenz beobachtet werden. In den Untersuchungen mit dem Insektizid Karate Zeon wurde für die Neonicotinoid-behandelte Zuchtlinie keine eindeutige Verschiebung der Probit-Kurven gegenüber der unbehandelten Linie nach links aufgezeigt (Abbildung 5). Auch der Vergleich der LD₅₀-Werte für die behandelte und unbehandelte Zuchtlinie derselben Generation mittels t-Test gibt keine signifikanten Unterschiede aus. Gleichzeitig gab es keine Hinweise auf eine Resistenzentwicklung gegenüber dem Neonicotinoid Actara.

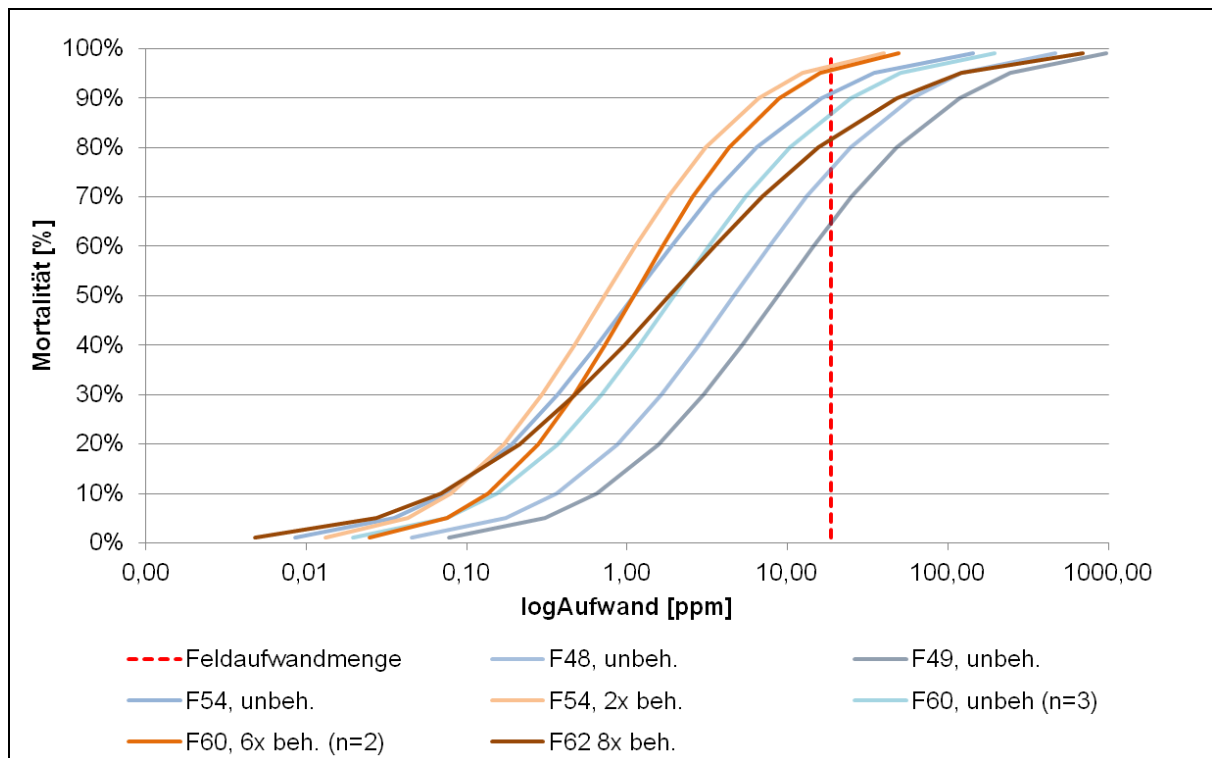


Abbildung 5: Dosis-Wirkungskurven für verschiedene Generationen der Population P01-01 gegenüber dem Produkt Karate Zeon, Vergleich von Zuchtlinien mit und ohne Neonicotinoid-Behandlung
 unbeh. = unbehandelt
 beh. = behandelt

In den Untersuchungen zur Resistenzrückentwicklung unter Verwendung der biologischen Produkte NeemAzal-T/S und Novodor FC konnten keine Ergebnisse erzielt werden, da eine geringe Anzahl überlebender Larven in den Behandlungen und Entwicklungsstörungen eine erfolgreiche Weiterzucht verhinderten.

Nachdem bei der Behandlung mit 1,5 % der Feldaufwandmenge von NeemAzal-T/S nicht die erwartete Mortalität von 40 % der Larven erreicht wurde, wurde die Dosierung auf 3 % der Feldrate bei einem Behandlungszeitraum von 6 Tagen erhöht. Auf diese Weise wurde eine Mortalität von etwa 60 % nach Abschluss der Behandlung erzielt, die allerdings nach dem Umsetzen der überlebenden Larven auf unbehandelte Blätter weiter anstieg und 12 Tage nach Versuchsansatz 92 % erreichte. Eine Reduzierung des Behandlungszeitraums auf 4 Tage führte zu keiner höheren Anzahl überlebender Larven. 14 Tage nach Versuchsansatz betrug ihre Mortalität 94 %. Bei gleichzeitiger Verringerung des Behandlungszeitraums auf einen Tag und Reduzierung der Konzentration des Insektizids auf 0,5 % der Feldaufwandmenge wurde eine Überlebensrate von 98 % direkt nach Abschluss der Behandlung erreicht. Neun Tage später lebten jedoch nur noch 38 % der behandelten Tiere. Neben der hohen Mortalität der Larven über einen längeren Zeitraum nach der Behandlung mit NeemAzal-T/S konnten Entwicklungsstörungen bei den überlebenden Larven beobachtet werden. Während zum Zeitpunkt 13 Tage nach Versuchsansatz nahezu alle Tiere der

unbehandelten Kontrolle das L4-Stadium erreicht hatten, war ihr Anteil in den behandelten Varianten (Behandlungszeitraum 6 Tage) deutlich reduziert (Abbildung 6).

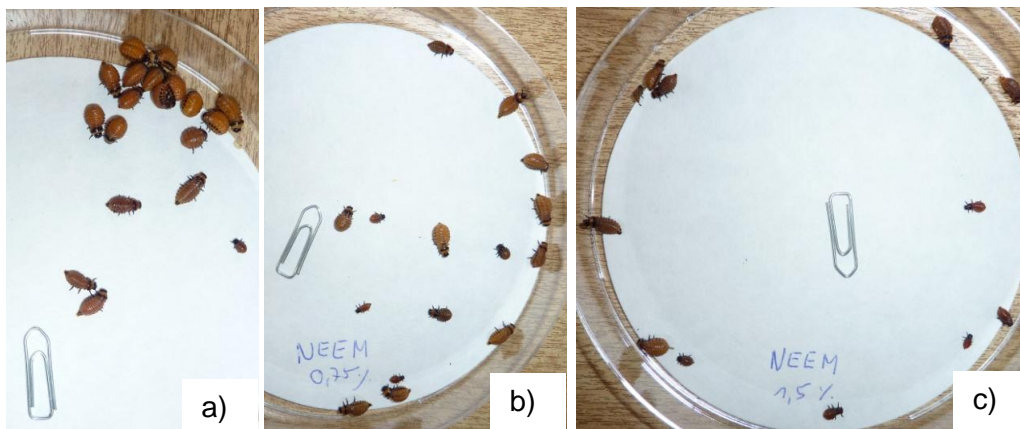


Abbildung 6: Entwicklung von Kartoffelkäferlarven nach Behandlung (Behandlungszeitraum 6 Tage) mit dem Produkt NeemAzal-T/S, 13 Tage nach Versuchsansatz (Zuchtlinie Mz-H F, F₁₈)

- a) Unbehandelte Kontrolle
- b) Behandlung mit 0,75 % der Feldaufwandmenge von NeemAzal-T/S
- c) Behandlung mit 1,5 % der Feldaufwandmenge von NeemAzal-T/S

Beim Produkt Novodor FC lag die mittlere LD₄₀ in den Untersuchungen nach IRAC-Methode Nr. 7 bei 1,761 ppm, was etwa 0,6 % der Feldaufwandmenge des Insektizids bei einer Wasseraufwandmenge von 400 l/ha entspricht. Es zeigte sich, dass die Mortalität der Larven nach den Behandlungen mit diesem Produkt (Behandlungszeitraum 6 Tage) ebenfalls stark zunahm. Beispielsweise lag die Mortalität bei einer Konzentration von 0,3 % der Feldaufwandmenge 6 Tage nach Versuchsbeginn bei 30 % und stieg auf 80 % zum Zeitpunkt 13 Tage nach Versuchsbeginn (Abbildung 7). Die Behandlung führte ebenfalls zu Entwicklungsstörungen bei den Larven (Abbildung 8).

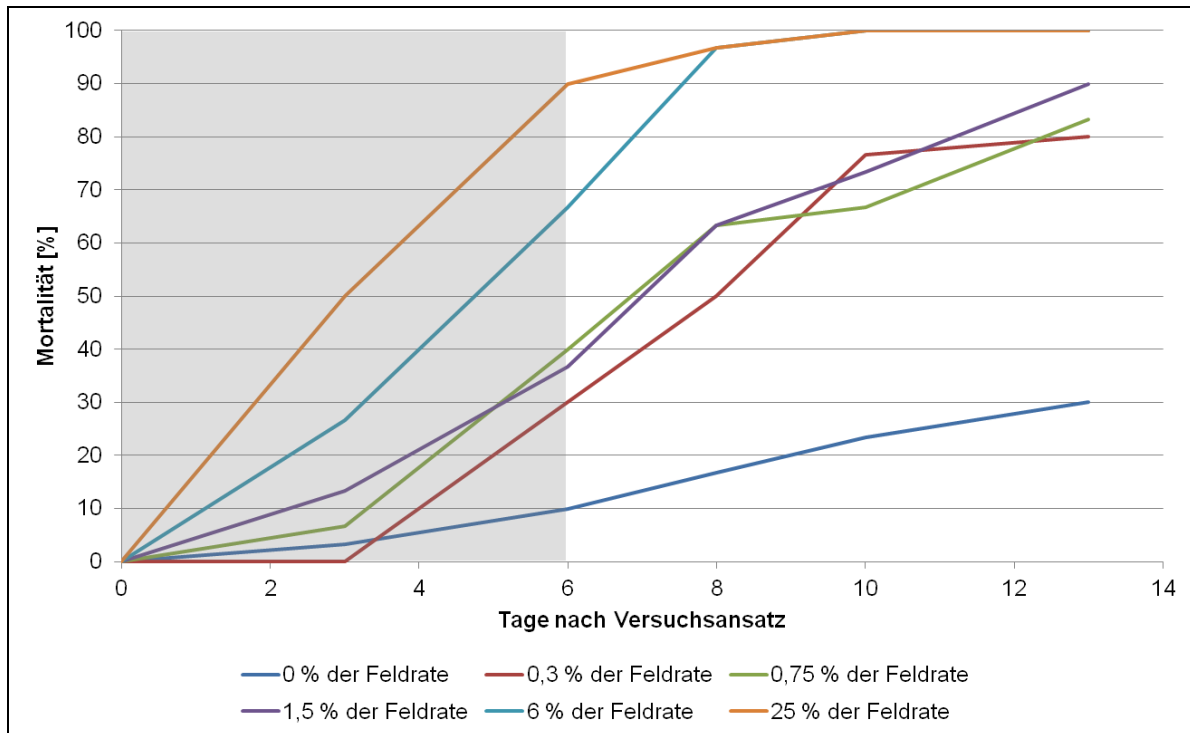


Abbildung 7: Mortalität von Kartoffelkäferlarven der Zuchtlinie Mz-H F (F_{18}) nach Behandlung mit dem Produkt Novodor FC, Behandlungszeitraum 6 Tage

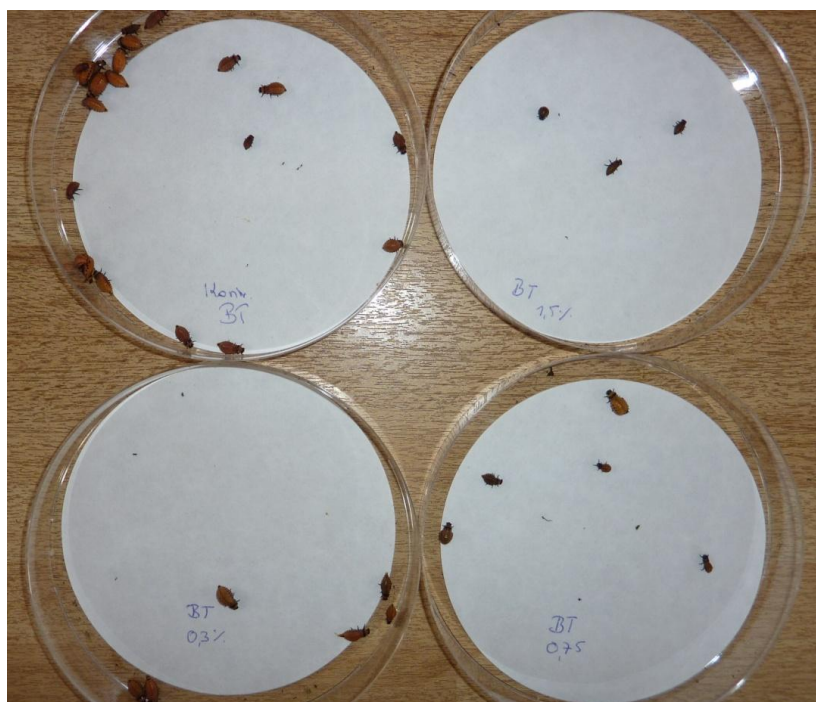


Abbildung 8: Entwicklung von Kartoffelkäferlarven nach Behandlung (Behandlungszeitraum 6 Tage) mit 0,3 %, 0,75 % und 1,5 % der Feldaufwandmenge des Produktes Novodor FC im Vergleich zur unbehandelten Kontrolle, 13 Tage nach Versuchsansatz (Zuchtlinie Mz-H F, F_{18})

1.2 Versuche zur Bestimmung der Überlebenslebensrate der Kartoffelkäfer in einzelnen Entwicklungsstadien

Je nach Zeitpunkt der Versuchsdurchführung und untersuchter Population unterschied sich der Anteil der Eier, aus denen sich Altlarven (L3/L4) und Jungkäfer entwickelten. Bei der Population P01-01 entwickelten sich 48 % der Eier weiter zu Altlarven und 36 % zu Jungkäfern. Bei den übrigen beiden Populationen lagen die Werte etwas höher (Tabelle 4).

Tabelle 4: Ergebnisse der Versuche zur Überlebensrate einzelner Entwicklungsstadien mit verschiedenen Kartoffelkäferpopulationen unter Zuchtbedingungen

Population	Generation	eingesetzter Eier	Anzahl		Anteil (%) Eier entwickelt zu	
			Altlarven (L3/L4)	Jungkäfer	Altlarven (L3/L4)	Jungkäfer
P01-01	F ₅₀	154	73	55	48	36
Mz-H	F ₈	255	171	118	67	46
	F ₉	288	186	100	65	35
HS	F ₈	327	183	154	55	47

2 Erstellung des Expertensystems

2.1 Modell SIMRESI

Es wurde ein neuer, generalisierter Modellansatz entwickelt, der unabhängig von der Insektenart zur Modellierung der Resistenzentwicklung bei (holometabolen) Insekten genutzt werden kann. Dabei wird für jede Generation der Anteil resistenter Individuen in der Population berechnet, der das Resistenzniveau widerspiegelt. Grundlage für die Berechnungen sind Angaben zu den vorangegangenen Insektizidapplikationen. Das Modell SIMRESI ist in Abbildung 9 als Strukturdiagramm nach der Methode von Rossi *et al.* (1997) dargestellt.

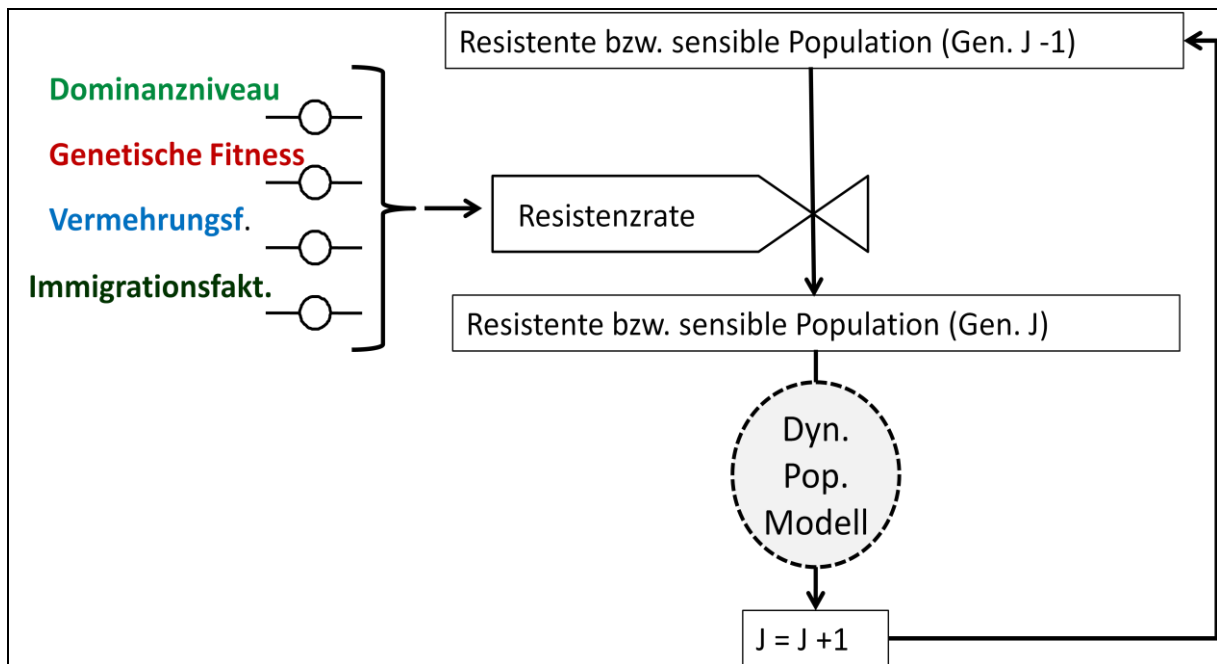


Abbildung 9: Strukturdiagramm für das Modell SIMRESI zur Berechnung des Resistenzniveaus von Insekten
(Erklärung der Symbole siehe Rossi et al. (1997))

Der aktuelle Resistenzstatus (Generation J, Zustandsvariable im Strukturdiagramm) wird ausgehend vom Resistenzniveau des Vorjahres (Generation J-1, Zustandsvariable im Strukturdiagramm) berechnet und ist abhängig von der Resistenzrate (Zustandsänderungsvariable im Strukturdiagramm). Diese wiederum ist eine Funktion der Parameter Dominanzniveau, genetische Fitness, Vermehrungsfaktor und Immigrationsfaktor, die folgendermaßen definiert sind:

$$\text{Dominanzniveau} = \frac{LD50_{(\text{Generation J})}}{LD50_{(\text{resistente Population})}}$$

$$\text{Genetische Fitness} = \frac{\text{Wachstumsrate}_{(\text{resistente Population})}}{\text{Wachstumsrate}_{(\text{sensible Population})}}$$

$$\text{Vermehrungsfaktor} = 1 - \text{Natürliche Mortalität}_{(\text{resistente Population})}$$

Immigrationsfaktor: 1 bei intensivem Anbau und homogener Population

Mit Hilfe eines dynamischen Populationsmodells kann außerdem die Anzahl möglicher Generationen und Behandlungen berechnet werden. Zur Bestimmung der Parameter, die die Resistenzrate beeinflussen, sind jeweils eine sensible und eine resistente Referenzpopulation erforderlich.

Die Entwicklung des Anteils resistenter Individuen in der Population im Verhältnis zu einer vollständig sensiblen Population wird folgendermaßen berechnet:

$$\text{Anteil resistente Population}_{(j)} = \text{Resistenzrate} * (j - 1)$$

$$\text{Anteil sensible Population}_{(j)}$$

$$= \text{Anteil sensible Population}_{(j-1)} - \text{Anteil resistente Population}_{(j)}$$

wobei:

$$\begin{aligned} \text{Resistenzrate} = & \text{Dominanzniveau} * \text{genetische Fitness} * \text{Vermehrungsfaktor} \\ & * \text{Immigrationsfaktor} \end{aligned}$$

Beispiel zur Berechnung des Anteils resistenter bzw. sensibler Individuen in einer Population für die Generation $J = 2$:

Anfangsbedingungen:

$$\text{Dominanzniveau} = 0,01$$

$$\text{Genetische Fitness} = 0,5$$

$$\text{Vermehrungsfaktor} = 0,5$$

$$\text{Immigrationsfaktor} = 1 \text{ (1 bedeutet in diesem Fall: keine Immigration)}$$

$$\text{Anteil sensibler Individuen in der Population (J-1)} = 100 \%$$

daraus ergibt sich:

$$\text{Resistenzrate} = 0,01 * 0,5 * 0,5 * 1 = 0,0025$$

$$\text{Anteil resistente Population}_{(2)} = 0,0025 * (2 - 1) = 0,0025 = 0,25\%$$

$$\text{Anteil sensible Population}_{(2)} = 100\% - 0,25\% = 99,75\%$$

Dies bedeutet, dass sich die Population zu 0,25 % aus resistenten Individuen und zu 99,75 % aus sensiblen Tieren zusammensetzt.

In einem ersten Schritt der Modellerstellung wurde die Entwicklung des Anteil der resistenten Individuen in der Population mit den möglichen Kombinationen der Parameter Dominanzniveau (0,01 bis 0,5), genetische Fitness (0,1 bis 1,0) und Vermehrungsfaktor (0,01 bis 1,0) berechnet (Beispiel siehe Abbildung 10).

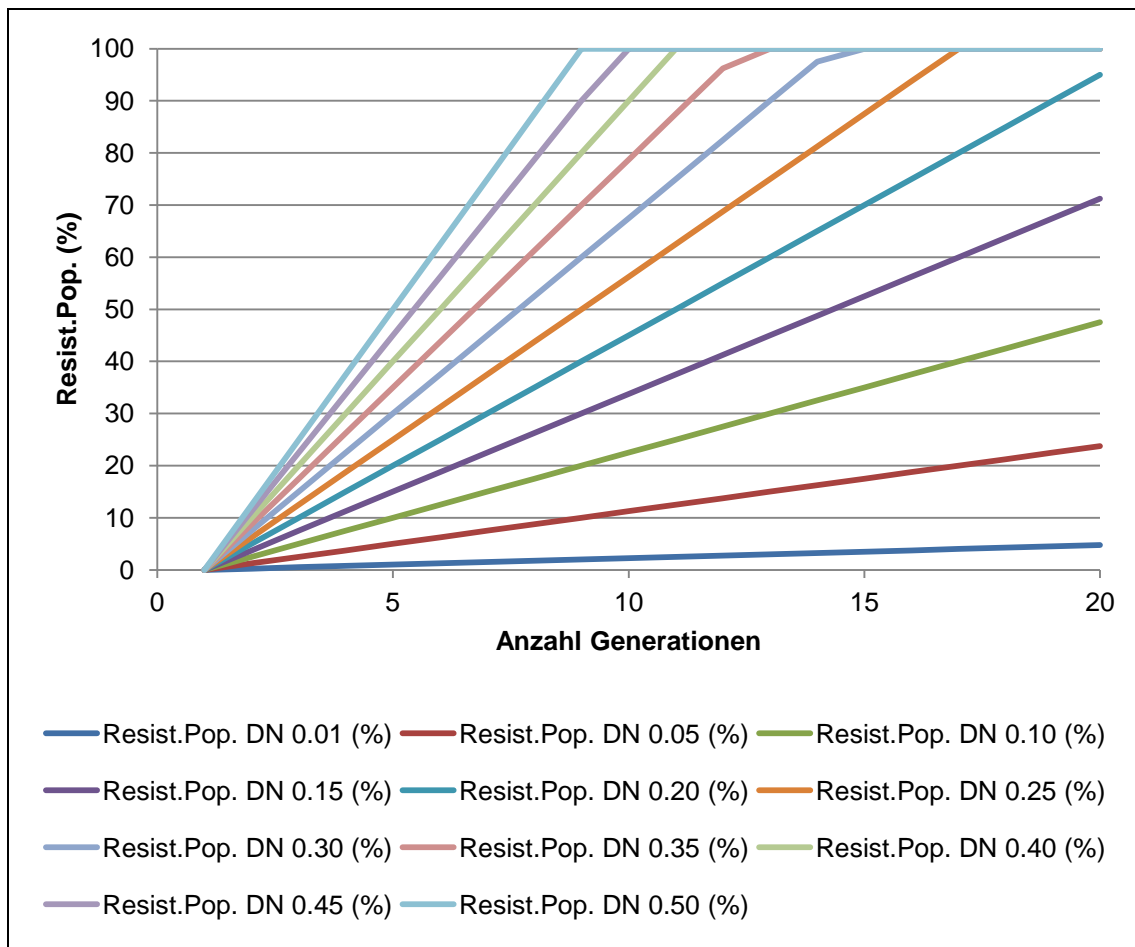


Abbildung 10: Berechneter Anteil resistenter Individuen in einer Population (Resist.Pop), Anfangsbedingungen: Dominanzniveau (DN) = 0,01 – 0,5; genetische Fitness = 0,5; Vermehrungsfaktor = 0,5

Die berechneten Daten wurden anschließend mit Hilfe einer doppelten Chapman-Funktion angepasst (Abbildung 11):

Anteil resistente Population

$$= 100 * ((1 - EXP(-(b * Dominanzniveau))^a) * ((1 - EXP(-(c * Generationen)))^d))$$

wobei a, b, c, und d = Formparameter

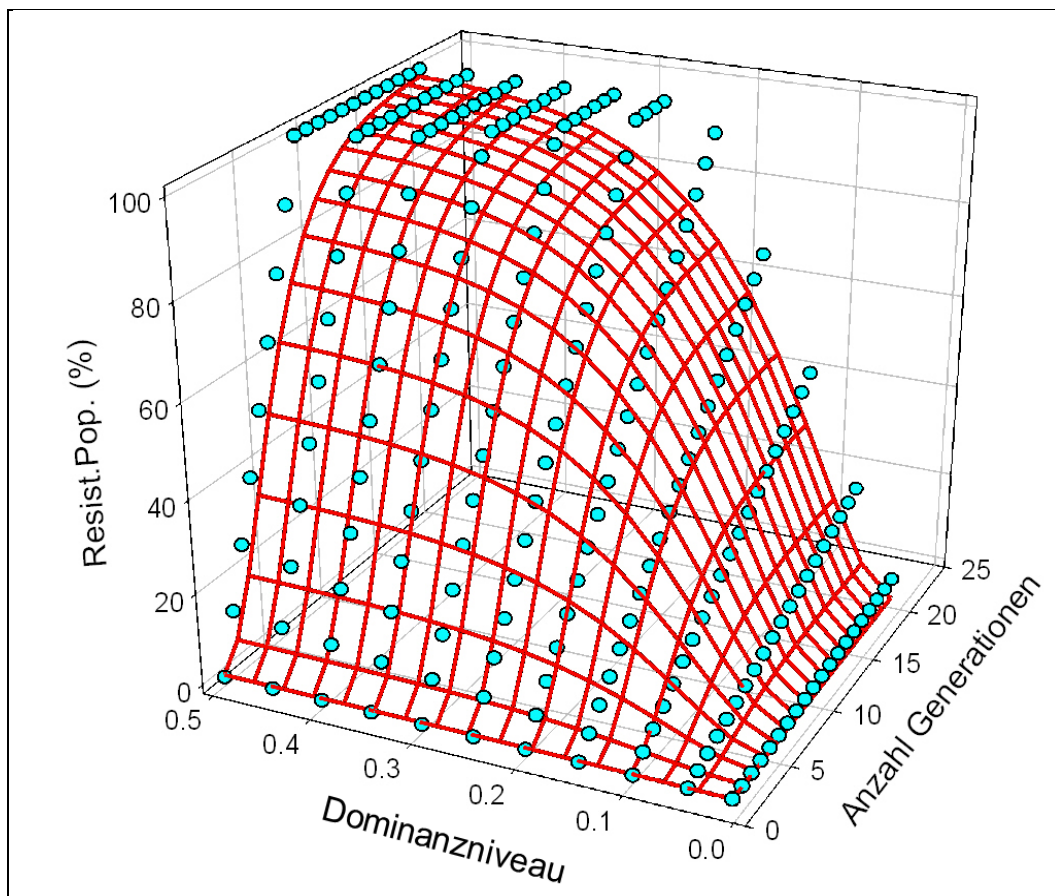


Abbildung 11: Modellierung des berechneten Anteils resistenter Individuen in einer Population (Resist. Pop.), Anfangsbedingungen: Dominanzniveau = 0,01 – 0,5; genetische Fitness = 0,5; Vermehrungsfaktor = 0,5

Ingesamt wurde die doppelte Chapman-Funktion für 30 Kombinationen der Parameter Dominanzniveau (0,01 - 0,5), genetische Fitness (0,1 - 0,9) und Vermehrungsfaktor (0,1 - 0,9) berechnet (Tabelle 5).

Tabelle 5: Parameter der Chapman-Funktion für 30 Kombinationen der Faktoren der Resistenzrate (Alle Formparameter a, b, c, und d signifikant mit $\alpha=0,05$)

Dominanz- niveau	Vermehrungs- faktor	genetische Fitness	Formparameter			
			a	b	c	d
0.01-0.5	0.1	0.01	1.347	0.031	0.056	1.008
0.01-0.5	0.1	0.1	1.394	0.036	0.619	1.095
0.01-0.5	0.1	0.3	1.603	0.059	1.694	1.282
0.01-0.5	0.1	0.5	1.864	0.084	2.710	1.488
0.01-0.5	0.1	0.7	2.193	0.110	3.785	1.740
0.01-0.5	0.1	0.9	2.618	0.140	4.957	2.054
0.01-0.5	0.3	0.01	1.351	0.031	0.178	1.026
0.01-0.5	0.3	0.1	1.603	0.059	1.694	1.282
0.01-0.5	0.3	0.3	2.618	0.140	4.957	2.054
0.01-0.5	0.3	0.5	3.881	0.228	8.284	2.855
0.01-0.5	0.3	0.7	4.140	0.286	10.303	2.815
0.01-0.5	0.3	0.9	4.108	0.331	11.765	2.591
0.01-0.5	0.5	0.01	1.359	0.032	0.306	1.046
0.01-0.5	0.5	0.1	1.864	0.084	2.710	1.488
0.01-0.5	0.5	0.3	3.881	0.228	8.284	2.855
0.01-0.5	0.5	0.5	4.145	0.318	11.289	2.662
0.01-0.5	0.5	0.7	4.030	0.383	13.407	2.330
0.01-0.5	0.5	0.9	4.007	0.443	15.172	2.096
0.01-0.5	0.7	0.01	1.371	0.034	0.434	1.065
0.01-0.5	0.7	0.1	2.193	0.110	3.785	1.740
0.01-0.5	0.7	0.3	4.140	0.286	10.303	2.815
0.01-0.5	0.7	0.5	4.030	0.383	13.407	2.330
0.01-0.5	0.7	0.7	4.029	0.467	15.794	2.012
0.01-0.5	0.7	0.9	4.138	0.545	17.932	1.802
0.01-0.5	0.9	0.01	1.386	0.035	0.558	1.085
0.01-0.5	0.9	0.1	2.618	0.140	4.957	2.054
0.01-0.5	0.9	0.3	4.108	0.331	11.765	2.591
0.01-0.5	0.9	0.5	4.007	0.443	15.172	2.096
0.01-0.5	0.9	0.7	4.138	0.545	17.932	1.802
0.01-0.5	0.9	0.9	4.526	0.654	19.614	1.545

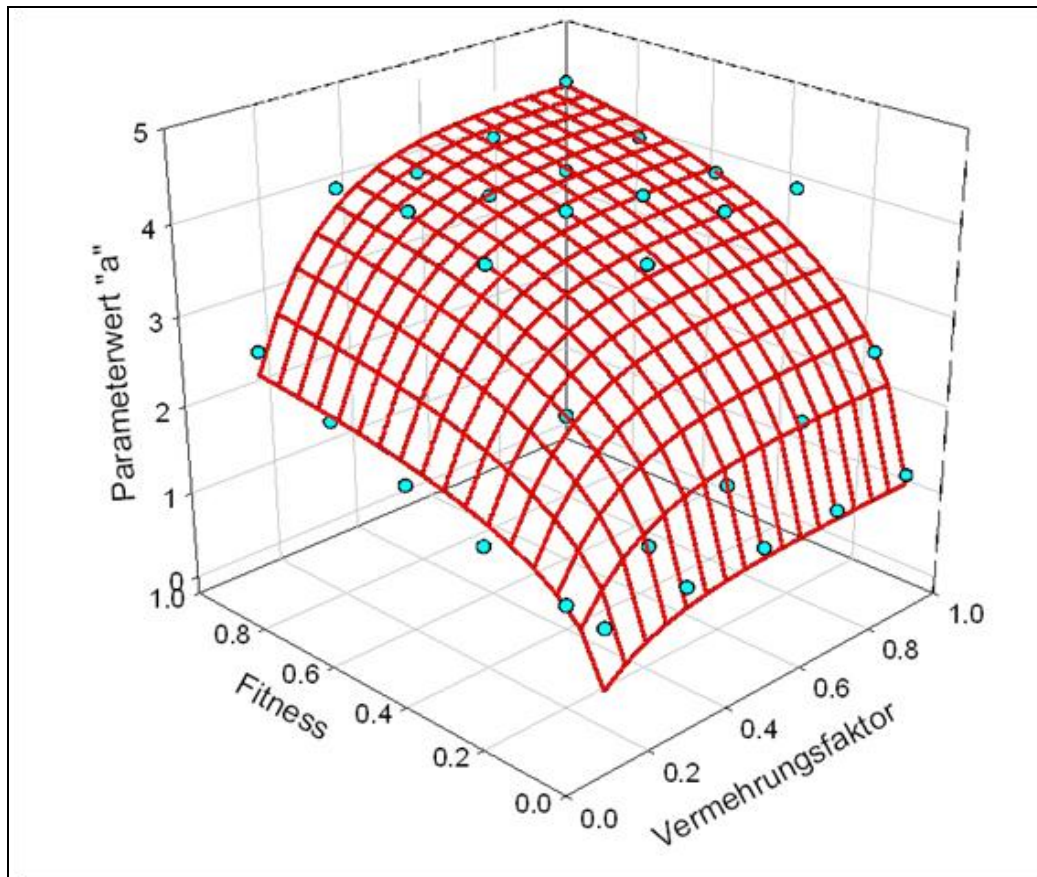


Abbildung 12: Modellierter Formparameter „a“ in Abhängigkeit von der genetischen Fitness und dem Vermehrungsfaktor

Um das Modell flexibler handhaben zu können, wurden neben den Eingabeparametern Dominanzniveau, genetische Fitness und Vermehrungsfaktor auch die Parameter a, b, c und d der Chapman-Formel mittels einer Gauß-Funktion (Parameter a, b und c) bzw. einer polynomischen Funktion (Parameter d) modelliert (Abbildung 12):

$$Par.a = a_max * ((1 - EXP(-(a1 * V.Faktor)))^{b1}) * ((1 - EXP(-(c1 * Fitness)))^{d1})$$

$$Par.b = b_max * ((1 - EXP(-(a2 * V.Faktor)))^{b2}) * ((1 - EXP(-(c2 * Fitness)))^{d2})$$

$$Par.c = c_max * ((1 - EXP(-(a3 * V.Faktor)))^{b3}) * ((1 - EXP(-(c3 * Fitness)))^{d3})$$

$$Par.d = d_0 + a4 * V.Faktor + b4 * Fitness + c1 * V.Faktor^2 + d3 * Fitness^2 + e3 * V.Faktor^3 + f3 * Fitness^3$$

Wobei:

a_max, b_max, c_max, d_0, a1, a2, a3, a4, b1, b2, b3, b4, c1, d3, e3 und f3
= Formparameter

Die Berechnung des Anteils der resistenten Individuen in einer Population in Abhängigkeit von der Generation (J) erfolgt folgendermaßen (Abbildung 13):

$$Anteil\ resistente\ Population\ [\%] = 100 * ((1 - EXP(-(Par.b * J)))^{Par.a}) * ((1 - EXP(-(Par.c * Dominanzniveau)))^{Par.d}) * Immigr.Faktor$$

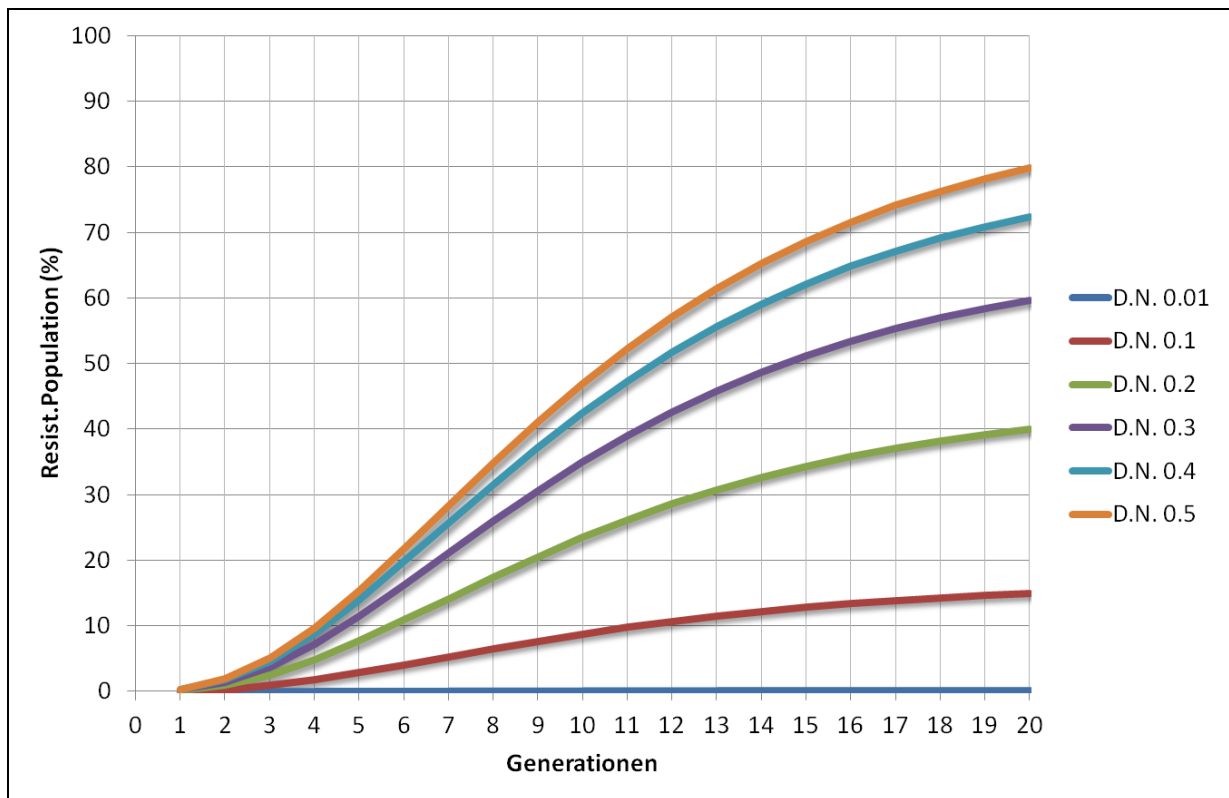


Abbildung 13: SIMRESI-Modelloutput mit den Anfangswerten genetische Fitness = 0,2; Vermehrungsfaktor = 0,2 und Dominanzniveau (D.N.) = 0,01; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4 und 0,5
Resist. Population = Anteil resistenter Individuen in der Population

2.2 Parametrisierung des Modells SIMRESI für Kartoffelkäfer

Der entwickelte Modellansatz (vgl. 2.1) wurde für Kartoffelkäfer parametrisiert. Grundlage hierfür waren die Ergebnisse der beschriebenen Selektionsexperimente sowie der Versuche zur Überlebensrate einzelner Entwicklungsstadien des Kartoffelkäfers (vgl. 1.1 und 1.2) und Angaben aus der Literatur. Tabelle 6 listet die Untersuchungen auf, die zur Anpassung der einzelnen Parameter an die Resistenzentwicklung des Kartoffelkäfers genutzt wurden. Für den Immigrationsfaktor wurde der Wert 1 (= keine Immigration) angesetzt, da davon ausgegangen wird, dass in abgeschlossenen, intensiven Kartoffelanbaugebieten keine nennenswerte Einwanderung von Kartoffelkäfern stattfindet. Somit werden auch keine neuen Eigenschaften hinsichtlich der Pyrethroidresistenz in die vorhandene Kartoffelkäferpopulation eingekreuzt.

Tabelle 6: Durchgeführte Untersuchungen, die zur Parametrisierung des Modells SIMRESI für Kartoffelkäfer genutzt wurden

Parameter	Zugrunde liegende Untersuchungen
Dominanzniveau	Selektionsexperimente
Genetische Fitness	Versuche zur Überlebensrate verschiedener Entwicklungsstadien des Kartoffelkäfers
Vermehrungsrate	Literaturdaten, eigene Versuche außerhalb des Projektes (Überwinterungsversuche)

Die unbehandelte Zuchtlinie A der Population P01-01, die eine Pyrethroidresistenz stabil ausprägt, wurde als Referenz verwendet. Für die mittlere LD_{50} aus sechs Versuchen in unterschiedlichen Generationen wurde ein Wert von 2,799 ppm Lambda-Cyhalothrin berechnet.

Da in den Selektionsexperimenten zur Resistenzentwicklung mit unterschiedlichen Dosierungen gearbeitet wurde, kann das Dominanzniveau in Abhängigkeit von der verwendeten Aufwandmenge berechnet und modelliert werden (Abbildung 14). Bei einer Insektizidapplikation auf dem Feld sind die Kartoffelkäfer unterschiedlichen Dosierungen des Pflanzenschutzmittels ausgesetzt, je nachdem wo sie sich im Pflanzenbestand aufhalten. Die Tiere auf den oberen Blättern sind der vollen Aufwandmenge ausgesetzt, während die Larven auf den unteren Blättern mit geringeren Mengen des Insektizids in Kontakt kommen. Um diese Unterschiede im Modell zu berücksichtigen, wird das Dominanzniveau auf einen Wert von 0,605 festgelegt. Dies entspricht der Steigung der Modellfunktion (Abbildung 14).

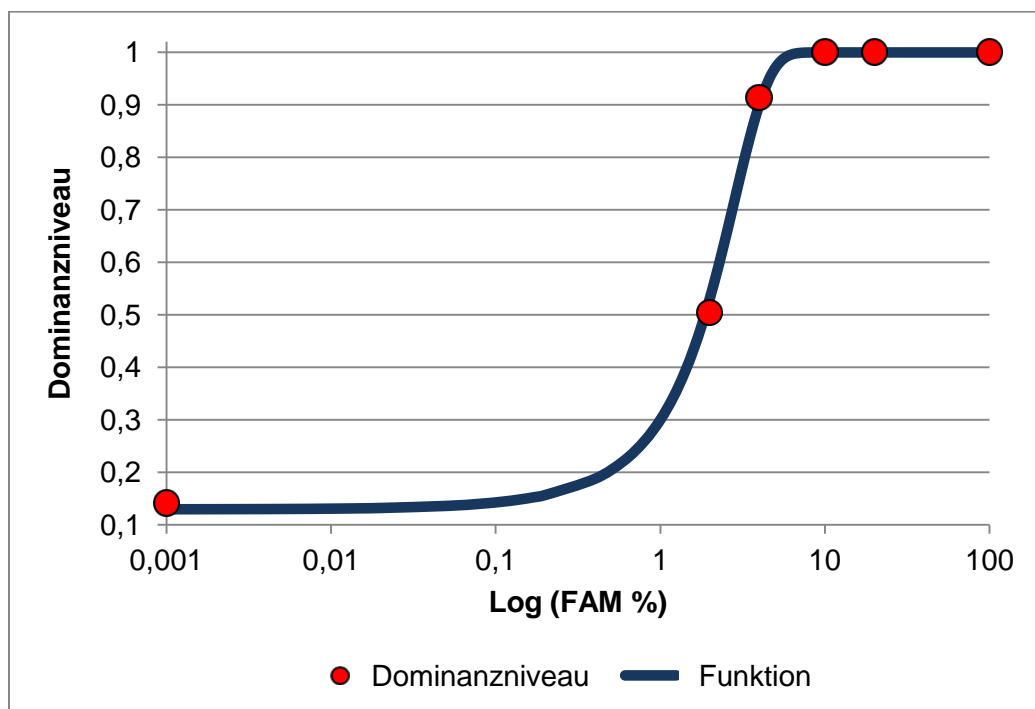


Abbildung 14: Modelliertes Dominanzniveau für die Population Mz-H bei Verwendung des Produktes Karate Zeon, Referenzpopulation: unbehandelte Linie der Population P01-01, $LD_{50} = 0,779$ ppm
 FAM = Feldaufwandmenge

Grundlage für die Berechnung des Parameters genetische Fitness waren die Ergebnisse der durchgeführten Versuche zur Bestimmung der Überlebensrate einzelner Entwicklungsstadien des Kartoffelkäfers (vgl. 1.2). In Tabelle 5 sind die Wachstumsraten der als Referenz verwendeten unbehandelten Zuchtlinie A (F_{50}) der Population P01-01, sowie der unbehandelten Linie A (F_8 und F_9) der Population Mz-H und der sensiblen Population HS

(F₈) dargestellt. Die Wachstumsrate ist der Quotient aus der Anzahl beobachteter Individuen pro Entwicklungsstadium und der Anzahl im Versuch eingesetzter Eier. Die genetische Fitness der adulten Käfer der Testpopulation ergibt sich durch Division der Wachstumsrate der resistenten Population P01-01 (unbehandelte Zuchtlinie A) durch die Wachstumsrate der Testpopulation. Sie beträgt für die unbehandelte Zuchtlinie A der Population Mz-H 0,88 und für die sensible Population HS 0,76.

Tabelle 7: Berechnete Wachstumsraten für unterschiedliche Entwicklungsstadien und daraus resultierende genetische Fitness für die adulten Käfer der Populationen Mz-H (unbehandelte Zuchtlinie A, F₈ + F₉) und HS (F₈); Referenz: unbehandelte Zuchtlinie A (F₅₀) der Population P01-01

Population/ Zuchtlinie	Wachstumsrate			Genetische Fitness (Käfer)
	L1-L2 Larve	L3-L4 Larve	Käfer	
P01-01 A, F ₅₀	0,58	0,47	0,36	
Mz-H A Mittelwert aus F ₈ und F ₉	0,60	0,66	0,40	0,88
HS, F ₈		0,56	0,47	0,76

Aus Literaturdaten und langjährigen Ergebnissen von eigenen Überwinterungsversuchen wurde eine mittlere natürliche Mortalität des Kartoffelkäfers von 86 % ermittelt. Auf dieser Grundlage wurde der entsprechende Vermehrungsfaktor auf einen Wert von 0,14 festgelegt.

2.3 Modellnutzungskonzept für das Modell SIMRESI

Das Modell SIMRESI in einer Anpassung an die Pyrethroidresistenz des Kartoffelkäfers ist Bestandteil des Expertensystems SIMLEP-Res, mit dem die Insektizidstrategie zur Bekämpfung dieses Schädling unter Berücksichtigung der Resistenzentwicklung geplant werden kann. Es dient dazu, mögliche Auswirkungen einer Pyrethroidapplikation auf die Entwicklung des Resistenzniveaus gegenüber dieser Wirkstoffklasse aufzuzeigen und Unterstützung bei der Wahl eines geeigneten Insektizids zu geben. Dabei wird kein Produkt empfohlen, sondern lediglich das Risiko einer (weiteren) Resistenzentwicklung bei Applikation eines Pyrethroids bewertet.

Im Modell SIMRESI wird davon ausgegangen, dass jede Generation des Kartoffelkäfers nur einmal mit einem Insektizid behandelt wird. Da in den Selektionsexperimenten zur Untersuchung einer Resistenzrückentwicklung keine Abnahme des Resistenzstatus beobachtet wurde, wird angenommen, dass bei einem Wirkstoffwechsel der Resistenzstatus gegenüber Pyrethroiden unverändert bleibt. Als maximal tolerierbarer Grenzwert wurde ein Anteil von 20 % resistenter Individuen in einer Population festgelegt.

Das Modell SIMRESI ermöglicht eine Berechnung des aktuellen Resistenzniveaus einer Kartoffelkäferpopulation. Hierfür sind lediglich Angaben zu den Insektizideinsätzen (Anzahl durchgeführter Behandlungen, Pyrethroidanwendung ja/nein) in den letzten fünf Jahren notwendig. Falls diese Angaben nicht vorliegen, kann mit Hilfe der Modelle SIMLEP1-Start und SIMLEP3 (Racca et al., 2014) die Anzahl möglicher Kartoffelkäfergenerationen und Behandlungen pro Jahr simuliert werden. Jeder möglichen Behandlung kann dann eine Pyrethroidapplikation zugeordnet werden. Die Simulationen können für einzelne Jahre oder den gesamten Fünf-Jahreszeitraum durchgeführt werden. Bei diesen Berechnungen wird jeweils davon ausgegangen, dass das Resistenzniveau der Population zu Beginn des Fünf-Jahreszeitraums bei 0 % resistenter Individuen in der Population liegt. Es ist aber auch möglich eventuell vorliegende Ergebnisse von Resistenzuntersuchungen zu berücksichtigen und das Ausgangsresistenzniveau mittels einer inversen Funktion entsprechend zu korrigieren. Die verschiedenen Verfahren zur Berechnung des aktuellen Resistenzniveaus können miteinander kombiniert werden, sodass die Bildung von Szenarien ermöglicht wird. In Abbildung 15 und Abbildung 16 sind zwei hypothetische Szenarien dargestellt.

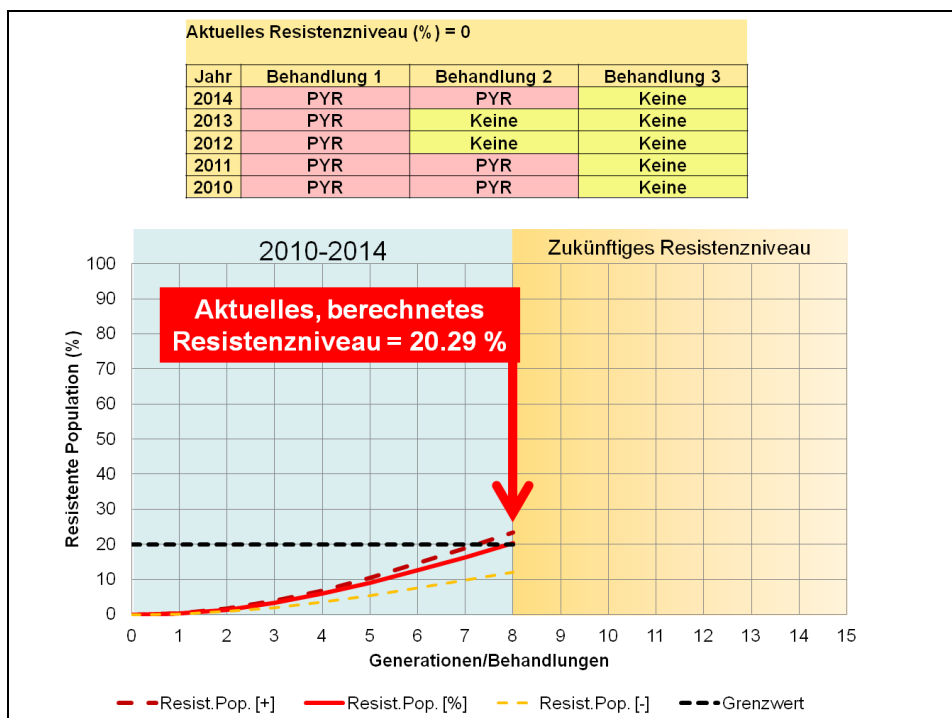


Abbildung 15: Simulierter Anteil resistenter Individuen in einer Kartoffelkäferpopulation bei neunmaliger Pyrethroidanwendung in den letzten fünf Jahren

Verwendete Parameter: Dominanzniveau = 0,605; genetische Fitness = 0,395;
 Vermehrungsfaktor: 0,14; Immigrationsfaktor = 1
 PYR = Pyrethroid

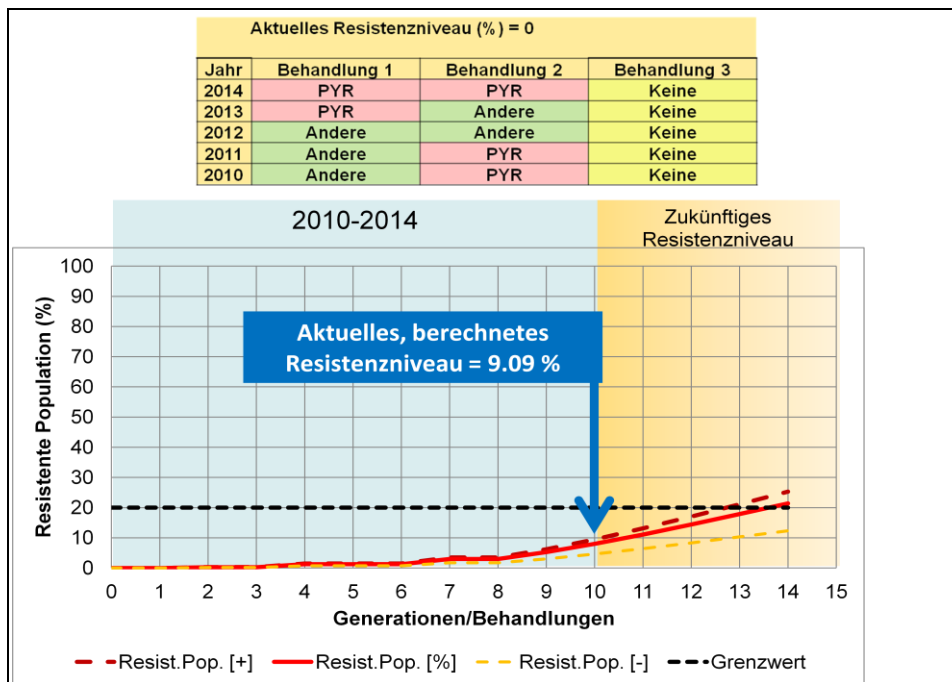


Abbildung 16: Simulierter Anteil resistenter Individuen in einer Kartoffelkäferpopulation bei bekannter Anzahl von Pyrethroidanwendungen in den letzten fünf Jahren
 Verwendete Parameter: Dominanzniveau = 0,605; genetische Fitness = 0,395;
 Vermehrungsfaktor: 0,14; Immigrationsfaktor =1
 PYR = Pyrethroid

2.4 Umsetzung des Expertensystems SIMLEP-Res im Onlineportal ISIP

Das Expertensystem SIMLEP-Res ist auf der Website des Informationssystems Integrierte Pflanzenproduktion (ISIP) (www.isip.de) im Internet verfügbar und umfasst die Modelle SIMLEP1-Start, SIMLEP3 und SIMRESI. Durch die Kombination der verschiedenen Modelle mit Hinweisen und regionalen Beraterkommentaren entsteht ein umfassendes System, das die Umsetzung eines Anti-Resistenzmanagements unterstützt.

Die Modelle SIMLEP1-Start und SIMLEP3 sind bereits in ISIP integriert, sodass lediglich das Modell SIMRESI implementiert werden musste. Abbildung 17 zeigt die Eingabemaske des Modells SIMRESI, mit dem der Prognosestandort über Ort/Postleitzahl bzw. geographische Koordinaten festgelegt werden kann. Außerdem kann ein Schlagname vergeben werden. In einer zweiten Eingabemaske werden die Anzahl Kartoffelkäfergenerationen in jedem der letzten fünf Jahre sowie die Anzahl durchgeführter Behandlungen ausgewählt. Wenn keine aufgezeichneten Daten vorliegen, kann mit der Wahl der Option „simuliert“ die Anzahl der Generationen und möglicher Behandlungen berechnet werden. Anschließend muss jeder eingetragenen oder berechneten Behandlung eine verwendete Wirkstoffklasse (Pyrethroid ja/nein) zugeordnet werden (Abbildung 18). In der Ausgabe des Modells SIMRESI wird der berechnete Resistenzstatus farblich gekennzeichnet dargestellt und das Resistenzrisiko in einem kurzen Text bewertet (Abbildung 19). Hieraus kann eine Insektizidempfehlung abgeleitet werden.

The screenshot shows the ISIP website interface. At the top, there is a user profile for 'Paolo Racca' and a 'Mein ISIP' dropdown menu. Below this is a navigation bar with categories like 'REGIONALES', 'ENTSCHEIDUNGSHILFEN', 'INFOTHEK', 'VERSUCHSBERICHTE', and 'ADMINISTRATION'. The main content area is titled 'Kartoffelkäfer - Besondere Hinweise:' and includes a 'Neuen Eintrag anlegen' button. A map shows the location 'Bad Kreuznach' with a red dot. To the right of the map are input fields for 'Schlagname', 'Koordinaten' (7.8572, 49.84), and 'RID' (284762). There is also a 'Berechnung Resistenzstatus' button and 'OK'/'Abbrechen' buttons at the bottom.

Abbildung 17: Eingabemaske (Standort) für das Modell SIMRESI unter www.isip.de

The screenshot shows the 'Prognose des Resistenzstatus gegenüber Pyrethroiden (SIMRESI)' input mask. It contains a table with the following structure:

Schlagname	Ort	Jahr	Individuelle Einstellungen		Anwendung von Pyrethroiden		
			Anzahl Generationen	Anzahl Behandlungen	1. Behandlung	2. Behandlung	3. Behandlung
Schlagname	Bad Kreuznach	2010	1	1	<input type="radio"/> Nein <input checked="" type="radio"/> Ja	<input checked="" type="radio"/> Nein <input type="radio"/> Ja	<input checked="" type="radio"/> Nein <input type="radio"/> Ja
		2011	1, 2, 3	1, 2, 3	<input type="radio"/> Nein <input checked="" type="radio"/> Ja	<input type="radio"/> Nein <input checked="" type="radio"/> Ja	<input checked="" type="radio"/> Nein <input type="radio"/> Ja
		2012	simuliert	simuliert	<input checked="" type="radio"/> Nein <input type="radio"/> Ja	<input type="radio"/> Nein <input checked="" type="radio"/> Ja	<input checked="" type="radio"/> Nein <input type="radio"/> Ja
		2013	2	2	<input type="radio"/> Nein <input checked="" type="radio"/> Ja	<input checked="" type="radio"/> Nein <input type="radio"/> Ja	<input checked="" type="radio"/> Nein <input type="radio"/> Ja
		2014	1	1	<input checked="" type="radio"/> Nein <input type="radio"/> Ja	<input checked="" type="radio"/> Nein <input type="radio"/> Ja	<input checked="" type="radio"/> Nein <input type="radio"/> Ja

Below the table, there are explanatory text blocks for the fields:

- Schlagname:** Frei wählbarer Schlagname
- Ort:** Nächstegelegene Gemeinde (hier wird automatisch die Gemeinde ermittelt, deren Mittelpunkt den angegebenen Koordinaten am nächsten liegt. Diese Angabe dient lediglich zu groben Orientierung. Gerechnet wird exakt für die Koordinaten, die eingegeben wurden)
- Jahr:** Jahr der Behandlungen
- Anzahl Generationen:** Anzahl vollständiger Kartoffelkäferpopulationen pro Jahr
- Anzahl Behandlungen:** Anzahl durchgeführter Behandlungen (bei einer Behandlung pro Generation)
- Anwendung von Pyrethroiden:** Verwendung von Insektiziden mit Wirkstoff aus der Wirkstoffklasse der Pyrethroide

Abbildung 18: Eingabemaske (Insektizidbehandlungen in den letzten fünf Jahren) für das Modell SIMRESI unter www.isip.de

Prognose des Resistenzstatus gegenüber Pyrethroiden (SIMRESI)									
Schlagname	Individuelle Einstellungen					Anwendung von Pyrethroiden			aktueller Resistenzstatus
	Ort	Jahr	Anzahl Generationen	Anzahl Behandlungen	1. Behandlung	2. Behandlung	3. Behandlung		
Schlagname	Bad Kreuznach	2010	1	1	Ja				
		2011	2	2	Ja	Ja			
		2012	2	2	Nein	Ja			
		2013	2	2	Ja	Nein			
		2014	1	1	Nein				

Schlagname	Frei wählbarer Schlagname
Ort	Nächstgelegene Gemeinde (hier wird automatisch die Gemeinde ermittelt, deren Mittelpunkt den angegebenen Koordinaten am nächsten liegt. Diese Angabe dient lediglich zu groben Orientierung. Gerechnet wird exakt für die Koordinaten, die eingegeben wurden)
Jahr	Jahr der Behandlungen
Anzahl Generationen	Anzahl vollständiger Kartoffelkäferpopulationen pro Jahr schwarz = eingetragene Werte grün = simulierte Werte
Anzahl Behandlungen	Anzahl durchgeführter Behandlungen (bei einer Behandlung pro Generation) schwarz = eingetragene Werte grün = simulierte Werte
Anwendung von Pyrethroiden	Verwendung von Insektiziden mit Wirkstoff aus der Wirkstoffklasse der Pyrethroide
aktueller Resistenzstatus	Aus dem berechneten Resistenzstatus gegenüber Pyrethroiden abgeleitete Insektizidempfehlung: Resistenzrisiko sehr hoch! Pyrethroide nicht geeignet, andere Wirkstoffklasse verwenden Resistenzrisiko hoch! Pyrethroidanwendung erhöht Resistenzrisiko Resistenzrisiko niedrig! Pyrethroidanwendung möglich Resistenzrisiko sehr niedrig! Pyrethroide sind geeignet

Abbildung 19: Ausgabe des Modells SIMRESI unter www.isip.de

V Diskussion

Ziel des Projektes „Erstellung eines Expertensystems zur Planung der Insektizidstrategie im Kartoffelbau unter Einbezug der Resistenzentwicklung“ war es die Notwendigkeit einer Insektizidbehandlung unter ökonomischen und ökologischen Aspekten zu analysieren. Mit Hilfe des entwickelten Expertensystems kann der aktuelle Resistenzstatus einer Kartoffelkäferpopulation gegenüber Pyrethroiden berechnet und das Risiko einer Resistenzbildung abgeschätzt werden. Auf diese Weise kann der Anwender bei der Mittelwahl im Rahmen eines Anti-Resistenzmanagements unterstützt werden. Außerdem helfen ihm die Modelle SIMLEP1-Start und SIMLEP3 bei der Terminierung der Behandlung. Durch die Kombination der verschiedenen Modelle mit Hinweisen und regionalen Beraterkommentaren steht ein umfassendes System zur Verfügung, mit dem der Einsatz von Insektiziden optimiert und die Anzahl unwirksamer Behandlungen reduziert werden kann. In der Folge können die Auswirkungen einer Insektizidanwendung auf die Umwelt verringert werden.

Im Gegensatz zu den ökologischen Faktoren ist die Berücksichtigung ökonomischer Aspekte einer Insektizidbehandlung mit dem entwickelten Expertensystem nicht möglich, da keine Empfehlung von Produkten, Wirkstoffen oder Wirkstoffklassen erfolgt. Es wird auch nicht die Verwendung von biologischen Produkten explizit im Rahmen des Insektizid-Resistenzmanagements empfohlen, weil ihr Effekt auf die Resistenzentwicklung in den Selektionsexperimenten zur Resistenzrückentwicklung keine auswertbaren Ergebnisse erbrachten.

Durch die Möglichkeit der Bildung von Szenarien können dem Anwender (mögliche) Auswirkungen seiner (geplanten) Insektizidstrategie vor Augen geführt werden. Auf diese Weise sollen Berater und Landwirte für das Thema Insektizidresistenzen sensibilisiert und bei der Umsetzung eines effektiven Anti-Resistenzmanagements unterstützt werden.

Für die Entwicklung des Modells SIMRESI wurde in Bad Kreuznach eine Kartoffelkäferzucht mit drei verschiedenen Populationen etabliert. Der Aufbau der Zucht gestaltete sich jedoch schwierig, weil nicht alle Populationen an die Zuchtbedingungen adaptiert werden konnten. Außerdem war insbesondere in den Herbstmonaten eine erhöhte Sterblichkeit der Tiere zu beobachten, die teilweise auf eine Kontamination mit dem entomophagen Pilz *Beauveria bassiana* zurückgeführt werden konnte. Die Kartoffelkäferzucht bildete jedoch die Grundlage dafür, dass die Versuche erfolgreich, ganzjährig und mit reproduzierbarem Ergebnis durchgeführt werden konnten.

In den Selektionsexperimenten zur Resistenzentwicklung konnte bei der Population Mz-H eine zunehmende Resistenz induziert werden. Da sowohl in der unbehandelten Zuchtlinie als auch in den behandelten Linien die *kdr*-Mutation L1014F homozygot nachgewiesen

werden konnte, muss die zusätzliche Resistenzentwicklung auf weiteren Resistenzmechanismen, wie zum Beispiel der metabolischen Resistenz, beruhen. Für die Klärung der genauen Resistenzmechanismen wären weitergehende Untersuchungen, beispielsweise zur Monooxygenase-Aktivität, erforderlich.

Während sich der Versuchsansatz in den Selektionsexperimenten zur Resistenzentwicklung bewährt hat, konnten in den Untersuchungen einer möglichen Rückentwicklung nicht die erhofften Ergebnisse erzielt werden. Damit konnten Freilandbeobachtungen, dass sich eine Pyrethroidresistenz beim Kartoffelkäfer wieder zurück entwickeln kann (Richerzhagen, 2010), unter Laborbedingungen nicht bestätigt werden. Ursache ist vermutlich die Verwendung von ingezüchteten, weitgehend homogenen Populationen, in denen kein Austausch von Genen stattfand. Dies gilt sowohl für die Population P01-01, die mit einem Neonicotinoid behandelt wurde, als auch für die Pyrethroid-resistente Zuchtlinie F der Population Mz-H, die den biologischen Produkten NeemAzal-T/S und Novodor FC ausgesetzt wurde.

Bei der im Freiland beobachteten Rückentwicklung von Pyrethroidresistenzen könnten Fitnessnachteile resistenter Tiere gegenüber sensiblen Individuen eine Rolle spielen, wenn die Resistenz beispielsweise auf einer Überexpression eines Gens beruht und mit erhöhtem Energie- und Ressourcenaufwand einhergeht. Mögliche Folgen wären eine erhöhte Sterblichkeit, eine verlängerte Entwicklungsdauer oder eine reduzierte Fruchtbarkeit (Kliot & Ghanim, 2012). In den durchgeführten Versuchen zur Überlebensrate verschiedener Entwicklungsstadien des Kartoffelkäfers konnten jedoch keine Unterschiede in der Wachstumsrate zwischen den unterschiedlichen Populationen beobachtet werden. Die berechnete genetische Fitness lag für die resistenten Tiere der Population Mz-H bei 0,88 und war mit dem Wert für die sensible Population HS von 0,76 vergleichbar.

In Überwinterungsversuchen konnte ebenfalls keine erhöhte Sterblichkeit von resistenten Kartoffelkäfern beobachtet werden. Im Jahr 2013 wurden Tiere vom Standort Kleinniedesheim (Rheinland-Pfalz) verwendet, an dem die *kdr*-Mutation L1014F nachgewiesen werden konnte. Die Überwintermortalität dieser Population war vergleichbar mit anderen Populationen, die in vorangegangenen Jahren untersucht wurden. Somit ergeben sich aus den vorliegenden Untersuchungen keine Hinweise darauf, dass beim Kartoffelkäfer die Ausbildung von Pyrethroidresistenzen mit Fitnessnachteilen verbunden ist. Zu demselben Ergebnis kamen auch Argentine *et al.* (1989).

Es ist jedoch zu beachten, dass die meisten Versuche im Labor unter optimalen Bedingungen durchgeführt wurden und dass teilweise Laborpopulationen verwendet wurden, die an diese Bedingungen adaptiert sind. Dies bedeutet, dass Pyrethroid-resistente Kartoffelkäfer im Freiland möglicherweise Fitnessnachteile gegenüber sensiblen Individuen besitzen, die unter Laborbedingungen nicht abgebildet werden können.

Im Modell SIMRESI wird die fehlende beobachtete Resistenzrückentwicklung berücksichtigt, indem das Resistenzniveau gleich bleibt, solange keine Pyrethroidbehandlung erfolgt. Da in den Selektionsexperimenten zur Resistenzentwicklung keine abnehmende Resistenz beobachtet wurde, wenn die Tiere nicht fortlaufend mit dem Produkt Karate Zeon behandelt wurden, bleibt das Resistenzniveau auch bei nicht durchgeführter Behandlung gleich. Auf Grund der Ergebnisse der Selektionsexperimente wird davon ausgegangen, dass sich das Resistenzniveau der Kartoffelkäfer sich ebenfalls nicht verändert, wenn Pyrethroide im Wechsel mit Insektiziden aus anderen Wirkstoffklassen eingesetzt werden.

Diese Annahme steht im Gegensatz zu der Theorie, dass das Resistenzniveau durch den alternierenden Einsatz von Insektiziden aus verschiedenen Wirkstoffklassen abnimmt. Danach werden Individuen einer Population, die gegenüber einem Insektizid resistent sind, durch die Applikation eines zweiten, nicht kreuzresistenten Insektizids abgetötet, sodass ihr Anteil in der Population abnimmt. Wenn die Resistenz mit Fitnessnachteilen verbunden ist, vermehren sich resistente Individuen in den folgenden Generationen langsamer als sensible Tiere, sodass das Resistenzniveau der Population sinkt. Dieser Effekt wird durch die Immigration von sensiblen Individuen verstärkt (Tabashnik, 1989). Allerdings konnten diese Beobachtungen nur für einzelne Wirkstoffe bestätigt werden (Tabashnik, 1989). Da in den am DLR RNH durchgeführten Versuchen keine Fitnessnachteile einer Pyrethroidresistenz des Kartoffelkäfers beobachtet wurden, sind nach der oben erwähnten Theorie die Voraussetzungen für eine Abnahme des Resistenzniveaus durch einen Wirkstoffwechsels nicht erfüllt. Aus diesem Grund wurden keine Versuche zur alternierenden Behandlung durchgeführt.

Bei der Entwicklung und Verbreitung von Insektizidresistenzen spielt die Immigration von Individuen eine wichtige Rolle, da auf diese Weise die Zusammensetzung und damit der Genpool einer Population verändert wird. Durch Einwanderung können auf der einen Seite (neue) Resistenzgene in eine Population gelangen und auf der anderen Seite kann ein vorhandenes Resistenzniveau durch Immigration sensibler Individuen vermindert werden. Die Auswirkungen von Einwanderung auf das Resistenzniveau sind abhängig vom Erbgang der Resistenz und dem Genotyp der immigrierenden Individuen (Börner, 2009). Im Modell SIMRESI ist der Immigrationsfaktor momentan auf den Wert 1 (= keine Immigration) gesetzt. Dies bedeutet, dass die Berechnungen des aktuellen Resistenzstatus nur für intensive, abgeschlossene Kartoffelanbaugebiete Gültigkeit besitzen.

Um die Auswirkungen von Immigration auf den Resistenzstatus einer Population zu untersuchen und um einen Immigrationsfaktor bestimmen zu können, sollen Kreuzungsversuche durchgeführt werden. Hierfür soll aus sensiblen und Pyrethroid-resistenten Individuen eine Kreuzungspopulation aufgebaut werden, wobei der Anteil sensibler und resistenter Elterntiere variiert. Auf diese Weise soll die Einwanderung sensibler

bzw. resistenter Tiere simuliert werden. Wenn die Bestimmung eines Immigrationsfaktors gelingt, soll dieser Faktor in das Modell SIMRESI integriert werden, sodass das Expertensystem SIMLEP-Res auch außerhalb intensiver Kartoffelanbauggebiete genutzt werden kann.

Ein weiterer Faktor, der bei der Entwicklung von Insektizidresistenzen eine Rolle spielt, sind reduzierte Aufwandmengen (Börner, 2009). Sie bewirken, dass ein höherer Anteil insensitiver Individuen die Behandlung überlebt und sich in der Population verstärkt ausbreiten kann. In einem Versuch, der im Jahr 2013 durchgeführt wurde, wurden die Stärke des Spritzbelages und seine vertikale Verteilung in einem Kartoffelbestand zum BBCH-Stadium 63 untersucht. Außerdem wurde die Belagsstärke beim Tauchen von Kartoffelblättern bestimmt (Ergebnisse nicht dargestellt). Es zeigte sich, dass die Stärke des Spritzbelags im unteren Bereich des Pflanzenbestandes (etwa 10 cm Höhe) je nach verwendeter Düse um den Faktor 3 - 6 geringer war als im oberen Bereich des Bestandes in etwa 40 cm Höhe. Diese unterschiedliche Exposition der Larven wird im Modell SIMRESI über den Parameter Dominanzniveau berücksichtigt, dessen Wert von 0,605 der Steigung der Modellfunktion entspricht.

Der Vergleich der Belagsstärke zwischen den getauchten Blättern und Blättern aus dem oberen Bereich des gespritzten Pflanzenbestandes zeigt einen etwa 4fach stärkeren Belag beim Tauchen als beim Spritzen. Dies bedeutet, dass die Larven bei gleich hoher Blattmasseaufnahme in der Tauchvariante deutlich mehr Wirkstoff aufnehmen. Wenn also unter Laborbedingungen eine Resistenz des Kartoffelkäfers mit Hilfe der IRAC-Methode Nr. 7 nachgewiesen wird, ist unter Umständen eine Kontrolle der Tiere im Freiland noch möglich. Die Szenarien, die mit dem Modell SIMRESI gebildet werden können, stellen folglich eine Worst-Case-Situation dar.

Das Modell SIMRESI beruht fast ausschließlich auf den Ergebnissen von Laborversuchen. Da aber Laborpopulationen nicht ohne Einschränkungen mit Freilandpopulationen vergleichbar sind und unter Feldbedingungen andere Faktoren als im Labor für die Resistenzentwicklung bedeutsam sein können, ist es notwendig das entwickelte Modell zu überprüfen. Um die Übertragbarkeit der Ergebnisse und die Praxistauglichkeit des entwickelten Expertensystems zu testen, wird den Beratern der Pflanzenschutzdienste der Länder über die Internetseite des Informationssystems Integrierte Pflanzenproduktion (ISIP) (www.isip.de) eine Testversion des Systems zur Verfügung gestellt werden. Zusätzlich soll im Jahr 2015 ein Monitoring nach IRAC-Methode Nr. 7 an Standorten durchgeführt werden, von denen die Insektizidmaßnahmen der letzten Jahre bekannt sind.

Prinzipiell ließe sich das Modell SIMRESI um die Resistenzentwicklung gegenüber anderen Wirkstoffklassen erweitern. Zur Bestimmung der einzelnen Parameter wäre allerdings die

Durchführung entsprechender Versuche notwendig. Auch eine Übertragung auf andere (holometabole) Insekten wäre denkbar, wenn es möglich ist die benötigten Parameter auf Grundlage von Literaturdaten und/oder Versuchen zu schätzen.

VI Öffentlichkeitsarbeit

Vorträge

Tschöpe, B., Breckheimer, B., Richerzhagen, D. und Racca, P.: Untersuchungen zur Insektizidresistenz des Kartoffelkäfers – Aktuelle Ergebnisse aus 2011, 8. Treffen des Fachausschusses Pflanzenschutzmittelresistenz - Insektizide, Akarizide, JKI Braunschweig, 7.11.2011

Tschöpe, B., Breckheimer, B., Richerzhagen, D. und Racca, P.: Untersuchungen zur Insektizidresistenz des Kartoffelkäfers – Aktuelle Ergebnisse aus 2011, Seminar „Pflanzenbau und Pflanzenschutz im Ackerbau und Grünland“ des Pflanzenschutzdienstes Rheinland Pfalz., Bad Kreuznach 9.11.2011

Tschöpe, B., Breckheimer, B., Richerzhagen, D. und Racca, P.: Insektizidresistenz beim Kartoffelkäfer – Aktuelle Situation, 51. Pflanzenschutztag Rheinland-Pfalz - Landwirtschaft, Bad Kreuznach, 17.01.2012

Tschöpe, B., Breckheimer, B., Richerzhagen, D. und Racca, P.: Insektizidresistenz beim Kartoffelkäfer - Aktuelle Situation, Arbeitskreis integrierter Pflanzenschutz der Deutschen Phytomedizinischen Gesellschaft (DPG), Projektgruppe Kartoffel, JKI Braunschweig, 07.03.2012

Tschöpe, B., Breckheimer, B., Racca, P. und Kleinhenz, B.: Erstellung eines Expertensystems zur Planung der Insektizidstrategie im Kartoffelbau unter Einbezug der Resistenzentwicklung, 58. Deutsche Pflanzenschutztagung, Braunschweig, 14.09.2012

Racca, P., Tebbe, C., Tschöpe, B. und Breckheimer, B.: Untersuchungen zur Insektizidresistenz des Kartoffelkäfers – Aktuelle Ergebnisse aus 2012, 9. Treffen des Fachausschusses Pflanzenschutzmittelresistenz - Insektizide, Akarizide, JKI Braunschweig, 05.11.2012

Tebbe, C., Breckheimer, B., Racca, P. und Tschöpe, B.: Untersuchungen zur Insektizidresistenz des Kartoffelkäfers - Aktuelle Ergebnisse. Arbeitskreis integrierter Pflanzenschutz der Deutschen Phytomedizinischen Gesellschaft (DPG), Projektgruppe Kartoffel, JKI Braunschweig, 07.03.2013

Tebbe, C., Breckheimer, B., Racca, P. und Tschöpe, B.: Untersuchungen zur Insektizidresistenz des Kartoffelkäfers - Aktuelle Ergebnisse aus 2013. 10. Treffen des Fachausschusses Pflanzenschutzmittelresistenz - Insektizide, Akarizide, JKI Braunschweig, 04.11.2013

Tebbe, C., Breckheimer, B., Racca, P. und Kleinhenz, B.: Entscheidungshilfesystem zur Planung der Insektizidstrategie bei der Bekämpfung des Kartoffelkäfers unter Berücksichtigung der Resistenzentwicklung. 59. Deutsche Pflanzenschutztagung, Freiburg, 25.09.2014

Racca, P., Tebbe, C., Breckheimer, B. und Kleinhenz, B.: Entscheidungshilfesystem zur Planung der Insektizidstrategie unter Berücksichtigung der Resistenzentwicklung. 11. Treffen des Fachausschusses Pflanzenschutzmittelresistenz - Insektizide, Akarizide, JKI Braunschweig, 03.11.2014

Veröffentlichungen

Tschöpe, B. und Breckheimer B. (2012): Kartoffelkäfer: Insektizidresistenz. Kartoffelbau 5, 20-22

Tebbe, C. und Kleinhenz, B. (2014): Untersuchungen zur Insektizidresistenz des Kartoffelkäfers. Kartoffelbau 5, 20-22

VII Fazit

Im Rahmen des Projektes wurde ein Expertensystem entwickelt, mit dem die Insektizidstrategie zur Bekämpfung des Kartoffelkäfers geplant werden kann. Es beinhaltet das Modell SIMRESI, mit dessen Hilfe die Entwicklung von Resistenzen gegenüber Wirkstoffen aus der Klasse der Pyrethroide berücksichtigt wird. Der Anwender hat die Möglichkeit Szenarien zu bilden, sodass ihm die Auswirkungen einer (geplanten) Insektizidstrategie auf die Resistenzentwicklung aufgezeigt werden. Mit Hilfe des Expertensystems wird er bei der Umsetzung eines Anti-Resistenzmanagements unterstützt, sodass die Entwicklung von Resistenzen verhindert bzw. verzögert werden kann. In der Folge wird die Anzahl unwirksamer Insektizidapplikationen reduziert. Gleichzeitig werden damit die Auswirkungen auf die Umwelt vermindert.

Die Übertragbarkeit und Praxistauglichkeit des Expertensystems muss noch überprüft werden. Dazu wird den Beratern der Pflanzenschutzdienste der Länder in der Saison 2015 eine Testversion zur Verfügung gestellt. Außerdem soll zur Überprüfung des Systems ein Monitoring zur Insektizidresistenz des Kartoffelkäfers an Standorten durchgeführt werden, von denen die Insektizidanwendungen der letzten Jahre bekannt sind.

Das Modell SIMRESI ist prinzipiell auch auf andere (holometabole) Insekten und Insektizidwirkstoffklassen übertragbar, sodass eine Erweiterung des bestehenden Expertensystems um weitere Wirkstoffklassen oder die Ausweitung auf andere Schädlinge möglich ist. Die Bestimmung der Parameter müsste auf Basis von Angaben aus der Literatur oder den Ergebnissen von Versuchen erfolgen.

VIII Literaturverzeichnis

Argentine JA, Clark JM & Ferro DN (1989) *Relative Fitness of Insecticide-Resistant Colorado Potato Beetle Strains (Coleoptera: Chrysomelidae)*.

Argentine JA, Clark JM & Ferro DN (1994) Computer simulation of insecticide resistance management strategies for control of Colorado potato beetle (Coleoptera: Chrysomelidae) *Journal of Agricultural Entomology* 11, 137-155.

Börner H (2009) *Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz*. Springer Verlag, Heidelberg.

BVL (2015) Online-Datenbank Pflanzenschutzmittel.
http://www.bvl.bund.de/DE/04_Pflanzenschutzmittel/01_Aufgaben/02_ZulassungPSM/01_ZugelPSM/01_OnlineDatenbank/psm_onlineDB_node.html [accessed on 19.01.2015]

Dowd PF, Sparks TC & Mitchell FL (1984) *A Microcomputer Simulation Program for Demonstrating the Development of Insecticide Resistance*.

Finney DF (1971) *Probit Analysis*, 3 edn. Cambridge University Press, Cambridge.

Grafius E (1997) Economic impact of insecticide resistance in the colorado potato beetle (Coleoptera:Chrysomelidae) on the michigan potato industry. *Journal of Economic Entomology* 90, 1144-1151.

Hare JD (1990) Ecology and management of the Colorado potato beetle. *Annu. Rev. Entomol.* 35, 81-100.

Hoy MA (1998) Myths, models and mitigation of resistance to pesticides. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 353, 1787-1795.

IRAC IRAC (2014) IRAC Susceptibility Test Methods Series - Method 007. http://www.irc-online.org/content/uploads/Method_007_v3.1_24july14.pdf [accessed on 19.01.2015]

Kliot A & Ghanim M (2012) Fitness costs associated with insecticide resistance. *Pest Management Science* 68, 1431-1437.

Lee SH, Dunn JB, Clark JM & Soderlund DM (1999) Molecular analysis of kdr-like resistance in a permethrin-resistand strain of colorado potato beetle. *Pesticide biochemistry and physiology* 63, 63-75.

Metcalf R, L (1994) Insecticides in pest management. In *Introduction to insect pest management*, pp. 251-257. John Wiley&sons,Inc.

Nauen R, Zimmer CT, Andrews M, Slater R, Bass C, Ekbom B, Gustafsson G, Hansen LM, Kristensen M, Zebitz CPW & Williamson MS (2012) Target-site resistance to pyrethroids in European populations of pollen beetle, *Meligethes aeneus* F. *Pesticide biochemistry and physiology* 103, 173-180.

Racca P, Tschöpe B, Falke K, Kleinhenz B & Rossberg D (2014) Chapter 5 - Forecasting of Colorado Potato Beetle Development with Computer Aided System SIMLEP Decision Support System. In *Integrated Pest Management*, pp. 79-91. Academic Press, San Diego.

Radtke W, Rieckmann W & Brendler F (2000) *Kartoffeln*

Krankheiten - Schädlinge - Unkräuter. Th. Mann, Gelsenkirchen-Buer.

Richerzhagen D (2010) Noch keine Entwarnung. *dlz agrarmagazin* 4, 56-58.

Richerzhagen D & Tschöpe B (2010) Insektizidresistenz beim Kartoffelkäfer-Status quo 2010. *Kartoffelbau* 5, 188-191.

Rossi V, Racca P, Giosuè S & Battilani P (1997) Decision support systems in crop protection: from analysis of the pathosystem to the computerized model. *Petria* 7 Suppl.1, 7-26.

Tabashnik B, E (1989) Managing resistance with multiple pesticide tactics: Theory, evidence, and recommendations. *J. Econ. Entomol* 82, 1263-1269.

Tabashnik B, E (1990) Modeling and evaluation of resistance management tactics. In *Pesticide Resistance in Arthropods*, pp. 153-182, New York und London.

Thacker J, R, M (2002) Resistance to insecticides. In *An introduction to Arthropod Pest control*, pp. 94-99, Cambridge.

Weber D (2003) Colorado beetle: pest on the move. *Pesticide Outlook* 14, 256-259.

Whalon ME, Mota-Sanchez D & Hollingworth RM (2008) *Global pesticide resistance in arthropods* CAB International Oxfordshire, Cambridge.

Whalon ME, Mota-Sanchez D & Hollingworth RM (2015) Arthropod Pesticide Resistance Database. <http://www.pesticideresistance.com/> (last accessed 19.01.2015)