

4. Diskussion

4.1 LABORVERSUCHE

4.1.1 Toxizitätstests

Die Untersuchung der toxischen Effekte der sechs Pflanzenschutzmittel Betanal, Karate, Cymbush, Croneton, Curaterr und NeemAzal T/S auf die sechs Collembolenarten *Isotoma anglicana*, *Lepidocyrtus violaceus*, *Folsomia candida*, *Folsomia fimetaria*, *Heteromurus nitidus* und *Onychiurus armatus* diente als Grundlage für die Entwicklung und Bewertung der Vermeidungstests mit Collembolen. Sie sollen daher im Folgenden unter zwei Aspekten diskutiert werden:

1. Zum einen wurden zur Einschätzung der allgemeintoxischen Wirkung der verschiedenen Pflanzenschutzmittel die Endpunkte Schädigung (definiert als Summe aus Mortalität und Lähmung) und Reproduktionserfolg betrachtet. Diese Messparameter werden auch in einem späteren Teil der Diskussion für die vergleichende Bewertung der Sensibilität des Vermeidungstests herangezogen (S. 168f). Sie werden hier im Hinblick auf das Verhältnis der ermittelten Effektkonzentrationen zu den jeweils empfohlenen Aufwandmengen der Produkte diskutiert. Der Vergleich der Akuttestergebnisse für die Handelsprodukte und ihre Wirkstoffe erlaubt zudem eine Abschätzung, inwieweit die beobachteten toxischen Wirkungen tatsächlich auf den jeweiligen Wirkstoff oder auf Beistoffe in der Formulierung zurückzuführen sind.
2. Zum anderen wurde die Wirkung der Handelspräparate auf die Lokomotionsfähigkeit der Collembolen untersucht, um sicherzustellen, dass die Mobilität der Tiere in den später durchgeführten Vermeidungstests nicht beeinträchtigt wird. Dort wurden dann nur jene Pflanzenschutzmittelkonzentrationen eingesetzt, die in den Akuttests keine Lähmungen verursacht hatten. Für diese Übertragbarkeit der Ergebnisse war es notwendig, die Akuttests – genau wie die Vermeidungstest – mit einer Versuchsdauer von 24 Stunden durchzuführen. Durch den Vergleich mit den Ergebnissen nach einer Expositionsdauer von 7 Tagen ergibt sich hier die Möglichkeit, auch toxizitätsdynamische Effekte zu erfassen. Beide Aspekte werden auf der Grundlage der Wirkmechanismen der verschiedenen Substanzklassen diskutiert.

Im Anschluss werden die Sensibilitätsunterschiede zwischen den sechs Collembolenarten in den Akuttests zusammenfassend erörtert.

4.1.1.1 Effekte der einzelnen Pflanzenschutzmittel auf Vitalität und Reproduktion der untersuchten Collembolenarten

BETANAL

In den Akuttests über 7 Tage führten Konzentrationen des Herbizids Betanal zwischen 8,7 (*Lepidocyrtus violaceus*) und 31,4 mg ai / kg TG (*Onychiurus armatus*) zu einer Schädigung von 50% der Versuchstiere. Diese Werte liegen um den Faktor 5,5 bis 20 über der höchsten für den Rüben- Zierpflanzen- und Obstbau empfohlenen Aufwandmenge des Produktes. Sie stehen im Einklang mit den von WILBERT ET AL. (1979b) durchgeführten Versuchen, bei denen nach einer Versuchsdauer von 7 Tagen erst bei der 10fachen praxisüblichen Aufwandmenge ein Einfluss von Betanal auf die Mortalität der Collembole *Onychiurus fimatus* zu beobachten war. Nach 8 Wochen Expositionsdauer führte das Mittel dort allerdings bereits in der normalen Aufwandmenge von 1,6 mg ai / kg TG zu einer Mortalitätsrate von 65%. In einem Ringtest zur Validierung des Collembolen-Biotests wurde für *Folsomia candida* bei vergleichbaren Versuchsbedingungen eine mittlere LC₅₀ (lethal concentration, berücksichtigt bei der Auswertung nur tote Tiere) von 15,4 ± 4,5 mg ai / kg TG ermittelt (ACHAZI ET AL. 2000). Der EC₅₀-Wert der Schädigung lag für diese Art in der vorliegenden Untersuchung mit 13,1 mg ai / kg TG im gleichen Bereich.

Die Untersuchung der Reproduktion bei der Art *Folsomia candida* ergab eine signifikante Verminderung der Juvenilenzahl bereits ab einer Betanal-Konzentration von 7,7 mg ai / kg TG. Dieser Wert entspricht der fünffachen empfohlenen Aufwandmenge. Dagegen wurden in den Voruntersuchungen zur ISO-Norm für den Collembolen-Reproduktionstest erst bei Konzentrationen von 16-32 mg ai / kg TG des Produktes „Betanal Plus“ Effekte auf die Reproduktion von *F. candida* in OECD-Boden festgestellt (RIEPERT 1996). Dieser Unterschied ist sicherlich dadurch bedingt, dass OECD-Boden einen erheblich höheren Anteil an organischer Substanz aufweist (10%) als der hier verwendete Standardboden LUFA 2.2 (2,2%). Durch Adsorption an Huminsäuren und andere organische Bestandteile kann die Bioverfügbarkeit von Schadstoffen erheblich vermindert werden (DOMSCH 1992), so dass höhere Konzentrationen eingesetzt werden müssen, um die gleichen Effekte wie in Böden mit geringem Anteil an organischer Substanz hervorzurufen. Der o. g. Ringtest lieferte demgegenüber mit einer EC₅₀ von 9,1 ± 3,0 mg ai / kg TG einen mit der vorliegenden Untersuchung sehr gut übereinstimmenden Wert (ACHAZI ET AL. 2000).

Ein besonders interessantes Ergebnis der vorliegenden Arbeit ist die unterschiedliche Toxizität des Handelsproduktes Betanal und seines Wirkstoffs Phenmedipham. Die Akutttests zeigten, dass von Phenmedipham allein keinerlei schädigende Wirkung auf die untersuchten

Collembolen ausging, während die entsprechende Leerformulierung ähnlich toxisch war wie das Handelprodukt. Auch die Reproduktion von *F. candida* wurde durch die Leerformulierung in ähnlicher Weise gehemmt wie durch das Betanal. Folglich müssen die beobachteten Effekte durch Zusatzstoffe in der Formulierung verursacht worden sein. Zu diesen zählen nach Information durch den Hersteller das Lösungsmittel Isophoron, des weiteren ein Erdöl-Bestandteil sowie verschiedene Tenside (Alkylphenoethoxylat, APEO), die ein Eindringen des Herbizidwirkstoffs durch die Kutikula des Blattes erleichtern sollen.

Für Isophoron liegen nur Toxizitätsdaten zu aquatischen Organismen vor. Die 48-h LC₅₀ für *Daphnia magna* liegt mit 120 mg / L (WHO 1995) im Vergleich zu den aktiven Wirkstoffen der hier untersuchten Pflanzenschutzmittel (vgl. Abschnitt 2.2.1.1 – 2.2.1.6) allerdings sehr hoch. Gegen eine toxische Wirkung dieser Substanz auf Collembolen spricht zudem, dass sie in dem oben erwähnten Produkt „Betanal Plus“ (einem Suspensionskonzentrat) nicht enthalten ist, dieses aber eine ähnliche Toxizität aufweist wie das Emulsionskonzentrat Betanal.

Für Mineralölkohlenwasserstoffe liegen Ergebnisse aus Akut- und Reproduktionstests mit *F. candida* vor (ACHAZI ET AL. 2001). Für die toxische Wirkung wurden Schwellenwerte im Bereich um 1000 mg MKW / kg Bodenmaterial ermittelt. Dies übersteigt bei weitem die in den hier eingesetzten Betanal-Konzentrationen enthaltenen Mineralölanteile.

Die zur Gruppe der nichtionischen Tenside gehörenden Alkylphenoethoxylate, die ebenfalls in Betanal enthalten sind, sind für die Bildung stabiler Metabolite mit erheblicher aquatischer Toxizität bekannt (SCHÜÜRMAN 1997). Sie sind in der Lage, sich in Zellmembranen einzulagern und Membranfunktionen auf diese Weise zu stören (BAILLIE ET AL. 1989). Damit könnten sie auch für die beobachtete toxische Wirkung auf die Collembolen verantwortlich sein. HOLMSTRUP & KROGH (1996) stellten fest, dass das nichtionische Tensid LAS (Lineares Alkylbenzolsulfonat) bei juvenilen *Folsomia fimetaria* ab einer Konzentration von 700 mg LAS / kg TG das Überleben, ab 200 bzw. 300 mg LAS / kg TG das Wachstum und die Häutungsfrequenz vermindert. Im vorliegenden Versuch wurde für die Wirkung von Betanal auf die Reproduktion von *F. candida* eine LOEC von 7 mg ai / kg TG ermittelt. Betanal enthält weniger als 20% APEO. Eine Beteiligung des Tensids an der beobachteten toxischen Wirkung scheint somit unwahrscheinlich. Zur Aufklärung des auf die Collembolen tatsächlich wirkenden Inhaltsstoffes von Betanal können nur getrennte Akut- und Reproduktionstests mit den einzelnen Formulierungshilfen Aufschluss geben.

Durch den Akutttest mit Betanal unter Verwendung von Streu, der als Vorversuch für die Streudosenversuche im Freiland diente, ist es möglich, die toxische Wirkung des Herbizids in verschiedenen Substraten zu vergleichen. Beide Tests unterschieden sich in ihrer Expositionsdauer. Da jedoch die Effektkonzentrationen von Betanal im Bodenakutttest für die beiden Expositionsdauern 24 Stunden und 7 Tage nur geringfügig schwankten, ist es mög-

lich, die Ergebnisse des über drei Tage laufenden Streuakuttests mit jenen des 7-Tage-Bodentests zu vergleichen (s. Tab. 31).

Tab. 31: Vergleich der Effektkonzentrationen für die Schädigung in Akuttests mit dem Herbizid Betanal in Boden (Versuchsdauer 7 Tage) und Streusubstrat (Versuchsdauer 3 Tage). n. b.: aufgrund zu geringer Datenmenge nicht zu berechnen. Alle Angaben in [mg ai / kg TG].

	EC ₅₀ Boden (7d)	EC ₅₀ Streu (3d)
<i>Isotoma anglicana</i>	10,1	95,4
<i>Lepidocyrtus violaceus</i>	8,7	92,0
<i>Folsomia candida</i>	13,1	114,1
<i>Folsomia fimetaria</i>	29,1	107,4
<i>Heteromurus nitidus</i>	n. b. (LOEC: 7,7)	76,6
<i>Onychiurus armatus</i>	31,4	123,6

Dabei zeigt sich, dass Betanal auf die Arten *I. anglicana*, *L. violaceus*, *F. candida* und *H. nitidus* im Boden etwa 9-10mal toxischer wirkte als im Streusubstrat. Für die Arten *F. fimetaria* und *O. armatus* beträgt der Faktor noch knapp 4. Diese Unterschiede zwischen Boden und Streu könnten zum einen mit der verstärkten Adsorption des Schadstoffs an die organische Streusubstanz zusammenhängen, durch die die Bioverfügbarkeit reduziert würde. Eine weitere Rolle spielt sicher die unterschiedliche Struktur der Testsubstrate, da durch größere Hohlräume in der Streu weniger Berührungspunkte für die Collembolen mit dem Toxin gegeben sind als im feinporigen Boden.

KARATE

Mit EC₅₀-Werten zwischen 14 (*I. anglicana*) und 74 mg ai / kg TG (*L. violaceus*) für die Schädigung im 7-Tage-Akuttest ist das synthetische Pyrethroid Karate als das für die untersuchten Collembolen ungefährlichste der sechs untersuchten Pflanzenschutzmittel einzustufen, da diese Werte über dem 1000fachen bzw. über dem 6000fachen der praxisüblichen Aufwandmenge von 0,012 mg ai / kg TG lagen.

Ähnliche Wirkungsbereiche des Insektizids sind für Collembolen auch aus der Literatur bekannt. So fand SÜß (1997) für *F. candida* LC₅₀-Werte von 5- >50 mg ai / kg TG nach 14 Tagen Versuchsdauer. Demgegenüber berichten FILSER (1991) und FILSER & NAGEL (1993) über eine signifikante Reduktion der Abundanzen verschiedener Collembolenarten vier Wochen nach Auftropfen der 10fachen Aufwandmenge (also 1,5 kg / ha, entspr. 0,12 mg ai / kg TG) auf Mesokosmen. Diese Unterschiede zu den vorliegenden Ergebnissen könnten

zum einen durch die Verwendung anderer Bodenarten (Lehm und Sand), zum anderen aber auch durch die Applikationsweise bedingt sein, da beim Auftropfen mit einer Pipette keine gleichmäßige Verteilung der Lösung gewährleistet ist. Vielmehr entstehen so Spots mit extrem hoher Insektizidkonzentration, denen die Tiere durch Vermeidung nur bedingt ausweichen können, wie die Wahlversuche in der vorliegenden Arbeit gezeigt haben (vgl. Abschnitt 3.1.4.2).

Den vorliegenden Untersuchungen zufolge ging die akuttoxische Wirkung anders als beim oben beschriebenen Betanal eindeutig vom aktiven Wirkstoff des Karate, dem λ -Cyhalothrin aus.

Auch auf die Reproduktion von *F. candida* wirkte sich Karate erst ab einer Konzentration von 17 mg ai / kg TG negativ aus, dies entspricht der 1400fachen Aufwandmenge. Untersuchungen von RINKLEFF ET AL. (1995) an Eiern des Maiszünslers (*Ostrinia nubilalis*) zeigten, dass das Besprühen der Eier mit Karate in Konzentrationen entsprechend der Aufwandmenge sowohl zu einem Rückgang der Schlupfrate als auch zu einer hohen Mortalität der Larven führte. Diese Auswirkungen auf die Reproduktion wurden auch bei Nichtzielorganismen wie z. B. Spinnen festgestellt (DINTER & POEHLING 1995). Die vorliegenden Ergebnisse für Collembolen zeigen also, dass diese auch bezüglich der Reproduktion sehr unempfindlich auf Karate reagierten. Diese im Vergleich mit den Zielorganismen geringe Sensibilität könnte zumindest zum Teil durch die unterschiedliche Applikationsweise bedingt sein. Die Wirkung von Pflanzenschutzmitteln auf Schadinsekten wird analog der für das jeweilige Produkt empfohlenen Applikationsmethode untersucht, d. h. in den zitierten Experimenten durch Besprühen der Tiere mit einer Insektizidlösung. Die Collembolen wurden dem Mittel hingegen über eine Kontamination des Bodens ausgesetzt. Pyrethroide sind wirksame Kontaktgifte, die jedoch im Boden durch Adsorption in hohem Maße inaktiviert werden (HARRIS & TURNBULL 1978), wodurch die Bioverfügbarkeit für die Collembolen stark verringert werden könnte. Die selektive insektizide Wirkung wird zudem durch artspezifisch unterschiedliche Fähigkeiten der Organismen zur Aktivierung und Detoxifikation bestimmt, die in Abschnitt 4.1.1.3 näher erläutert werden.

CYMBUSH

Das zweite synthetische Pyrethroid, Cymbush, zeigte auf die untersuchten Collembolenarten eine ähnlich schwache akute Wirkung wie das oben beschriebene Karate. Für die empfindlichste Art, *L. violaceus*, lag die EC_{50} für die Schädigung mit 24 mg ai / kg TG ca. 470fach über der empfohlenen Aufwandmenge, die unempfindlichste Art, *F. fimetaria*, wurde erst durch die 3700fache Aufwandmenge geschädigt. Eine ähnlich geringe Wirkungsstärke von

Cymbush gegenüber Collembolen wurde in einem Semifreilandversuch auch für das Produkt Ambush C (100 g Cypermethrin / L) festgestellt (WILES & FRAMPTON 1996). In einem weiteren Freilandversuch mit dem gleichen Präparat stieg die Zahl der Collembolen gegenüber der Kontrolle nach der Applikation sogar an (FRAMPTON 1999), ein Effekt, der vom Autor allerdings auf eine Reduktion der Prädatoren zurückgeführt wird.

Die vorliegende Untersuchung zeigte allerdings, dass die toxische Wirkung von Cymbush in den hier verwendeten Konzentrationen nicht auf dem aktiven Wirkstoff Cypermethrin basiert, sondern auf Zusatzstoffe in der Formulierung zurückgeführt werden muss. Ein solches Phänomen wurde auch für die Pyrethroide Fenvalerat und Permethrin in Tests an Mäusen festgestellt (WILLIAMSON ET AL. 1989). In Versuchen an Bodenmikroarthropoden, Regenwürmern und Schnecken wurde die schwache Toxizität von Cypermethrin auf die geringe Persistenz und die starke Adsorption zurückgeführt (INGLESFIELD 1989). Das Phänomen trat auch in den Versuchen zur olfaktorischen Repellenz auf, in denen Cymbush in hohen Konzentrationen selbst über die Gasphase lähmend auf die Versuchstiere wirkte, während das Cypermethrin keinerlei schädigende Wirkung zeigte. Da das Cypermethrin mit 0,23 μPa sehr wenig flüchtig ist, ist davon auszugehen, dass auch dieser Effekt von Cymbush auf einen Beistoff der Formulierung zurückgeht. Da dieser sogar über die Gasphase toxisch wirkt, könnte er die Wirkung des Cypermethrins in den Akuttests maskiert haben, welches durch die starke Adsorption vermutlich erst in höheren als den getesteten Konzentrationen einen toxischen Effekt auf die Collembolen ausgeübt hätte.

Eine Verringerung der Reproduktionsrate von *F. candida* durch Cymbush konnte in der vorliegenden Studie zwar nicht festgestellt werden, Vorversuche mit einer höheren Bodenfeuchte von 60% MWK hatten jedoch eine signifikante Reduktion der Juvenilenzahl ab einer Konzentration von 13 mg ai / kg TG ergeben (HEUPEL 2000), dies entspricht dem 260fachen der Aufwandmenge. Inwieweit die Unterschiede in diesen Reproduktionstests tatsächlich auf den Einfluss der Bodenfeuchte zurückzuführen sind, ist unklar. Zahlreiche Untersuchungen haben zwar die Auswirkungen der Feuchte auf den Reproduktionserfolg von Collembolen belegt (BRUUS PEDERSEN ET AL. 1997, SCHRADER ET AL. 1998, CROUAE ET AL. 1999, ACHAZI ET AL. 2001). Ein Vergleich der Effekte aller untersuchten Pflanzenschutzmittel mit den Ergebnissen der Vorversuche (HEUPEL 2000) lässt jedoch bei geringerer Bodenfeuchte keine allgemein niedrigere Wirkung auf die Reproduktion erkennen. TRESCHAU (2001) fand bei Reproduktionstests mit Betanal und *F. candida* bei einem Wassergehalt von 80% MWK sogar eine signifikant geringere Abnahme der Reproduktion gegenüber der Kontrolle als bei 60% MWK.

CRONETON

Deutlich niedriger als für die synthetischen Pyrethroide lagen die Effektkonzentrationen für das Carbamat-Insektizid Croneton im 7-Tage-Akutttest. Dennoch war mit 11,1 mg ai / kg TG die 14fache praxisübliche Aufwandmenge nötig, um 50% der Individuen der empfindlichsten Art *F. fimetaria* zu schädigen. Für die unempfindlichste Art, *F. candida*, lag dieser Wert beim 23fachen der Aufwandmenge. Bezüglich der Sensibilität gegenüber diesem Insektizid waren die untersuchten Collembolenarten somit robuster als andere Nichtziel-Organismen: In Ringtests mit verschiedenen Nutzarthropoden wurde Croneton in der praxisüblichen Aufwandmenge in Labortests als stark schädigend (>99% Mortalität bzw. Einschränkung der Parasitierungsleistung) für Raubmilben und einige parasitierende Erz- und Schlupfwespenarten eingestuft. Für Staphyliniden und Carabiden schwankte die Mortalität von <50% bis 99% (HASSAN ET AL. 1987).

Der akuttoxische Effekt des Croneton konnte eindeutig auf die Toxizität des Wirkstoffs, Ethiofencarb, zurückgeführt werden. In diesem Zusammenhang lieferten auch die Versuche zur olfaktorischen Repellenz von Croneton eine sehr interessante Beobachtung. Das Produkt führte in purer Form über die Gasphase bereits nach wenigen Minuten zu starken Lähmungserscheinungen bei den Versuchstieren. Der Wirkstoff Ethiofencarb besaß diese Wirkung nicht, so dass dieser Effekt auf einen Zusatzstoff in der Formulierung zurückgeführt werden muss. Diese besteht zu 40% aus dem sehr flüchtigen Chlorbenzol. Dieses Lösungsmittel ist für viele Organismenarten toxisch (DALICH ET AL. 1982, VAN GESTEL & MA 1988), es könnte daher in dieser hohen Konzentration für die schnelle Lähmung über die Gasphase verantwortlich sein. Da in den oben beschriebenen Akutttests, in denen viel geringere Konzentrationen eingesetzt wurden, die schädigende Wirkung des Croneton eindeutig auf den Wirkstoff Ethiofencarb zurückgeführt werden kann, muss davon ausgegangen werden, dass eine Intoxikation durch Chlorbenzol erst in sehr hohen, nicht-praxisrelevanten Konzentrationen eintritt.

Für die Reproduktion von *F. candida* wurde im Vergleich zum Akutttest (EC_{50} : 18,2 mg ai / kg TG) eine deutlich geringere Wirkschwelle festgestellt (LOEC: 3,5 mg ai / kg TG). Somit führte bereits die 4,4fache Aufwandmenge von Croneton zu einem signifikanten Rückgang der Juvenilenzahl. Literaturdaten zur Wirkung dieses Insektizides auf die Reproduktion von Collembolen fehlen bislang. Sie reagieren jedoch erheblich empfindlicher als Enchytraeiden, für die in Reproduktionstests eine EC_{50} von 1,65 g ai /kg TG ermittelt wurde (WAGNER-VASKE 2000).

CURATERR

Die in dieser Arbeit verwendete Formulierung des Insektizids Curaterr wird zur Behandlung von Rübensamen eingesetzt und als Teil einer Saatgutummantelung zum Schutz vor Fraßschädlingen zusammen mit den Rübensamen in den Boden eingebracht. Durch diese Form der Anwendung kann die Aufwandmenge viel geringer gehalten werden als z. B. beim häufig verwendeten Curaterr-Granulat, welches auf den Boden aufgestreut wird. Die gesamte Insektizidmenge ist somit in der Umgebung der Samen konzentriert, während das umliegende Areal nicht belastet ist. Beim Kontakt mit behandelten Samen können Collembolen, die als Rübenschädlinge durch dieses Mittel bekämpft werden sollen (GETZIN 1985, HEIJEBROEK & HUIJBREGTS 1995), einer erheblich höheren Konzentration ausgesetzt sein als hier durch das gleichmäßige Einmischen (und damit Verdünnen) in den Toxizitäts- und Repellenttests simuliert. Die Umrechnung der empfohlenen Aufwandmenge auf eine Bodenmenge ist somit für dieses Präparat weniger aussagekräftig.

Die berechnete praxisübliche Aufwandmenge des Carbamat-Insektizids Curaterr musste im Akutttest für *F. candida* mit 0,14 mg ai / kg TG um das 5,6fache, für *H. nitidus* mit 7,68 mg ai / kg TG allerdings um das 307fache überschritten werden, um bei 50% der Versuchstiere Schädigungen hervorzurufen. Das Handelsprodukt und der aktive Wirkstoff unterschieden sich in ihrer toxischen Wirkung dabei kaum. Obwohl das Saatgutbeizmittel Curaterr SC500 selbst bisher nicht auf seine Wirkung auf Collembolen getestet wurde, liegen zahlreiche Untersuchungen zur Wirkung des aktiven Wirkstoffs Carbofuran vor. GETZIN (1985) fand bei gleicher Testmethode für *Onychiurus pseudarmatus* eine LC_{50} von 1,23 mg Carbofuran / kg TG. In der vorliegenden Arbeit wurde für die Schädigung der nahe verwandten Art *Onychiurus armatus* eine EC_{50} von 0,60 mg Carbofuran / kg TG festgestellt. Beim Vergleich der Wirkung von Carbofuran auf verschiedene Collembolenarten zeigte sich *F. candida* empfindlicher als *Onychiurus justii porteri* (TOMLIN 1975). Auch in den hier beschriebenen Versuchen war *F. candida* gegenüber Curaterr sensibler als die anderen fünf Arten. THOMPSON (1973) berichtet von einer 100%igen Mortalität von *F. candida* bei 0,5 mg ai / kg TG in einem 24-Stunden-Test mit Boden. Dies entspricht ebenfalls gut dem in der vorliegenden Studie gemessenen EC_{50} -Wert von 0,47 mg ai / kg TG für diese Art.

Durch das Curaterr wurde die Reproduktion von *F. candida* bereits bei der 3,4fachen Aufwandmenge signifikant reduziert. Nach Beobachtungen von DENAYER ET AL. (1983) an Laufkäfern und Collembolen kann dieser Effekt auf eine reduzierte Eiablage zurückgeführt werden.

NEEMAZAL T/S

Das aus Extrakten von Samen des Neem-Baums gewonnene Insektizid NeemAzal T/S erwies sich in der praxisüblichen Aufwandmenge im Akutttest für die untersuchten Collembolenarten als unschädlich. Erst bei der 24fachen (*F. fimetaria*) bis 164fachen (*L. violaceus*) Aufwandmenge war die EC_{50} für die Schädigung der Tiere erreicht (1,2 - 8,2 mg ai / kg TG).

Die Akutttests mit NeemAzal, das zu 35% aus dem aktiven Wirkstoff Azadirachtin A besteht, zeigten, dass die toxische Wirkung eindeutig auf den Neemkernextrakt zurückzuführen ist. Ob der Effekt allerdings ausschließlich durch das darin enthaltene Azadirachtin A verursacht wurde, bleibt unklar, da das NeemAzal neben diesem noch weitere Azadirachtine und sekundäre Pflanzenstoffe enthält.

Durch NeemAzal T/S wurde die Reproduktion von *F. candida* bereits bei einer der empfohlenen Aufwandmenge entsprechenden Konzentration von 0,05 mg ai / kg TG signifikant reduziert. Die Leerformulierung zeigte dagegen keinerlei toxisches Potenzial, was ebenfalls auf einen Effekt des NeemAzals hindeutet. Bisher liegen weder zur Wirkung des Produktes NeemAzal T/S noch des Reinstoffs Azadirachtin A auf Collembolen Laborstudien vor. In Freilandversuchen wurde die Abundanz von Sminthuriden, Entomobryiden und Onychiuriden durch ein ähnliches Produkt, Margosan-O, reduziert (STARK 1992).

4.1.1.2 Durch welche Wirkmechanismen können die untersuchten Pflanzenschutzmittel die Lokomotionsfähigkeit von Collembolen beeinflussen?

BETANAL

Das Herbizid Betanal schränkte die Lokomotionsfähigkeit der Collembolen (mit Ausnahme der Art *Lepidocyrtus violaceus*) nach einer Expositionszeit von 24 Stunden deutlich ein. Über den Wirkmechanismus des Herbizids Betanal auf Insekten liegen keine Untersuchungen vor. ULBER (1979) nimmt aufgrund der Verwandtschaft des Wirkstoffs Phenmedipham mit den Carbamat-Insektiziden eine ähnliche Wirkungsweise an. Durch die vorliegende Untersuchung konnte jedoch gezeigt werden, dass das Betanal zwar eine den (weiter unten besprochenen) Carbamaten vergleichbare Wirkung auf die Collembolen hatte, diese jedoch nicht auf den Wirkstoff Phenmedipham zurückgeführt werden konnte. Derartige Effekte von Herbizidformulierungen wurden auch von anderen Autoren beschrieben. So bewirkte die Leerfor-

mulierung von Betanal bei verschiedenen Nutzinsekten (*Trichogramma cacoeciae*, Erzwespe, *Chrysopa carnea*, Florfliege und *Epistrophe balteata*, Schwebfliege) ebenso wie das Handelsprodukt selbst, einen Rückgang der Parasitierungsleistung, die ebenfalls an die Bewegungsfähigkeit der Tiere gebunden ist (FRANZ & TANKE 1979). EIJSACKERS (1978) führte Mortalitätstests an der Collembolenart *Onychiurus quadrocellatus* mit dem Herbizid Aanetos L. durch. Dabei zeigte sich, dass neben dem aktiven Wirkstoff 2,4,5-T (chlorierte Phenoxyessigsäure) auch die Leerformulierung dieses Mittels nach wenigen Tagen Lähmungen der Versuchstiere verursachte. Wie bereits im vorigen Abschnitt erörtert, wären weitere Experimente erforderlich, um den Einfluss der einzelnen Beistoffe der Betanal-Formulierung auf die Lokomotionsfähigkeit der Collembolen zu untersuchen.

KARATE

Das synthetische Pyrethroid Karate verursachte bei den Arten *Isotoma anglicana* und *Folsomia fimetaria* nach einer Expositionszeit von 24 Stunden zwar Lähmungserscheinungen, es wurden jedoch nur wenige tote Individuen gefunden. Bei den vier anderen Arten *Lepidocyrtus violaceus*, *Folsomia candida*, *Heteromurus nitidus* und *Onychiurus armatus* blieb das Produkt in jenen Konzentrationen, durch die nach 7 Tagen 50% der Versuchstiere geschädigt wurden, sogar wirkungslos. Offensichtlich war bei Karate eine längere Expositionszeit als bei den anderen untersuchten Pflanzenschutzmitteln notwendig, um Bewegungsstörungen auszulösen. Diese Wirkungsverzögerung ist insbesondere vor dem Hintergrund des oft beschriebenen, für synthetische Pyrethroide typischen, schnellen Knockdown-Effekts („Karate“!) auf die Zielorganismen interessant (COATS 1982, SMITH & STRATTON 1986, NAUMANN 1990). Bei Fliegen (SAWICKI 1962), Mückenlarven (SALGADO ET AL. 1983), Raupen (TOTH & SPARKS 1990) oder Schaben (GAMMON ET AL. 1981) ist der Effekt bereits nach wenigen Minuten zu beobachten. In diesen Untersuchungen wurde allerdings eine Cyhalothrin-Lösung direkt auf die Insekten appliziert, während in den vorliegenden Versuchen das Mittel in das Bodensubstrat eingemischt wurde und somit nur über die Berührungspunkte des Tieres mit dem umgebenden Substrat wirken konnte. Diese Kontaktstellen sollten für euedaphische Arten, die stärker in den Porenraum des Bodens vordringen, zahlreicher sein als für epedaphische Arten, die zudem durch meist dichte Beborstung vor dem direkten Kontakt mit dem Toxin geschützt sind. Diese Annahme, dass bodenlebende Arten schneller geschädigt würden als die Bewohner der oberen Streuschicht, konnte durch die vorliegende Untersuchung allerdings nicht bestätigt werden, da Vertreter aller drei Lebensformtypen nach 24 Stunden keine Reaktion auf Karate zeigten. Da außerdem auch die anderen hier untersuchten Mittel, die bereits nach 24 Stunden deutliche Bewegungsstörungen hervorriefen, auf die gleiche Weise appliziert worden waren, muss im Fall von Karate ein anderer Faktor zu der verzögerten Wirkung geführt haben.

Der lähmende Effekt der Pyrethroide kommt durch die Bindung u. a. an die spannungs-gesteuerten Natriumkanäle der Nervenzellen zustande, wodurch es zu einer verlängerten Öffnung der Kanäle kommt. Durch die anhaltende Membrandepolarisation treten Symptome wie Hyperaktivität und unkoordinierte Bewegungen, Krämpfe und Ataxie auf (GAMMON ET AL. 1981, ZLOTKIN 1999). Dieser Knockdown-Effekt kann sehr schnell eintreten, ist jedoch von der Eindringgeschwindigkeit des Wirkstoffs in den Organismus abhängig (BRIGGS ET AL. 1974). Die hier beobachtete zeitliche Verzögerung der Wirkung könnte also durch eine erschwerte Aufnahme des λ -Cyhalothrins durch die Kutikula der Collembolen bedingt sein, die zu einer nur langsam ansteigenden Dosis am Wirkungsort, dem Zentralnervensystem, führen würde. Das Karate 5 WG ist als einziges der hier untersuchten Präparate ein wasserdispergierbares Granulat. Diese Art der Formulierung enthält – im Gegensatz zu den Emulsionskonzentraten – keine Emulgatoren oder Lösungsmittel, die das Eindringen des Wirkstoffes in den Organismus durch die Kutikula erleichtern könnten (TELLE 1970, LANKFORD 1994, BÖRNER 1997). Lösungsmittelfreie Formulierungen werden allgemein als weniger aktiv betrachtet, da sie auch die Pflanzenkutikula langsamer durchdringen als Emulsionskonzentrate (STOCK & DAVIES 1994). Die Wirkungsdynamik von Insektiziden wird zudem auch von der Fähigkeit des Organismus bestimmt, die Konzentration von Toxinen durch Bindung an Proteine in der Hämolymphe oder an Plasmamembranen sowie durch Speicherung in Fettdepots zu verringern (WELLING 1979). Auch die biochemische Umwandlung von synthetischen Pyrethroiden in nicht-toxische Substanzen durch Detoxifikationsenzyme ist bei Insekten nachgewiesen worden (ISHAAYA ET AL. 1983). Welche Mechanismen für die beobachtete langsamen Wirkung von Karate auf Collembolen letztlich verantwortlich sind, kann durch die vorliegende Untersuchung nicht geklärt werden. Für die Beteiligung (bzw. Nichtbeteiligung) von Formulierungshilfsstoffen am zeitlichen Verlauf der toxischen Wirkung sprechen jedoch auch die Beobachtungen mit dem zweiten untersuchten synthetischen Pyrethroid, Cymbush:

CYMBUSH

Dieses Produkt führte nach einer Expositionsdauer von 24 Stunden ebenfalls zu Bewegungsstörungen der Collembolen. Nach 7 Tagen war jedoch der Anteil toter Tiere erheblich höher als beim Karate. Die Schädigung stieg im 7-Tage-Test im Vergleich zum 24-Stunden-Test deutlich weniger stark an als beim Karate. Entsprechend lagen auch die Effektkonzentrationen nach 24 Stunden und 7 Tagen näher beieinander. Cymbush lag als Emulsionskonzentrat vor, was die Passage des Wirkstoffs durch die Kutikula erleichtert und somit zu einer schnelleren Wirkung als beim Karate geführt haben könnte. Der aktive Wirkstoff Cypermethrin zeigte ohne diese Hilfsstoffe keinerlei toxische Wirkung auf die Tiere. Es kann somit vermutet werden, dass Cypermethrin im Gegensatz zum λ -Cyhalothrin das Integument der Collembolen nicht innerhalb der Expositionszeit zu durchdringen vermochte. Bezüglich

der unterschiedlichen Wirkungsgeschwindigkeiten ist auch noch ein anderer Aspekt der Pyrethroidwirkung von Bedeutung. BRIGGS ET AL. (1974) stellten bei einem Vergleich der Effekte verschiedener Pyrethroide auf Hausfliegen fest, dass bereits geringe Strukturänderungen der Wirkstoffe zu veränderten toxischen Eigenschaften führen können. Dabei ist der Knockdown-Effekt von der letalen Wirkung zu trennen. Stark polare Substanzen führten zwar zu ausgeprägteren Lähmungen, hatten jedoch geringere Tötungseffekte als unpolare Pyrethrine. Dies könnte auch die unterschiedlichen Effekte von Karate und Cymbush erklären. Nach einer Expositionszeit von 7 Tagen führte das polare λ -Cyhalothrin zu stärkeren Lähmungserscheinungen als das unpolare Cypermethrin, das wiederum einen ausgeprägten letalen Effekt hatte.

CRONETON und CURATERR

Für die Carbamat-Insektizide Croneton und Curaterr zeigte sich ebenfalls eine Zeitabhängigkeit der Wirkung. Nach 24 Stunden war der Anteil von bewegungsgestörten Tieren in der Regel höher als derjenige toter Tiere, während nach 7 Tagen zum überwiegenden Teil tote und nur noch sehr wenige gelähmte Tiere gefunden wurden. Die Lokomotionshemmung kann durch die neurotoxische Wirkung der Carbamate erklärt werden. Diese Stoffgruppe hemmt die Wirkung der Acetylcholinesterase (AChE) durch die Blockierung des Substratbindungsortes des Acetylcholins (HASSALL 1990). Dies führt zu einer Anreicherung von Acetylcholin (ACh) an cholinergen Synapsen und neuromuskulären Endplatten (GUPTA 1994). Diese Überstimulierung der ACh-Rezeptoren führt u. a. zu Krämpfen und damit zu Lokomotionsstörungen. Für den aktiven Wirkstoff des Curaterr, das Carbofuran, wurde diese Wirkung u. a. an Laufkäfern (JENSEN ET AL. 1997) und Stubenfliegen (COLLINS ET AL. 1983) untersucht. Letztere Untersuchung zeigte, dass Carbofuran innerhalb weniger Stunden nach topikaler Applikation durch die Insektenkutikula dringt und mit ansteigender Konzentration in der Hämolymphe zunehmend zu Lähmungserscheinungen führt. Für Collembolen liegen ebenfalls Untersuchungen mit Carbofuran vor, hier berichten DENAYER ET AL. (1983) von Lokomotionsstörungen bei *Folsomia candida* unmittelbar nach dem Kontakt mit einem Pestizidfilm. RONDAY ET AL. (1997) errechneten für *F. candida* eine Immobilisations- EC_{50} von 0,091 mg ai / kg TG nach 2 Tagen Expositionszeit. Dieses Ergebnis stimmt mit dem vorliegenden Wert für Curaterr von 0,14 mg ai / kg TG nach 24 Stunden Expositionszeit gut überein.

NEEMAZAL T/S

Im Fall des Insektizids NeemAzal T/S war die extreme Abhängigkeit der toxischen Wirkung von der Expositionsdauer besonders auffällig. Während nach 24 Stunden bei den untersuchten Konzentrationen von NeemAzal T/S keinerlei Effekte auf die Collembolen zu

beobachten waren, war nach 7 Tagen eine deutliche Schädigung der Tiere festzustellen, die zu einem hohen Anteil durch die Mortalität bestimmt wurde. Die ausgeprägte Zeitabhängigkeit der toxischen Wirkung zeigte sich auch bei der Durchführung der Reproduktionstests. Die Verwendung der im 7-Tage-Akutttest als unschädlich eingestuften Konzentrationen führte dort bei einer Exposition von 28 Tagen zu einer 100%igen Mortalität der Adulten, so dass der Test mit erheblich niedrigeren Konzentrationen wiederholt werden musste. Im Fall von NeemAzal T/S schien allerdings weniger die Formulierung als vielmehr der Wirkmechanismus des Azadirachtins für die zeitliche Verzögerung der toxischen Effekte verantwortlich zu sein:

Dieser Wirkstoff blockiert die Freisetzung des prothoracotrophen Hormons (PTTH) im Gehirn der Insekten. Hierdurch wird die Freisetzung von Ecdyson aus der Prothoraxdrüse gehemmt, was zu Häutungsstörungen und letztendlich zum Tod führt (MORDUE (LUNTZ) & BLACKWELL 1993). Bei Collembolen beträgt die Zeit zwischen zwei Häutungen abhängig von Alter der Tiere 4-10 Tage. Für 4 Wochen alte *Heteromurus nitidus*, wie sie in den hier beschriebenen Versuchen eingesetzt wurden, wurde ein durchschnittliches Häutungsintervall von 6,5 Tagen gemessen (KROOL & BAUER 1987). Dies erklärt, warum die toxische Wirkung von NeemAzal T/S erst im 7-Tage-Test sichtbar wurde und mit längerer Exposition weiter zunahm. Da die Eiablage bei Collembolen in den Intervallen zwischen zwei Häutungen stattfindet (MAYER 1957), muss der Reproduktionserfolg allein durch die Häutungsstörungen ebenfalls vermindert sein. Dies konnte durch die vorliegende Untersuchung an *Folsomia candida* bestätigt werden.

Durch NeemAzal T/S wurden in den vorgestellten Versuchen nach 7 Tagen Expositionszeit, wenn auch nur zu einem geringen Anteil, auch Bewegungsstörungen bei den untersuchten Collembolen ausgelöst. Diese könnten auf eine Wirkung des Azadirachtins auf die Muskulatur zurückzuführen sein. So beobachteten VON NICOL & SCHMUTTERER (1991) und WILPS ET AL. (1992) eine Verringerung der Lokomotions- und Flugaktivität bei Heuschrecken nach einer Behandlung mit Azadirachtin. Ob der Effekt durch eine Beschädigung der Muskulatur oder durch eine Hemmung der Erregbarkeit hervorgerufen wird, ist indes noch ungeklärt (MORDUE (LUNTZ) & BLACKWELL 1993).

Bei allen untersuchten Pflanzenschutzmitteln könnte auch das unterschiedliche Versuchsdesign der 24-Stunden-Tests im Vergleich zu den 7-Tage-Tests die Dynamik der toxischen Wirkung beeinflusst haben. In den Tests über 7 Tage wurde den Ansätzen Futter zugegeben, welches durch den direkten Kontakt mit dem kontaminierten Boden ebenfalls kontami-

niert worden sein könnte. Dieser Expositionsweg über den Magen-Darmtrakt, der für Collembolen neben einer Passage des Toxins durch das Integument ebenfalls eine Rolle spielen kann (WILES & KROGH 1998), war in den 24-Stunden-Tests nicht gegeben. Zudem bildete das Substrat in den Tests über 7 Tage eine lockere Krümelstruktur, in deren Poren sich die Collembolen bevorzugt aufhalten (DIDDEN 1987), wo sie durch den engeren Kontakt den Bioziden aber auch stärker ausgesetzt waren als auf der kompakten Bodenoberfläche der 24-Stunden-Tests.

4.1.1.3 Interspezifische Variation der Sensibilität in den Akuttests

Die Ergebnisse der Akuttests über 7 Tage zeigen zum Teil deutliche Sensibilitätsunterschiede der einzelnen Collembolenarten gegenüber den getesteten Handelsprodukten. Die Rangfolgen der relativen Empfindlichkeiten sind zusammenfassend in Abb. 49 dargestellt. Besonders einheitlich reagierten die sechs untersuchten Arten auf das Croneton. Extreme Unterschiede wurden hingegen für Curaterr festgestellt, obwohl es zur gleichen Stoffklasse wie das Croneton gehört. Die Effektkonzentrationen schwankten hier um den Faktor 55 zwischen der empfindlichsten Art *Folsomia candida* und der robustesten Art *Heteromurus nitidus*. Letztere reagierte wiederum auf Betanal am sensibelsten. Als allgemein empfindliche Art kann *Isotoma anglicana* eingestuft werden, da sie in den Akuttests mit Betanal, Karate, Cymbush und NeemAzal T/S zu den sensibelsten Arten gehörte. Sie zeigte jedoch auch in den Laborzuchten und in den Kontrollansätzen eine erhöhte Mortalität, so dass dieser Effekt nicht zweifelsfrei auf die toxische Wirkung der eingesetzten Substanzen zurückgeführt werden kann. Auf Curaterr reagierte sie allerdings 12 mal unempfindlicher als die empfindlichste Art *Folsomia candida*. Insgesamt kann somit keine der sechs Arten als besonders sensibel oder robust angesprochen werden kann. Auch die Zugehörigkeit zu einem bestimmten Lebensformtyp kann für eine Prognose der Sensibilität einer Art gegenüber einem unbekanntem Produkt nicht herangezogen werden. Selbst nah verwandte Arten wie *F. candida* und *F. fimetaria* reagierten uneinheitlich. Auch eine Übertragbarkeit der Empfindlichkeiten gegenüber Produkten der gleichen Substanzklassen lässt sich aus den Ergebnissen nicht ablesen.

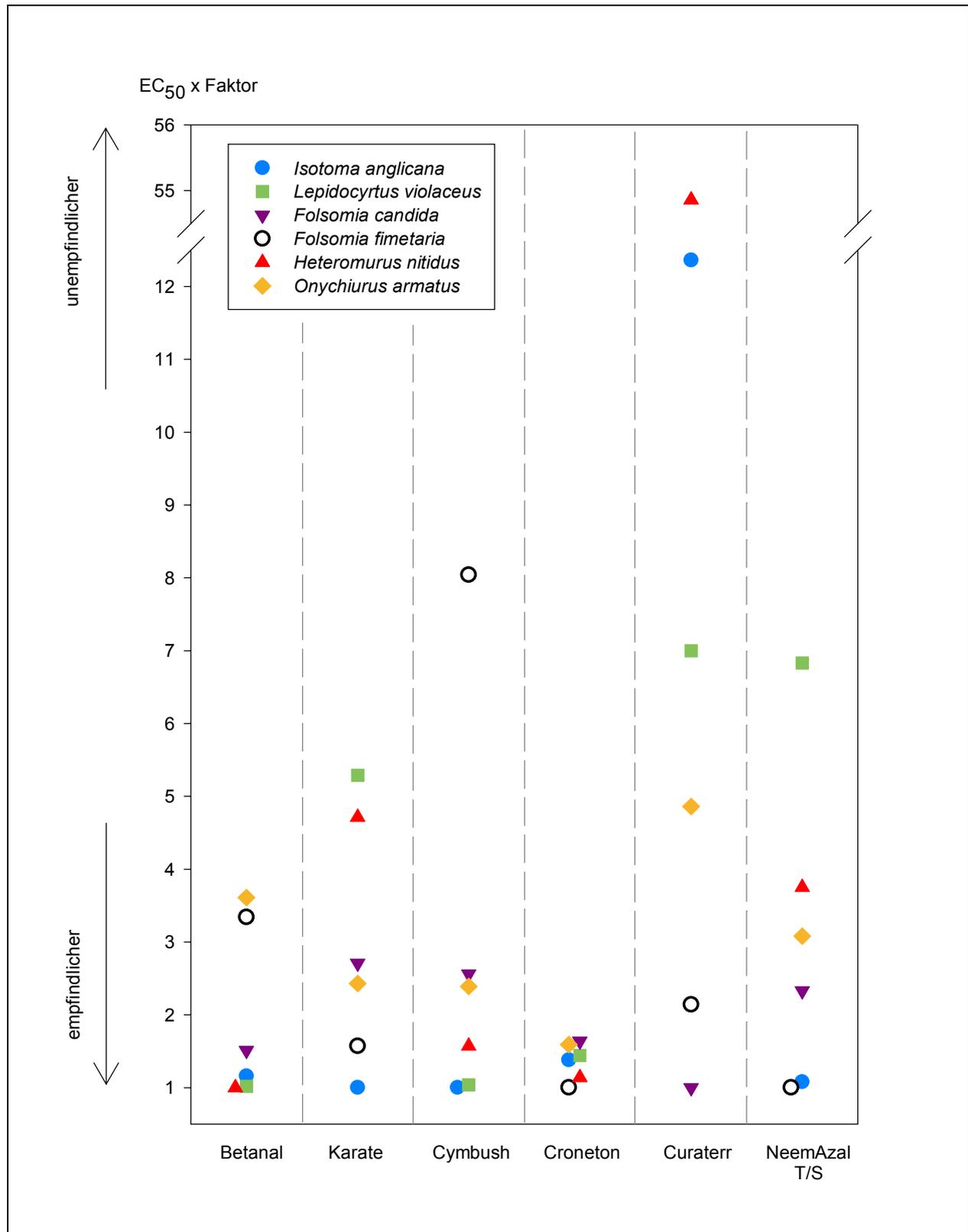


Abb. 49: Vergleich der Sensibilitäten der sechs Collembolenarten gegenüber den untersuchten Pflanzenschutzmitteln in den Akutttests über 7 Tage anhand der EC₅₀-Werte für die Schädigung. Die EC₅₀ der jeweils empfindlichsten Art entspricht 1. Die Ordinate gibt die Höhe aller anderen EC₅₀-Werte relativ zu diesem an.

Variierende Sensibilitäten gegenüber Schadstoffen stellen in ökotoxikologischen Untersuchungen an mehreren Arten einen verbreiteten Befund dar. In seiner zusammenfassenden Arbeit zur Biodiversität ökotoxikologischer Reaktionen gibt VAN STRAALLEN (1994) drei Faktoren an, die bestimmen, ob ein Organismus durch einen bestimmten Schadstoff in seiner Umwelt geschädigt wird:

1. das Ausmaß, in dem der Organismus dem Schadstoff ausgesetzt ist,
2. das Ausmaß, in dem der Organismus einen physiologischen Schaden erleidet,
3. die Fähigkeit des Organismus, seine Population nach dem Abklingen der Schadstoffwirkung wieder aufzubauen (bei Exposition im Freiland).

Als Ursache für die hier festgestellten Artunterschiede kommen Unterschiede in der Exposition der einzelnen Spezies weniger in Frage, da die Pestizide homogen im Substrat verteilt wurden und alle Arten somit der gleichen Kontamination ausgesetzt waren. Die einzelnen Arten zeigten jedoch unterschiedliche Tendenzen, in den Porenraum des durchmischten Substrats einzudringen und könnten somit unterschiedliche Mengen der Substanzen aufgenommen haben. Die Arten *F. fimetaria* und *O. armatus*, die besonders oft in kleineren Hohlräumen ihrer Zuchtgefäße zu finden waren, reagierten jedoch entgegen dieser Erwartung nicht generell empfindlicher als die eher oberflächlich lebenden Spezies.

Von größerer Bedeutung für die Interpretation dieser Ergebnisse scheint hier Punkt 2 zu sein. Die untersuchten Arten bewohnen unterschiedliche natürliche Habitate, in denen sie unterschiedlichen abiotischen wie biotischen Umweltfaktoren ausgesetzt sind. Es ist daher anzunehmen, dass sie über unterschiedliche Ausstattungen an Abwehr- und/oder Entgiftungsmechanismen verfügen. Erstere könnten z. B. aus einer dichten Beborstung bestehen, durch die ein Kontakt mit der umgebenden Matrix verringert wird. Auch die Dicke und Zusammensetzung des Integumentes können variieren (HOPKIN 1997). Bei einer oralen Aufnahme des Toxins spielt die Fraßhemmung durch Deterrentrezeptoren eine Rolle, die je nach Futterpräferenzen unterschiedlich ausgeprägt sein kann. Auch die Abwehrmechanismen auf zellulärem und subzellulärem Niveau können variieren. Biotransformationssysteme wie das Cytochrom P450 wurden auch bei Insekten nachgewiesen (FEYEREISEN 1999). Diese und andere Detoxifikationsmechanismen können von Art zu Art stark variieren (BROUWER ET AL. 1990).

Die vorgestellten Resultate weisen darauf hin, dass keiner der o. g. Faktoren allein für die Empfindlichkeit einer Art im Vergleich zu einer anderen verantwortlich ist. Vielmehr ist anzunehmen, dass die einzelnen Mechanismen komplex miteinander verknüpft sind und in der Summe ihrer Wirkungen die artspezifische Sensibilität bestimmen. Es wurde zudem gezeigt, dass die Reaktion einer Art weder Rückschlüsse auf die Reaktion einer nahe verwandten Art

noch Ableitungen zur Wirkung ähnlicher Toxine zulässt. Der resultierenden Reaktionsspannbreite sollte in ökotoxikologischen Studien zur Wirkung von Schadstoffen auf Organismengruppen Rechnung getragen werden, indem jede einzelne Substanz an möglichst vielen verschiedenen ökologisch relevanten Arten getestet wird.

4.1.2 Wahlversuche

Ein Hauptziel dieser Arbeit war die Etablierung von Wahlversuchen mit Collembolen. Hierdurch sollte der Frage nachgegangen werden, ob Collembolen in der Lage sind, den Kontakt mit Pflanzenschutzmitteln oder ihren Wirkstoffen zu vermeiden. Zu diesem Zweck wurde ein neues Versuchsdesign entwickelt und unter verschiedenen Bedingungen getestet. Aus den Ergebnissen dieser Wahlversuche werden Aussagen über die Repellenteigenschaften der getesteten Substanzen abgeleitet. Die Frage, ob eine beobachtete Repellentwirkung an den direkten Kontakt gebunden ist oder auch über die Gasphase vermittelt werden kann, wurde ebenfalls mit Hilfe eines für Collembolen neu entwickelten Testverfahrens untersucht. Bevor die Ergebnisse beider Versuche vergleichend diskutiert werden, sollen daher zunächst die verwendeten Methoden in Hinblick auf ihre Tauglichkeit, Testsicherheit und Standardisierbarkeit betrachtet werden. Abschließend werden die für die Chemorezeption bei Collembolen in Frage kommenden Strukturen kurz erläutert.

4.1.2.1 *Methodenkritik der Wahlversuche zur Kontaktrepellenz*

Das Design der in der vorliegenden Arbeit entwickelten Wahlversuche mit Collembolen orientierte sich an den für Regenwürmer von WENTSEL & GUELTA (1988), YEARDLEY ET AL. (1996) und HUND-RINKE & WIECHERING (2001) entwickelten Vermeidungsversuchen, d. h. die Tiere hatten die Wahl zwischen der kontaminierten und der unkontaminierten Seite eines Versuchsgefäßes. Als Endpunkt wurde die Anzahl von Tieren auf der kontaminierten Seite nach Ablauf der Versuchsdauer festgelegt. Die Methode wurde für die Untersuchung der Vermeidungsreaktionen von Collembolen jedoch in mehrfacher Hinsicht umgestaltet.

Erste Vorversuche hatten gezeigt, dass sich die Collembolen in Gefäßen mit locker eingefülltem, unkontaminiertem Boden nicht gleichmäßig verteilten, sondern zu einem hohen Anteil an der Stelle des Einsetzens verblieben. Dies lässt sich durch die Affinität der Tiere zu

dreidimensionalen Habitatstrukturen erklären, die eine Anpassung an ihren natürlichen Lebensraum im Porensystem des Bodens darstellt (VAN AMELSVOORT ET AL. 1988). Es ist anzunehmen, dass die Tiere diese Hohlräume innerhalb kurzer Zeit nach dem Einsetzen aufsuchten und diese offensichtlich auch bis zum Ende des Versuchs nicht mehr verließen. Erst durch das Festdrücken des Substrates konnte eine homogene Verteilung der eingesetzten Versuchstiere erreicht werden, wobei größere Gefäße zu einer geringeren Varianz der Verteilungen beitrugen. Für die hier dargestellten Wahlversuche wurden daher – gemessen an der Körpergröße der Versuchstiere – recht große Versuchsbehälter gewählt.

Durch den Einsatz von mehreren Individuen der gleichen Art in ein Gefäß besteht bei Versuchen, deren Endpunkt die Verteilung der Tiere ist, die Gefahr einer Verfälschung der Versuchsergebnisse durch die Bildung von Aggregationen. Dieses Verhalten ist gerade für Collembolen typisch und wurde in vielen Freilandstudien beschrieben (z.B. MILNE 1962, JENSEN & CORBIN 1966, USHER 1969). Das Aggregationsverhalten wird dabei durch Pheromone ausgelöst, die von beiden Geschlechtern gebildet und wahrgenommen werden (VERHOEF ET AL. 1977, LEONARD & BRADBURY 1984). Die Aggregationspheromone werden im Verdauungstrakt der Tiere gebildet (VERHOEF 1984) und über die Antennen wahrgenommen (VERHOEF ET AL. 1977).

Wäre ein Aggregationsverhalten in den Wahlversuchen gleich im Anschluss an das Einsetzen der Tiere in die Versuchsgefäße aufgetreten, hätte sich dies in den Kontrollen durch eine höhere Dichte der Versuchstiere am Einsatzort bemerkbar gemacht. Dies war bei der Art *Folsomia fimetaria* der Fall. Allerdings zeigten USHER & HIDER (1975), dass die Stärke der Aggregation bei der nahe verwandten Art *Folsomia candida* abhängig von der Zeit ist. Da *F. fimetaria* eine der kleinsten und damit langsamsten der hier untersuchten Arten war, könnten sich die Tiere in den relativ großen Versuchsgefäßen bereits auf der Seite des Einsetzens zu Aggregationen zusammengefunden haben, ohne auf die gegenüberliegende Gefäßhälfte zu wandern. Dieses Verhalten müsste jedoch durch einen starken Reiz, wie z. B. die Kontamination des Einsatzortes, gehemmt werden können. Tatsächlich konnte gezeigt werden, dass *F. fimetaria* beim Einsetzen auf die kontaminierte Bodenseite diese bei zunehmender Konzentration doch verließ und auf die unkontaminierte Hälfte abwanderte. Durch die pheromonelle Induktion ist das Aggregationsverhalten auch von der Populationsdichte abhängig (USHER & HIDER 1975), die im vorliegenden Fall mit 10 Tieren eher gering war. In Hinblick auf die Durchführung von Wahlversuchen mit Collembolen kann aus den Ergebnissen der vorliegenden Untersuchung jedenfalls die Empfehlung abgeleitet werden, die Art *F. fimetaria* nur einzusetzen, wenn die Möglichkeit eines Vergleichs mit einer Kontrollverteilung gegeben ist.

Wären die Aggregationen erst nach Ablauf einer gewissen Zeit aufgetreten, hätten sich in den einzelnen Replikaten ebenfalls sehr hohe Individuendichten auf einer Gefäßhälfte finden müssen. Durch die Wanderung der Tiere sollten solche Ballungen in den Kontrollen jedoch unabhängig vom Einsatzort sein. Bei einer ausreichend hohen Parallelenzahl würde eine hohe Streuung der einzelnen Verteilungen resultieren, wie sie in einigen Kontrollen und bei niedrigen Schadstoffkonzentrationen bei den Arten *Heteromurus nitidus*, *Isotoma anglicana* und *Onychiurus armatus* zu erkennen war. Bei einer zu niedrigen Parallelenzahl könnten die hohen Individuendichten als Meideverhalten fehlinterpretiert werden. Daher sollten in Wahlversuchen mit Collembolen mehr als die für Toxizitätstests üblichen drei bis fünf Replikate angesetzt werden. Zudem sollte auf ein möglichst homogenes Substrat in den Versuchsgefäßen geachtet werden, da Futter- und Feuchtigkeitsquellen bevorzugte Orte für Aggregationen darstellen (USHER & HIDER 1975). Auch Umweltfaktoren wie pH-Wert (MERTENS 1975), Bodentyp (CHRISTIANSEN 1970) und Licht (SALMON & PONGE 1998) spielen eine Rolle.

Der kombinierte Testansatz mit mehreren Collembolenarten ist bisher nur für Mikrokosmen beschrieben, Modellökosystemen, die zum Vergleich von Schadstoffeffekten auf verschiedenen Trophiestufen (PARMELEE ET AL. 1993, ADDISON 1996) oder zum Vergleich von Mineralisationsleistungen dienen können (MEBES & FILSER 1998). Für die zu entwickelnden Wahlversuche mit Collembolen bot der gemeinsame Ansatz mehrerer Arten den Vorteil der Zeit- und Materialersparnis, zwei im Hinblick auf den potenziellen Einsatz des Versuchs in Testbatterien sehr wichtige Aspekte. Wie die entsprechenden Versuche zeigten, ist zumindest für die hier verwendete Kombination ein gemeinsamer Versuchsansatz ohne weiteres möglich, da sich die einzelnen Arten in ihrer Verteilung offensichtlich weder auf einer homogenen noch auf einer durch Kontamination heterogenen Versuchsfläche gegenseitig beeinflussten.

4.1.2.2 Methodenkritik der Wahlversuche zur olfaktorischen Repellenz

Eine besonders genaue Methode für die Untersuchung der Wirkung von flüchtigen Substanzen auf Insekten ist die gerichtete und dosierte Begasung der Tiere in einem Luftstrom-Olfaktometer, wie es für die Untersuchung der Wirkung von Pheromonen und sekundären Pflanzenstoffen sowie der Parasit-Wirt-Interaktionen Verwendung findet (VET ET AL. 1983, GILES ET AL. 1996, MEINERS & HILKER 1997). Diese Geräte sind aufgrund ihrer Dimensionen für die Untersuchung von Collembolen jedoch wenig geeignet. Es wurde daher ein kleineres, statisches System entwickelt, in dem die Position jeweils eines Tieres relativ zu einem Sti-

mulus am äußeren Ende einer in fünf Felder unterteilten Laufstrecke fortlaufend registriert wurde. Die beobachtete Abhängigkeit der Reaktionsstärke von der eingesetzten Substanzkonzentration lässt auf den Aufbau eines olfaktorischen Gradienten im Versuchssystem schließen. Das Meideverhalten ließ sich durch die Aufenthaltshäufigkeit innerhalb dieses Gradienten quantitativ gut erfassen.

4.1.2.3 Repellenteffekte der einzelnen Pflanzenschutzmittel auf Collembolen

BETANAL

Das Herbizid Betanal rief bei allen untersuchten Collembolenarten signifikante Vermeidungsreaktionen hervor. Dabei kam es sowohl zu einer Hemmung der Einwanderung in das kontaminierte Areal wie auch zu einer Flucht aus demselben.

Die Stärke des Aversionsverhaltens der Collembolen stieg in beiden Versuchsansätzen mit der Herbizid-Konzentration an. Mit einem Anteil von 99% der Versuchstiere auf der unkontaminierten Seite zeigten die Arten *Isotoma anglicana* und *Onychiurus armatus* gegenüber Betanal die stärkste in allen Versuchen gemessene Reaktion. Diese Repellentwirkung von Betanal gegenüber Collembolen ist aus der Literatur bekannt. ULBER (1979) beobachtete eine geringere Besiedelung eines entsprechend der Aufwandmenge behandelten Bodens im Vergleich zu unkontaminiertem Boden durch *Onychiurus fimatus* im Laborversuch. Dabei ist zu bemerken, dass einige Collembolen der Gattung *Onychiurus* im Rübenanbau nicht zu den sog. Non-target-Organismen gehören, sondern durch ihre Fraßtätigkeit an Rübensamen als Schädlinge betrachtet werden, so dass eine Repellentwirkung durchaus erwünscht ist (ULBER 1979). Nachgewiesen wurde diese Schädwirkung u. a. für die Arten *O. fimatus* (ULBER 1980), *O. campatus* (BAUCHHENS & WEIGAND 1974), *O. armatus* (BROWN 1985, HUREJ ET AL. 1992) und *O. pseudarmatus* (GETZIN 1985).

Für Betanal berichten FRANZ & TANKE (1979) von einer abschreckenden Wirkung auch auf Schwebfliegen. Eine Repellentwirkung auf Collembolen ist auch von anderen Herbiziden wie Atrazin (AL-ASSIUTY & KHALIL 1996) und 2,4,5-T (EIJSAKERS 1978) bekannt.

In der vorliegenden Arbeit konnte gezeigt werden, dass die Repellentwirkung – wie auch die Toxizität, vgl. 4.1.1.1 – nicht vom Wirkstoff des Betanal ausging. WILBERT ET AL. (1979a) stellten fest, dass Blattläuse neben dem Produkt Betanal auch den Kontakt mit der Leerformulierung vermeiden. Das gleiche wurde für die hier untersuchten Collembolenarten beobachtet. Die abschreckende Wirkung des Produktes wie auch der Leerformulierung trat auch in den Versuchen zur olfaktorischen Repellenz deutlich zu Tage, wird also

offensichtlich (auch) über die Gasphase vermittelt. Das Phenmedipham hingegen löste in beiden Repellentversuchen keine Meidereaktion aus. Somit muss auch die Repellentwirkung von einem Zusatzstoff der Formulierung ausgehen. Der bei weitem flüchtigste der (bekannten) Hilfsstoffe in der Betanal-Formulierung ist das Isophoron mit einem Dampfdruck von 40 Pa. Es ist daher wahrscheinlich, dass die abschreckende Wirkung (anders als die toxische Wirkung, vgl. Abschnitt 4.1.1.1) von Betanal auf diesen Stoff zurückzuführen ist.

KARATE

In den Wahlversuchen wirkte Karate bei direktem Kontakt auf die Collembolenarten *Isotoma anglicana*, *Folsomia fimetaria*, *Heteromurus nitidus* und *Onychiurus armatus* abschreckend. Wie AKHTAR & BHATTI (1993) berichten, wirkt das Produkt auch auf Termiten repellent. LI ET AL. (1992) wiesen eine aggregationsauflösende Wirkung des Reinstoffs λ -Cyhalothrin bei verschiedenen Milbenarten nach. Der Wirkstoff zeigte dagegen keine abschreckende Wirkung auf *Anopheles*-Mücken (VILLAREAL ET AL. 1995) und Raubwanzen (*Triatoma infestans*) (ALZOGARAY & ZERBA 2001).

In der vorliegenden Untersuchung konnte auch der Repellenteffekt von Karate auf den aktiven Wirkstoff λ -Cyhalothrin zurückgeführt werden. Von den beiden Arten *H. nitidus* und *O. armatus*, die auf das Handelsprodukt reagiert hatten, zeigte allerdings nur die Art *H. nitidus* auch gegenüber dem Wirkstoff eine Meidereaktion.

Weder für die Formulierung noch für den aktiven Wirkstoff von Karate konnte eine olfaktorische Repellentwirkung nachgewiesen werden.

CYMBUSH

Für das Handelspräparat Cymbush konnte bei einigen Collembolenarten eine Repellentwirkung beobachtet werden, die jedoch nur für die Art *Isotoma anglicana* statistisch absicherbar war. Erheblich deutlicher trat der Effekt in den Versuchen zur olfaktorischen Repellenz zu Tage. Die Art *Onychiurus armatus* reagierte bei dieser Untersuchungsmethode mit einem ausgeprägten Vermeidungsverhalten, während sie bei direktem Kontakt nur leichte Reaktionen zeigte. Allerdings liegen der Wirkung über die Gasphase erheblich höhere Konzentrationen zu Grunde als in den Wahlversuchen zur Kontaktrepellenz eingesetzt werden konnten.

Die vorliegenden Versuchsergebnisse zeigen, dass auch Cypermethrin zumindest bei direktem Kontakt bei der Art *O. armatus* Vermeidungsreaktionen hervorrief. Eine entsprechende Reaktion auf den Wirkstoff über die Gasphase konnte allerdings nicht festgestellt werden. Die Repellentwirkung von Cypermethrin ist für andere Insekten gut bekannt. Sie wird u. a.

bei der Bekämpfung von Kriebelmücken (*Simulium spp.*) (SHEMANCHUK 1981) und Schaben (SCHNEIDER & BENNETT 1985) eingesetzt. Cypermethrin hat einen deutlich abschreckenden Effekt auf Honigbienen (RIETH & LEVIN 1988), die so den Kontakt mit dem toxischen Wirkstoff vermeiden (SMART & STEVENSON 1982, SMITH & STRATTON 1986). DELABIE ET AL. (1985) fanden eine Repellentwirkung auf Honigbienen hingegen nur für formuliertes Cymbush, der aktive Wirkstoff hatte in ihren Versuchen keinen abschreckenden Effekt.

CRONETON

In den vorgestellten Versuchen konnte gezeigt werden, dass einige Collembolenarten aus einem mit Croneton kontaminierten Areal flüchteten. Diese Reaktion setzte bei *Folsomia fimetaria* bereits bei einer Konzentration von 5,9 mg ai / kg TG ein. Damit reagierten Collembolen auf das Produkt erheblich empfindlicher als Enchytraeen, für die eine Wahrnehmungsschwelle von 1500 mg ai / kg TG ermittelt wurde (WAGNER-VASKE 2000). Die Wahlversuche mit dem aktiven Wirkstoff Ethiofencarb lieferten Hinweise darauf, dass dieser an der abschreckenden Wirkung beteiligt ist, die Ergebnisse waren jedoch statistisch nicht abzusichern. Die abschreckende Wirkung von Croneton wird auch über die Gasphase vermittelt. Das Ethiofencarb löste in den Versuchen zur olfaktorischen Repellenz demgegenüber ein deutlich schwächeres Meideverhalten aus. Insgesamt ist daher davon auszugehen, dass noch weitere Inhaltsstoffe der Croneton-Formulierung eine abschreckende Wirkung auf Collembolen haben. Aufgrund seiner starken Flüchtigkeit ist hier eine Beteiligung des Lösungsmittels Chlorbenzol anzunehmen, welches bereits als Kandidat für die Induktion der toxischen Effekte besprochen wurde (vgl. Abschn. 4.1.1.1).

CURATERR

Über die Repellentwirkung von Carbofuran oder des Handelsproduktes Curaterr gibt es in der Literatur nur wenige Angaben. Kleinringelwürmer der Gattung *Enchytraeus crypticus* mieden Curaterr im Gegensatz zu Betanal, Croneton und Cymbush im Wahlversuch nicht (WAGNER-VASKE 2000). Die abschreckende Wirkung von mit Carbofuran behandeltem Futter auf Vögel beschreibt LUTTIK (1998).

Für Collembolen konnte in den vorliegenden Versuchen eine Repellentwirkung von Curaterr nur bei *Heteromurus nitidus* in der maximalen Konzentration beobachtet werden. Dieser Effekt ließ sich für den Wirkstoff jedoch nicht nachweisen.

Die für die olfaktorischen Repellenttests verwendete Collembolenart *Onychiurus armatus* reagierte bei direktem Kontakt weder auf das Handelsprodukt noch auf den aktiven Wirkstoff, zeigte aber ein leichtes Meideverhalten gegenüber dem Produkt in der Gasphase. Hier könnten Hilfsstoffe der Formulierung eine Rolle spielen, die erst in sehr konzentrierter Form abschreckend wirken.

NEEMAZAL T/S

Laut Herstellerangabe besteht eine der Hauptwirkungen des Insektizids NeemAzal T/S in einer Hemmung der Fraßaktivität von Schädlingen durch seine abschreckende (Deterrent-) Wirkung. Diese wurde u. a. für Blattläuse (LOWERY & ISMAN 1993) und Blattwespen (SMIRLE & WEI 1996) sowie die Larven verschiedener Eulenfalter (ISMAN 1993, GOVINDACHARI ET AL. 2000) und des Kohlweißlings (LIN-ER ET AL. 1995) beschrieben und von LEY ET AL. (1993) auf den Wirkstoff Azadirachtin A zurückgeführt.

In den hier durchgeführten Untersuchungen wurde nur der Effekt des Insektizids auf den Aufenthaltsort der Collembolen bestimmt, eventuelle fraßhemmende Eigenschaften waren nicht Ziel der Beobachtung. Dennoch konnten auch Repellenteigenschaften auf Collembolen festgestellt werden. Bei direktem Kontakt mieden vier der untersuchten Collembolenarten das Produkt NeemAzal T/S. Für die Arten *Isotoma anglicana*, *Folsomia fimetaria* und *Onychiurus armatus* wichen die Verteilungen dabei signifikant von der Kontrolle ab. Auch der Neemkernextrakt NeemAzal, der 35% des aktiven Wirkstoffs Azadirachtin A enthält, wirkte abschreckend. Die Leerformulierung hatte keine Auswirkung auf das Verhalten der Tiere. In den olfaktorischen Tests zeigten das Handelsprodukt und der Neemkernextrakt nur sehr geringe Repellentwirkungen. Eine Wirkung über die Gasphase ohne direkten Kontakt, wie von HEYDE ET AL. (1984, zitiert nach SCHMUTTERER 1990) für die braunrückige Reiszikade *Nilaparvata lugens* beschrieben, kann durch die vorliegenden Versuchsergebnisse daher nicht eindeutig bestätigt werden. Einen deutlich abschreckenderen Effekt auf die untersuchte Collembolenart *O. armatus* hatte hier das zu Vergleichszwecken eingesetzte kaltgepresste Neem-Öl. Dieses Ergebnis ist besonders interessant, da WULF & SCHEIDEMANN (1990) und ERMEL (1995) berichten, dass Neem-Öl nur einen sehr geringen Anteil von Azadirachtin A enthält. Das Ergebnis deutet demnach darauf hin, dass die Repellentwirkung des Neem-Öls im Gegensatz zu der des Neem-Azal T/S und des Neemkernextraktes von anderen Inhaltsstoffen als dem Azadirachtin A ausgeht.

4.1.2.4 Konzentrations-Wirkungsbeziehungen in den Wahlversuchen zur Kontaktrepellenz

Für jene Substanzen, die eine Auswirkung auf das Verhalten und damit die Verteilung der Versuchstiere in den Wahlversuchen zur Kontaktrepellenz hatten, war eine deutliche Konzentrations-Wirkungsbeziehung festzustellen. In einigen Versuchsansätzen unter Verwendung von Betanal, Karate, Cymbush und NeemAzal T/S reagierten die Tiere auf ansteigende Konzentrationen zwar mit einer Verstärkung der Vermeidungsreaktion, bei den höchsten getesteten Konzentrationen war hingegen ein Abfall der Reaktionsstärke zu beobachten. Die

Erklärung für dieses Phänomen könnte in dem für die Auslösung des Meideverhaltens zuständigen sensorischen System der Collembolen zu finden sein. Es könnte sich hierbei allerdings auch um Symptome einer beginnenden Intoxikation durch die betreffenden Pflanzenschutzmittel handeln.

Zum einen könnte sich mit zunehmender Konzentration die Moleküldichte der Testsubstanz in der Gasphase erhöhen und dadurch die Orientierung der Tiere gegenüber der Reizquelle „Bodenkontamination“ auf einer Seite des Versuchsgefäßes erschwert werden. Die Annahme kann aber nur dann zutreffen, wenn die Tiere in der Lage wären, die entsprechenden Substanzen auch olfaktorisch wahrzunehmen (zur Sinnesphysiologie der Collembolen und zur Abgrenzung Kontakt- olfaktorische Wahrnehmung siehe Abschnitt 4.1.2.5). Durch die Versuche zur olfaktorischen Repellenz wurde dies für Betanal und Cymbush, sowie in geringerem Umfang für NeemAzal T/S nachgewiesen. Karate hingegen konnte über die Gasphase nicht wahrgenommen werden, es hat mit $2E^{-9}$ hPa auch einen wesentlich geringeren Dampfdruck als z. B. das Betanal mit 0,3 hPa. Für die Handelsprodukte Cymbush und NeemAzal T/S liegen hierzu leider keine Angaben vor. Die Verringerung der Meidereaktion bei hohen Konzentrationen kann somit zumindest für das Karate nicht durch eine Wirkung über die Gasphase, durch die die Orientierung behindert würde, erklärt werden.

Das Phänomen ist auch neurophysiologischen Interpretationen zugänglich. Die Wahrnehmung der durch die Bodenkontamination mit Pflanzenschutzmitteln gegebenen chemischen Reize geschieht bei Insekten durch Chemorezeptoren. Diese werden durch Bindung der Substanz stimuliert und können dadurch Antworten in Motoneuronen auslösen. Die Verhaltensantwort kann entweder in einer gerichteten Bewegung vom Reiz weg oder in einer Steigerung der allgemeinen Lokomotionstätigkeit bestehen, durch die die Wahrscheinlichkeit, eine reizfreie Zone zu erreichen, erhöht wird. Derartige Hyperaktivitätserscheinungen wurden auch für einige der hier verwendeten Substanzen beobachtet, so für Cypermethrin und λ -Cyhalothrin (TOTH & SPARKS 1990, ALZOGARAY & ZERBA 2001) sowie Carbofuran (MOOSBECKHOFER 1983). Bei steigender Pestizidkonzentration summieren sich die Eingänge von Rezeptoren und es werden stärkere motorische Antworten ausgelöst.

Unter der langandauernden Einwirkung eines Reizes kann es durch eine Sättigung der verfügbaren Rezeptorstellen zu einer sensorischen Adaptation, d.h. einer Verminderung der Empfindlichkeit der Rezeptorzellen kommen, durch die die Antworten der Motoneuronen und damit die Verhaltensreaktionen vermindert werden.

Ein häufig wiederkehrender Reiz, wie er durch den wiederholten Kontakt mit der kontaminierten Fläche gegeben ist, kann auch durch die Herabsetzung der Neurotransmitterabgabe

der sensorischen Zellen an die nachgeschalteten Neuronen zu einer Abschwächung der Verhaltensantwort führen (Habituation).

Schließlich ist eine Ermüdung des motorischen Systems, gerade vor dem Hintergrund einer lokomotionssteigernden Wirkung vieler Pflanzenschutzmittel nicht auszuschließen, so dass die Tiere nach einiger Zeit nicht mehr in der Lage wären, dem Reiz zu entfliehen (neurobiologische Aspekte nach SHEPHERD 1993).

Die Ergebnisse könnten auch auf einen Lähmungseffekt der fraglichen Substanzen hinweisen, durch den einige Tiere am Verlassen des kontaminierten Bodens gehindert würden, ähnlich wie PETERSEN & GJELSTRUP (1998) aus direkter Beobachtung in ihren Wahlversuchen mit *Folsomia fimetaria* und dem Insektizid Dimethoat folgerten. Zur Vermeidung gerade dieses Effektes wurden in der vorliegenden Arbeit alle Versuche zur Kontaktrepellenz bei Konzentrationen durchgeführt, für die in vorausgegangenen Akuttests bei weniger als 20% der Versuchstiere eine Schädigung beobachtet worden war. Dieser Restanteil lokomotionsgestörter Tiere könnte jedoch schon zu den beobachteten Effekten geführt haben.

4.1.2.5 Olfaktorische Wahrnehmung bei Collembolen

Das wichtigste olfaktorische Organ aller Insekten sind die Antennen. Insbesondere auf den beiden proximalen Antennensegmenten befinden sich Geruchssensillen mit zentral gelegenen Sinneszellen, von denen Axone bis in das Zentralnervensystem ziehen (KEIL 1999). Euedaphische Collembolen besitzen neben diesen Borstensensillen noch sog. sensorische Komplexe oder Antennalorgane auf dem dritten Antennensegment, die aus zwei oder mehr zapfenförmigen Sensillen bestehen und der Chemorezeption dienen (EISENBEIS & WICHARD 1985). Viele Arten besitzen zudem ein ausstülpbares Endbläschen an der Antennenspitze, das ebenfalls sensorische Zellen enthält (ALTNER & KUHN 1989, zitiert nach HOPKIN 1997). Eine weitere Besonderheit von euedaphischen Collembolen stellt das Postantennalorgan (PAO) dar, das bei Onychiuriden aus einer Grube in der Kopfoberfläche besteht und aus zahlreichen Wülsten mit fein perforierter Kutikula besteht (EISENBEIS & WICHARD 1985). Die Funktion des PAO ist noch weitgehend ungeklärt, durch die Porenstruktur könnte es ebenfalls an der olfaktorischen Wahrnehmung beteiligt sein (ALTNER & THIES 1976). Bei längerer Beobachtung der Collembolen fällt auf, dass die Tiere die Antennen häufig durch die Luft bewegen oder mit ihnen das Substrat berühren. Sie können somit sowohl chemische Reize über die Luft als auch aus dem Boden aufnehmen. Wie die vorliegende Untersuchung an der Art *Onychiurus armatus* beispielhaft gezeigt hat, wurden einige Substanzen ausschließlich über die Gasphase und nicht bei direktem Kontakt wahrgenommen. Dies könnte durch die

erheblich höheren Substanzkonzentrationen im olfaktorischen Versuch erklärt werden. Andererseits reagierten die Tiere im Fall von Karate und Cypermethrin genau umgekehrt, diese Substanzen wurden zwar bei direktem Kontakt, jedoch nicht über die Gasphase wahrgenommen. Dies lässt darauf schließen, dass hier ein weiteres sensorisches System beteiligt ist, das nur bei direktem Kontakt mit dem Repellent anspricht. Hierbei könnte es sich um Geschmackssensillen handeln, die bei Insekten an den Mundwerkzeugen (Maxillen) sitzen. Bei vielen Arten wurden spezialisierte Deterrentrezeptoren entdeckt, deren Reizung eine Fraßhemmung bewirkt (EICHENSEER & MULLIN 1996, SIMMONDS ET AL. 1996, VAN LOON & SCHOONHOVEN 1999). Inwieweit auch Collembolen über derartige Rezeptoren verfügen, ist im Detail nicht geklärt. Versuche zur toxischen Wirkung von bleibelastetem Futter weisen jedoch auf eine Wahrnehmung der Kontaminante und Nahrungsverweigerung bei hohen Bleikonzentrationen hin (KRONSHAGE 1991). Die Vermeidung von Substanzen bei direktem Kontakt, jedoch ohne Beteiligung der olfaktorischen Sinne könnte auch durch Veränderungen der Konsistenz des Bodensubstrats vermittelt werden, die dann von den Collembolen über die Mechanorezeptoren der Spürhaare an den Tibiotarsen wahrgenommen werden könnten. So könnte der Boden durch ölige Formulierungsbeistoffe klebriger werden oder Lösungsmittel könnten die dünne Kutikula an diesen Sinnesborsten reizen.

4.1.3 Sensibilität der einzelnen Labortests

Wie die Zusammenfassung der LOEC-Werte aller hier durchgeführten Laborversuche in Tabelle 32 zeigt, schränkten fünf der sechs untersuchten Pflanzenschutzmittel bereits in geringen Konzentrationen die Reproduktion der Testart *Folsomia candida* ein, während Lokomotionsstörungen oder Mortalität bei adulten Tieren erst bei teilweise deutlich höheren Konzentrationen auftraten. Die Reproduktion stellte somit wie erwartet einen sensibleren Endpunkt für Toxizitätstests dar als die Mortalität (Schädigung). Mit Hilfe des hier verwendeten Reproduktionstests konnte zudem gezeigt werden, dass ein beobachteter Rückgang der Populationsgröße nicht in jedem Fall auf eine Verminderung der Fertilität zurückgeführt werden kann. So wurde für das Insektizid Cymbush keine Wirkung auf die Reproduktion gefunden. Die Durchführung des Reproduktionstests nach ISO (1998) hätte hier dennoch eine toxische Wirkung aufgezeigt, da bei höheren Konzentrationen eine zunehmende Sterblichkeit der Adulten eintrat. Der ISO-Test stellt im Hinblick auf die Risikoabschätzung von chemischen Substanzen durch seinen kombinierten Ansatz, bei dem die Effekte von Mortalität und Reproduktionsrate nicht getrennt erfasst werden, ein wichtiges Instrument zur Beschreibung der

Wirkungen auf Populationsebene dar. Für die hier untersuchte Fragestellung bezüglich der Sensitivität unterschiedlicher Testparameter sollten jedoch ausschließlich die fertilitätsbeeinträchtigenden Effekte der untersuchten Pflanzenschutzmittel betrachtet werden.

Der Vergleich der Empfindlichkeit von herkömmlichen Toxizitätstests mit Vermeidungstests wirft zunächst ein methodisches Problem auf. Die LOEC (hier: niedrigste Konzentration, die ein Meideverhalten auslöst) für die einzelnen Versuchsansätze wurde mit Hilfe der Varianzanalyse bestimmt. Dies ermöglicht zum einen den direkten Vergleich der Wahrnehmungsschwellen mit den ermittelten Toxizitätsschwellen, das Verfahren ist jedoch durch die starke Streuung der Werte nur bedingt für die Beschreibung der Repellenteffekte geeignet. Bei der Betrachtung der Ergebnisdarstellungen fällt auf, dass die Mittelwerte der Collembolenverteilungen oftmals auf eine Vermeidungsreaktion hindeuten, diese aber infolge der hohen Streuung der Daten durch die statistische Überprüfung nicht belegt werden kann. In Tabelle 32 sind daher neben den statistisch absicherbaren Resultaten auch jene Konzentrationen angegeben, bei denen der Anteil von Tieren auf der kontaminierten Gefäßhälfte um mehr als 20 Prozentpunkte von der Kontrolle abwich. Eine Differenz dieser Größenordnung war innerhalb der Kontrollversuche zwischen den Verteilungen nie beobachtet worden und kann daher als Meidetendenz interpretiert werden. Bei ausreichend geringer Streuung der Werte wurden derartige Verteilungen von der ANOVA auch stets als signifikant bewertet.

Der Vergleich der LOEC von Toxizitäts- und Vermeidungstests liefert den Nachweis, dass das Verhalten gegenüber einem potentiellen Schadstoff bei Collembolen in einigen Fällen ein sensiblerer Parameter sein kann als die akute Toxizität oder sogar die Reproduktion.

Tab. 31: Lowest observed effect concentrations (LOEC) für die einzelnen Laborversuche (ANOVA mit nachfolgenden Dunnett's-Test, $\alpha=5\%$). Alle Angaben in [mg ai / kg TG].

- : kein Effekt beobachtet > : maximale getestete Konzentration (): Vermeidungsreaktion nicht signifikant, aber gegenüber der Kontrolle um 20 Prozentpunkte verringerte Individuenanzahl

	Akuttests		Reproduktionstests	Wahlversuche zur Kontaktrepellenz	
	24h	7d	28d	Einwanderung	Flucht
BETANAL					
<i>I. anglicana</i>	13	13		5,9	0,7
<i>L. violaceus</i>	10	7,7		10	(5,9)
<i>F. candida</i>	10	10	7,7	3,5	17
<i>F. fimetaria</i>	28,9	22,2		-	3,5
<i>H. nitidus</i>	7,7	7,7		5,9	5,9
<i>O. armatus</i>	28,9	28,9		3,5	5,9
KARATE					
<i>I. anglicana</i>	13	13		(2)	3,5
<i>L. violaceus</i>	185,1	64,1		-	-
<i>F. candida</i>	314,7	37,7	17	-	-
<i>F. fimetaria</i>	28,9	17		3,5	-
<i>H. nitidus</i>	> 214,4	49,1		1,2	10
<i>O. armatus</i>	142	17		5,9	5,9
CYMBUSH					
<i>I. anglicana</i>	28,9	28,9		5,9	-
<i>L. violaceus</i>	37,7	22,2		(28,9)	-
<i>F. candida</i>	37,7	37,7	-	-	-
<i>F. fimetaria</i>	49,1	49,1		-	-
<i>H. nitidus</i>	37,7	28,9		(28,9)	(49,1)
<i>O. armatus</i>	64,1	49,1		(17)	(10)
CRONETON					
<i>I. anglicana</i>	17	10		-	10
<i>L. violaceus</i>	22,2	17		-	-
<i>F. candida</i>	13	17	3,5	-	-
<i>F. fimetaria</i>	10	7,7		-	5,9
<i>H. nitidus</i>	22,2	13		-	(5,9)
<i>O. armatus</i>	22,2	17		(10)	-
CURATERR					
<i>I. anglicana</i>	2,0	1,2		-	-
<i>L. violaceus</i>	1,6	0,7		-	-
<i>F. candida</i>	0,41	0,14	0,084	-	-
<i>F. fimetaria</i>	0,32	0,32		-	-
<i>H. nitidus</i>	5,9	5,9		5,9	5,9
<i>O. armatus</i>	0,7	0,54		-	-
NEEMAZAL T/S					
<i>I. anglicana</i>	> 10	2		10	5,9
<i>L. violaceus</i>	> 37,7	4,5		-	-
<i>F. candida</i>	>28,9	2	0,05	-	-
<i>F. fimetaria</i>	> 5,9	0,92		-	2
<i>H. nitidus</i>	> 28,9	3,5		(0,7)	(1,2)
<i>O. armatus</i>	> 22,2	2,7		1,2	0,7

4.2 FREILANDUNTERSUCHUNGEN

4.2.1 Artenspektrum und Abundanzen der Collembolen auf der Versuchsfläche

Nach der Bestimmungsliteratur von GISIN (1960) und FJELLBERG (1980) sind die auf der Dauerbrache gefundenen Arten ausnahmslos häufige, meist europaweit verbreitete Arten, die entweder euryök oder bevorzugt auf Wiesen und Weiden zu finden sind. Die meisten Arten wurden auch in anderen Untersuchungen auf Wiesen (HELLING & LARINK 1996) oder Äckern gefunden (FRAMPTON 1999, ALVAREZ ET AL. 2001). Die Abundanzen erreichten mit ca. 30.000 Individuen / m² für Wiesenökosysteme typische Werte (HALE 1967), ähnlich jenen, die auch MEBES & FILSER (1998) auf einer Brachfläche fanden.

Trotz ähnlicher Gesamtarten- und Individuenzahl waren die Abundanzen der gefundenen Arten im Jahr 2000 homogener verteilt als 1999. Dies spiegelt sich in einer höheren Diversität und Evenness wider. Aufgrund der jährlich einmaligen Probenahmen ist eine Interpretation dieser Unterschiede natürlich nur unter Vorbehalt möglich. Hier könnten u. a. die jahreszeitlich verschiedenen Probenahmeterminen eine Rolle spielen, da die Fläche zum erstenmal Ende Juli 1999 und zum zweitenmal Anfang September 2000 beprobt wurde. Die Abundanzen der meisten Collembolenarten unterliegen saisonalen Schwankungen und können sich gerade im Übergang Sommer/Herbst dramatisch ändern (USHER 1970, FILSER 1991, LAGERLÖF & ANDRÉN 1991). Besonders auffällig sind die im Vergleich zum Juli 1999 stark erhöhten Abundanzen der Symphyleonen *Sminthurinus aureus* und *Sminthurides pumilis* im September 2000. Dieser Abundanzverlauf ähnelt den Ergebnissen von der Untersuchung von MILNE (1962), der im Oktober mehr als doppelt so viele Individuen der Art *Sminthurides schötti* fand wie noch im August.

4.2.2 Besiedelungsversuche

Die Kontamination der Streu in den Netzbeuteln mit Betanal bzw. Cymbush entsprechend der praxisüblichen Aufwandmenge führte nur bei einer von 16 (Betanal) bzw. drei von 17 (Cymbush) in den Beuteln gefundenen Arten zu einer gegenüber der Kontrolle signifikant verminderten Besiedelung. Die beiden auf Cymbush reagierenden Arten gehörten zur Familie der Sminthuridae, deren Verhalten in den Labortests nicht untersucht worden war, da es nicht gelang, die Tiere dauerhaft in Zucht zu halten. Die Arten *Isotoma anglicana*,

Lepidocyrtus violaceus und *Heteromurus nitidus*, für die in den Wahlversuchen zur Kontaktrepellenz eine Tendenz zur Vermeidung von Cymbush festgestellt wurde, reagierten im Freiland nicht. In den mit Betanal behandelten Beuteln war nur die Art *I. anglicana* in geringerem Maße als in die Kontrollbeutel zu finden. Diese Art - wie auch alle anderen im Wahlversuch getesteten Arten - hatte das Herbizid auch im Laborversuch gemieden.

Diese Ergebnisse führten zu der Vermutung, die Pflanzenschutzmittel könnten im Laufe der Expositionszeit abgebaut und die Repellentwirkung somit vermindert worden sein. Untersuchungen von GOTTESBÜHREN & PESTEMER (1994) hatten zwar gezeigt, dass Phenmedipham erst innerhalb von 6 Monaten bis zur Nachweisgrenze abgebaut wird, da jedoch – wie inzwischen durch Laborversuche ermittelt – nicht der aktive Wirkstoff sondern die Formulierung von Betanal für die Repellentwirkung auf Collembolen verantwortlich ist, und diese Formulierung teilweise sehr flüchtige Substanzen enthält, wurde der Besiedlungsversuch mit verkürzter Expositionszeit wiederholt. Aufgrund der stärkeren Reaktion der Versuchstiere gegenüber Betanal in den Laborversuchen wurde auf eine Verwendung von Cymbush im zweiten Freilandversuch verzichtet. Die Konzentration von Betanal wurde bis an die Schwelle der schädigenden Wirkung erhöht, um einen maximalen Effekt zu erreichen.

Die Netzbeutel waren nach der Exposition stark mit Schimmelpilzen durchsetzt, die für die fungivoren Collembolen eine Erhöhung des Nahrungsangebotes dargestellt haben könnten. Diesen Effekt einer Abhängigkeit der Besiedlung von Nahrungsquellen haben CHEN & WISE (1997) nachgewiesen. Die Collembolenpopulation wuchs in ihrem Versuch in 2 Monaten in nahrungsreichen Arealen viermal stärker als in Kontrollgebieten. Die Attraktion durch die Pilze in den Netzbeuteln könnte also die Repellentwirkung der Pflanzenschutzmittel überdeckt haben, da Collembolen Pilze ihres Nahrungsspektrums sehr gut olfaktorisch wahrnehmen können (BENGTSSON ET AL. 1988, 1991). Aus diesem Grund wurden im zweiten Freilandversuch Streudosen eingesetzt. Diese waren nicht komprimierbar und wurden zudem mit einer geringeren Menge Streu befüllt. Eine Verdichtung und dadurch erleichterte Verpilzung des Substrates konnte so verhindert werden.

Trotz dieser Veränderungen konnte auch mittels der Streudosen keine Repellentwirkung von Betanal unter Freilandbedingungen nachgewiesen werden. Sowohl die Individuenzahl pro Dose wie auch die Indices Diversität und Evenness erreichten in den mit der höchsten Herbizidkonzentration behandelten Dosen sogar etwas höhere Werte als in den Kontrollen. Eventuell wurden durch das Mittel Räuber oder Nahrungskonkurrenten abgetötet, wodurch es zu einer stärkeren Vermehrung der Collembolen kommen konnte. In der Tat lag die Gesamtzahl der Juvenilen mit 394 in den Dosen mit der höchsten Betanalkonzentration etwas höher als in jenen mit der niedrigeren Konzentration (375) und in den Kontrollen (346).

Inwieweit bei der Besiedelung der Netzbeutel und Streudosen eine Repellentwirkung der verwendeten Pestizide überhaupt eine Rolle gespielt hat, erscheint fraglich. Beide Versuchseinheiten, Streudosen wie Netzbeutel, stellten ein unbesiedeltes Habitat dar, dessen mikroklimatische Eigenschaften den ökologischen Ansprüchen von Collembolen sehr entgegenkamen. Ein Vergleich der beiden Versuchseinheiten stützt diese Hypothese: umgerechnet auf eine Einheit trockener Streu waren in den Streudosen mehr als doppelt so viele Individuen zu finden wie in den Netzbeuteln, bei ähnlichen Abundanzen im Einzugsgebiet. Die Streudosen hatten ein größeres Volumen, das mit weniger Streu gefüllt war als die Netzbeutel. Dadurch konnte eine größere Zahl von Hohlräumen mit besserer Luft- und Wasserdampfkirkulation entstehen, zusammen also beste Existenzbedingungen für Collembolen. Derartige neu geschaffene Habitate werden besonders von epedaphischen Collembolen innerhalb kürzester Zeit (wieder-)besiedelt, wie WOLTERS (1985) und UFER ET AL. (1993) gezeigt haben.

Durch die Abgrenzung der Versuchseinheiten mittels relativ engmaschiger Gaze konnten zudem keine größeren Räuber wie Spinnen, Laufkäfer, Hundertfüßler und Kurzflügelkäfer in die Streu einwandern. Die stärkere Besiedlung der Streudosen durch Collembolen im Vergleich zu den Netzbeuteln könnte somit auch mit der geringeren Maschenweite (1 mm im Gegensatz zu 2 mm bei den Netzbeuteln) in Verbindung gebracht werden. Tatsächlich wurden bei der Extraktion der Streudosen hauptsächlich Raubmilben und Symphylen als collembolenfressende Prädatoren gefunden, während sich in den Netzbeuteln auch kleinere Spinnen und einige Kurzflügelkäfer befanden, die die Collembolenpopulation entsprechend dezimiert haben könnten. Gleichwohl wird die Räuberdichte innerhalb der Versuchseinheiten in beiden Fällen erheblich geringer gewesen sein als in der Umgebung.

Zusammenfassend muss festgestellt werden, dass die hier verwendete Versuchsmethode für die Untersuchung einer Repellentwirkung von Pflanzenschutzmitteln im Freiland nicht geeignet ist. Für eine Weiterentwicklung und Verbesserung der Methode wäre zunächst eine Analyse des Pestizidgehaltes der Streu zum Zeitpunkt der Ausbringung im Freiland und in kurzen Abständen danach nötig, um den tatsächlichen Abbauprozess des eingesetzten Mittels verfolgen zu können. Eine entsprechend verkürzte Expositionszeit der vorgestellten Versuchsgefäße wäre aufgrund der beobachteten raschen Einwanderungsaktivität der Collembolen ohne weiteres möglich. Eine Kombination des Versuchs mit dem Einsatz von Köderstreifen (VON TÖRNE 1990a,b) würde eine kontinuierliche Abschätzung der Besiedlung anhand der Fraßaktivität der eingewanderten Tiere ermöglichen. Durch kontaminierte Köderstreifen wäre zudem die Deterrentwirkung der Pflanzenschutzmittel erfassbar (PAULUS ET AL. 1999). Die Kontrolle der Zu- bzw. Abwanderung nach Kontamination von ganzen Flächen könnte mithilfe von Barrieren (MEBES & FILSER 1997) oder über das behandelte Areal

gestülpten Käfigen (GRÉGOIRE-WIBO 1983), durch die die Wanderungsrichtung der mittels Bodenfallen oder –proben gefangenen Collembolen ermittelt werden kann, erreicht werden. Auch bei diesen Versuchsansätzen wäre eine Ermittlung der subletalen Pestizidkonzentration vor der Begiftung sinnvoll, um akuttoxische Effekte ausschließen und Populationschwankungen möglichst eindeutig auf eine Abwanderung von Tieren aus dem behandelten Areal zurückführen zu können.

4.3 SCHLUSSFOLGERUNGEN

Aus den in dieser Untersuchung durchgeführten Laborversuchen zur Toxizität der Pflanzenschutzmittel Betanal, Karate, Cymbush, Croneton, Curaterr und NeemAzal T/S sowie ihrer Wirkstoffe auf die sechs Collembolenarten *Isotoma anglicana*, *Lepidocyrtus violaceus*, *Folsomia candida*, *Folsomia fimetaria*, *Heteromurus nitidus* und *Onychiurus armatus* lassen sich folgende Schlussfolgerungen ziehen:

1. Die toxische Wirkung der Handelsprodukte Betanal und Cymbush auf die Collembolen geht in den untersuchten Konzentrationen nicht vom jeweiligen aktiven Wirkstoff sondern von Beistoffen der Formulierung aus. Dieses Phänomen muss bei der Festlegung von Datenanforderungen im Zulassungsverfahren von Pflanzenschutzmitteln berücksichtigt werden.
2. Die sechs Collembolenarten zeigen zum Teil erhebliche Sensitivitätsunterschiede gegenüber den Pflanzenschutzmitteln. Die Toxizität von Curaterr war besonders stark von der betrachteten Art abhängig. Sie lag für *F. candida* um den Faktor 55 höher als für *H. nitidus*. Eine generelle Rangfolge der Sensitivitäten ließ sich für die untersuchten Arten nicht feststellen. Für eine Bewertung der Pflanzenschutzmittelaktivität gegenüber Nichtzielorganismen sind Monospezies-tests daher wenig aussagekräftig.

Die Ergebnisse der Vermeidungsversuche, bei denen den Tieren die Wahl zwischen dem Aufenthalt auf kontaminiertem und unkontaminiertem Boden gegeben wurde, sowie die Resultate der Versuche zur olfaktorischen Repellenz, durch die eine Wahrnehmung der Pflanzenschutzmittel über die Gasphase festgestellt werden sollte, führten zu folgenden Schlussfolgerungen:

3. Durch die Wahrnehmung potenziell toxischer Substanzen können die Tiere den Kontakt mit diesen bis zu einem gewissen Grad vermeiden. Wie der Fall des Insektizids Curaterr zeigt, ist dies jedoch nicht für alle Kontaminanten möglich. Die Reaktion auf sehr geringe, subletale Konzentrationen, wie für Karate gezeigt, könnte zu einer Abwanderung aus kontaminierten Arealen und damit zu einem Populationsrückgang mit negativen Folgen für die Bodenfruchtbarkeit führen. Diese Effekte können bei der Risikoabschätzung auf der Grundlage von Mortalität und Reproduktion nicht erfasst werden.
4. Mit Hilfe des in dieser Arbeit entwickelten Wahlversuchs zur Kontaktrepellenz lassen sich Meidereaktionen von Collembolen gegenüber Pflanzenschutzmitteln oder anderen potenziell toxischen Chemikalien quantitativ erfassen. Der Vergleich mit etablierten Biotests wie dem Akut- und Reproduktionstest zeigt folgende Vorteile dieses Vermeidungstests auf:
 - Es handelt sich um ein einfach zu handhabendes Testsystem, das wenig Ansprüche an Material und Kosten stellt.
 - Die Testzeit ist mit 24 Stunden erheblich kürzer als die Versuchsdauer von Mortalitäts- (7 Tage) oder Reproduktionstests (28 Tage).
 - Der Arbeitsaufwand bei der Auswertung ist verglichen mit dem Reproduktionstest deutlich geringer.
 - Der Test zeigte bei drei der sechs untersuchten Pflanzenschutzmittel (Betanal, Karate, Cymbush) eine höhere Sensitivität als Akut- oder Reproduktionstests.
 - Mit der Repellentwirkung wird ein zusätzlicher, bisher wenig beachteter Effekt von Umweltchemikalien untersucht. Dieser kann Migrations- oder Besiedlungsvorgänge bei Collembolen beeinflussen und besitzt daher hohe ökologische Relevanz.
 - Der gleichzeitige Einsatz von verschiedenen Arten aus unterschiedlichen Lebensräumen ist möglich und erhöht die Effektivität des Tests. Aufgrund der gezeigten artspezifischen Variabilität der Vermeidungsstärke ist diese Methode zudem zur Abschätzung von Reaktionsspannbreiten sinnvoll.
 - Der Vermeidungstest ist prinzipiell für die Untersuchung aller Chemikalien, die in den Boden eingemischt werden können, wie auch für bereits kontaminierte Böden bei Vorliegen eines geeigneten Kontrollsubstrats geeignet.

-
5. Ausgehend von den Ergebnissen der Voruntersuchungen und der Auswertung der Versuchsreihen mit verschiedenen Pflanzenschutzmitteln können folgende Hinweise zum Einsatz dieses Tests als Routineverfahren gegeben werden:
- Pflanzenschutzmittel können durch ihre neurotoxische Wirkungsweise in niedrigen Konzentrationen bei Collembolen zu Lähmungen führen. Der Wahlversuch zur Kontaktrepellenz kann nur dann aussagekräftige Ergebnisse liefern, wenn eine Bewegungsbeeinträchtigung durch die Testsubstanz sicher ausgeschlossen werden kann. Dies sollte durch entsprechende Vorversuche oder eine genaue Inspektion der Tiere bei der Versuchsauswertung geschehen.
 - Die Durchführung ist als Einwanderungs- oder Fluchttest möglich, beide können allerdings unterschiedliche Wirkschwellen liefern. Aussagen über die höhere Tauglichkeit einer der beiden Methoden sind auch auf der Grundlage aller gesammelten Daten nicht möglich.
 - Beim gleichzeitigen Einsatz mehrerer Arten ist eine gegenseitige Beeinflussung durch Vortests auszuschließen.
 - Die Verteilung der Tiere im Test sollte stets auf eine Kontrollverteilung bezogen werden, da sich nicht alle Arten gleichmäßig über die gesamte Gefäßfläche ausbreiten.
 - Einige Arten zeigen eine starke Tendenz, aus dem Testgefäß zu entkommen, bzw. können bei der Auswertung durch ihre geringe Größe nicht vollzählig wiedergefunden werden. Soweit das Versuchsdesign nicht entsprechend abgeändert werden kann, sollte auf den Einsatz dieser Arten, wie z.B. *Lepidocyrtus violaceus* oder *Folsomia fimetaria* verzichtet werden.
6. Die Wahlversuche zur Kontaktrepellenz decken deutliche substanzspezifische Unterschiede bezüglich der Sensibilität der einzelnen Spezies auf, dabei wurden allerdings alle untersuchten Pflanzenschutzmittel von der verwendeten Artengruppe detektiert. Da die Reaktion auf einige Produkte sehr schwach war, sollte der Wahlversuch zur Beurteilung von Chemikaliennebenwirkungen auf Collembolen oder zur ökotoxikologischen Bewertung von Bodenmaterialien durch die Gefahr falsch negativer Resultate nicht allein eingesetzt werden. Der Test kann Mortalitäts- oder Reproduktionstests nicht ersetzen. In Kombination mit dem ISO-Test zur Reproduktion von *Folsomia candida* könnte er jedoch schnelle und ökosystemrelevante Zusatzinformationen liefern.

7. Bei der Wahrnehmung von Pflanzenschutzmitteln, aktiven Wirkstoffen und Formulierungszusätzen durch Collembolen im Laborversuch spielen offensichtlich substanzspezifisch olfaktorische und/oder gustatorische Sinnesreize eine Rolle.

Die Ergebnisse der Freilandversuche zur Besiedelung kontaminierter Netzbeutel und Streudosen durch Collembolen zeigen weiteren Forschungsbedarf auf:

8. Die Untersuchung von Pestizideffekten auf Besiedelungsvorgänge im Freiland erfordert eine weitere Verbesserung des Testdesigns. Eine analytische Kontrolle der Konzentrationen zum Beginn und am Ende des Versuchs wäre notwendig, um eine Beeinflussung der Ergebnisse durch Degradationsvorgänge auszuschließen. Defaunierte Areale üben auf Collembolen offensichtlich eine starke Attraktion aus, durch die eventuelle Repellentwirkungen von Kontaminanten überlagert werden können.

4.4 AUSBLICK

Die in der vorliegenden Arbeit entwickelten und im Literaturüberblick vorgestellten Methoden zur ökotoxikologischen Bewertung von Schadstoffwirkungen auf das Verhalten von Collembolen und anderen Bodenorganismen sollten weiterentwickelt und in Ringtests validiert werden. Sie sollten zusammen mit anderen Biotests eingesetzt werden, um durch die Betrachtung eines weiteren, bei der Risikoabschätzung bisher unberücksichtigten Effektes von Schadstoffen auf Nichtzielorganismen ein möglichst breites Spektrum von ökologischen Effekten detektieren zu können. Durch eine Kombination mit weiteren Vermeidungstests, z. B. mit verschiedenen Annelidenarten, könnten die Auswirkungen von Repellenteffekten auf die Lebensraumfunktion des Bodens noch besser abgeschätzt werden. Neben Regenwürmern kommen hierfür auch die Kleinringelwürmer in Frage, für die in letzter Zeit ebenfalls Repellenttests entwickelt wurden. Dabei zeichnet sich eine unterschiedliche Sensitivität der Tiergruppen ab. Versuche mit dem Kleinringelwurm *Enchytraeus crypticus* zeigten zum Beispiel, dass dieser auf TNT mit Meideverhalten reagiert, während die Collembolenart *F. candida* sich dem Sprengstoff gegenüber indifferent verhält (SCHÄFER 2002). Hier besteht weiterer Forschungsbedarf, um die Sensitivitätsunterschiede der verschiedenen Bodentiere hinsichtlich der Vermeidung verschiedener potenzieller Toxine genauer zu vergleichen.

Weitere Untersuchungen zu den akuttoxischen und subletalen Wirkungen von wirtschaftlich bedeutsamen Pflanzenschutzmitteln auf Collembolenarten mit hoher ökologischer Relevanz, aber auch auf andere Bodentiere können dazu beitragen, das Gefährdungspotenzial dieser Substanzen besser einzuschätzen.

Besonders wichtig für die Extrapolation der Labortestdaten auf die Freilandsituation sowie für die Erforschung von Besiedelungsstrategien von Collembolen wäre die Entwicklung von Versuchsmethoden zur Erfassung der Migrationsbewegungen unter dem Einfluss von Pflanzenschutzmitteln und anderen potenziell toxischen Substanzen.