

Christian Ulrichs¹, Inga Mewis²

Nanostrukturierte Silikate – Insektizide Wirkung und neue Entwicklungen

Nanostructured silicas – Insecticidal
effect and new developments

Zusammenfassung

Die insektizide Wirkung inerter Stäube ist bereits seit Jahrhunderten bekannt, jedoch wurde der genaue Wirkmechanismus vieler Stäube erst in den letzten Jahrzehnten untersucht. Die insektizide Eigenschaft von Silikatstäuben wird auf die Physisorption von Cuticularlipiden und damit einhergehende Zerstörung der Wachsschicht der Epicuticula sowie folgende Austrocknung der Arthropoden (entsprechend den FICKSCHEN Diffusionsgesetzen) zurückgeführt. Die insektiziden Eigenschaften und deren Wirkungsgrad werden vorrangig über die spezifischen Oberflächen bestimmt. Dabei haben große Oberflächen einen höheren Wirkungsgrad als kleine Oberflächen und lassen sich hydrophobe Materialien vielseitiger einsetzen als hydrophile. Im vorliegenden Manuskript wird auf die Verwendung von amorphen Silikaten in unterschiedlichen Formulierungen in den Bereichen Geflügelhaltung, Vorratsschutz und Gartenbau eingegangen. Dabei stehen seit neuestem nicht mehr Stäube sondern vielmehr Flüssigformulierungen im Vordergrund.

Stichwörter: Diatomeenerden, physikalische Insektizide, amorphe Silikate, Austrocknung

Abstract

Modern research on the insecticidal effects of inert dusts as a stored-grain protectant and for plant protection purposes began in the 1920's. The main advantage of inert dusts is their low environmental threat. One group of inert dusts used for pest control is amorphous silica. Amorphous silica has been tested as a whole and is according to the International Agency for Research on Cancer not classifiable as to its carcinogenicity to humans. Silica such as diatomaceous earths can kill insects by ab/adsorbing the lipids such as waxes and triglycerides of the outer cuticle layer by direct contact. When the thin, waterproof layer is lost, the insect dries out following FICKS law of diffusion into the surrounding atmosphere. Small particles with large surfaces are more effective than larger particles and some silicas show even surface structures within the nanometer range. The present manuscript describes the current use of amorphous silica in poultry systems, for stored product protection, as well as in horticultural production systems. New formulations are liquid rather than dusts. Particles used in commercial products are nowadays hydrophobic and not hydrophilic enabling a larger range of application.

Institut

Humboldt-Universität zu Berlin, Landwirtschaftlich-Gärtnerische Fakultät, Fachgebiet Urbane Ökophysiologie der Pflanzen, Berlin¹

Leibniz-Institut für Gemüse- und Zierpflanzenbau Großbeeren/Erfurt e.V., Abteilung Qualität, Großbeeren²

Kontaktanschriften

Prof. Dr. Dr. Christian Ulrichs, Humboldt-Universität zu Berlin, Landwirtschaftlich-Gärtnerische Fakultät, Fachgebiet Urbane Ökophysiologie der Pflanzen, Lentzeallee 55/57, 14195 Berlin, E-Mail: christian.ulrichs@agrar.hu-berlin.de;

Dr. Inga Mewis, Leibniz-Institut für Gemüse- und Zierpflanzenbau Großbeeren/Erfurt e.V., Abteilung Qualität, Theodor-Echtermeyer-Weg 1, 14979 Großbeeren, E-Mail: inga@entomology.de

Zur Veröffentlichung angenommen

14. September 2012

Key words: Amorphous silica, diatomaceous earth, physisorption, desiccation

Einleitung

Im letzten Jahrhundert wurde die Schädlingsbekämpfung durch synthetische Pflanzenschutzmittel bestimmt. Aufgrund der zahlreichen damit verbundenen Probleme wird heute, nach den Kriterien der guten fachlichen Praxis, vorrangig der Einsatz nichtchemischer Verfahren zur Schädlingsbekämpfung empfohlen, wenn diese praktikabel sind. Alternativen zum chemischen Pflanzenschutz kommen unter anderem aus dem Bereich physikalischer und biologisch/biotechnischer Methoden. Im Vorratsschutz sowie in der Geflügelhaltung finden dabei seit Jahren natürlich vorkommende, in jüngster Zeit auch vermehrt synthetische Silikate Verwendung. Nach neuen Erkenntnissen können amorphe Silikate nicht wie kristalline Silikate hinsichtlich ihres Gefährdungspotenzials eingestuft werden. So kam die US „Environmental Protection Agency“ (EPA) zu dem Schluss, dass amorpher Quarzstaub (kristallin-frei) keine Toxizität aufweist und in Bezug auf die Karzinogenität nicht eingestuft werden kann. Weiterhin stellt die EPA fest, dass in Anbetracht der amorphen Natur diese Produkte kein Krebsrisiko darstellen. Silikate werden bei oraler Aufnahme als inaktiv angesehen und aufgrund ihres hohen Molekulargewichts ist eine Absorption durch die Haut unwahrscheinlich. Unabhängig davon, ob der Kontakt akut, subchronisch oder auf irgendeinem Weg chronisch ist, sollte es keine Bedenken für die menschliche Gesundheit geben (WARHEIT, 2001; MERGET et al., 2002). Durch diese neue Einschätzung gibt es vermehrt Transferbestrebungen des Einsatzes amorpher Silikate vom Vorratsschutz in Landwirtschaft und Gartenbau. Über aktuelle Entwicklungen von Silikaten in der Schädlingsbekämpfung wird in diesem Artikel berichtet.

Insektizider Wirkmechanismus

Amorphe Silikate werden seit den 30er Jahren des letzten Jahrhunderts zur Schädlingsbekämpfung verwendet. Während man zunächst zahlreiche unterschiedliche Wirkmechanismen diskutierte, weiß man seit einigen Jahren, dass zu einem großen Teil die physisorptiven Eigenschaften der Partikel die insektiziden Eigenschaften bedingen (ULRICHS et al., 2004, 2006). Durch Physisorption kommt es nach Kontakt zu einer Verlagerung von Lipiden aus der Cuticula in die Silikate und somit zu einer Zerstörung der natürlichen Wasserbarriere der Arthropoden. Die Austrocknung der Tiere folgt dabei den FICKSCHEN Diffusionsgesetzen. Damit lassen sich hohe insektizide Wirkungsgrade erzielen, wenn die Oberflächen entsprechend groß sind. Bei pyrogenen als auch für nach dem Nassverfahren erzeugte Kieselsäuren handelt es sich meist um sehr kleine Partikel, die aufgrund des Oberflächen-Volumenverhältnisses sehr reaktiv sind. Natürlich vorkommende

Silikatminerale (SiO_2 Anteil meist $> 85\%$) sind in der Regel größer als ihre synthetischen Pendanten, haben aber wie im Falle von Diatomeenerden oft Strukturen bis in den Nanometerbereich ausgebildet, welche die Oberfläche vergrößern und somit den insektiziden Wirkungsgrad kleinerer Partikel erreichen. Es werden in der Literatur BET-Oberflächen von $> 1000 \text{ m}^2/\text{g}$ Material, speziell für mesoporöse Silikate, beschrieben (eg. HUO et al., 1997). Solche nanostrukturierten Partikel mit Oberflächen um 5 bis $10 \mu\text{m}$ werden im Pflanzenschutz bevorzugt eingesetzt, weil die Gesundheitsbedenken für Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser von $> 2,5 \mu\text{m}$ geringer sind als für kleinere Partikel.

Formulierungen

In den vergangenen Jahren gab es zahlreiche populäre Artikel (QUARLES und WINN, 1996), Übersichtsartikel (GOLOB, 1997; KORUNIĆ, 1998; SUBRAMANYAM und ROESLI, 2000) und Forschungsarbeiten (NIELSEN, 1998; ARTHUR, 2000a, b; FIELDS und KORUNIĆ, 2000a, b; MEWIS und ULRICHS, 2001a, b, c) in Bezug auf die Wirksamkeit unterschiedlicher kommerziell erhältlicher amorpher Silikate. In zahlreichen Arbeiten zeigten sich hier unterschiedliche Wirksamkeiten in Abhängigkeit vom Zielorganismus und der Anwendung (KORUNIĆ, 1997). Dabei zeigte sich, dass oftmals neuere Produktformulierungen wirksamer sind als ältere Formulierungen (SUBRAMANYAM et al., 1998). Solche Effekte zeigten sich besonders, wenn die Experimente unter höheren relativen Luftfeuchten durchgeführt wurden (GOLOB, 1997; KORUNIĆ, 1998; ARTHUR, 2000a, b; FIELDS und KORUNIĆ, 2000a). Dieses ist darauf zurückzuführen, dass die natürlichen verwendeten Silikate oftmals modifiziert werden (FAULDE et al., 2006a, b) bzw. in Kombination mit synthetischen Silikaten zum Einsatz kommen (ARTHUR, 2004; CERUTI und LAZZARI, 2005; ATHANASSIOU, 2006).

Kamen in den vergangenen Jahren vorrangig pulverförmige Verbindungen zum Einsatz, stehen heute vermehrt Suspensionen im Fokus wissenschaftlicher Arbeiten. Dieser Wandel hat aufgrund der besseren Handhabbarkeit von Flüssigkeiten gegenüber Stäuben, wegen immer noch bestehenden gesundheitlichen Bedenken sowie veränderten Einsatzbereichen stattgefunden.

Vorratsschutz

In zahlreichen Versuchen wurde die gute Wirksamkeit von Silikatpräparaten gegenüber vorratsschädlichen Insekten nachgewiesen (z.B. MEWIS und REICHMUTH, 1998; MEWIS und ULRICHS, 1999; ULRICHS et al., 2001; VÖLK et al., 2004). Dabei konnten z.B. Mortalitätsraten für den Kornkäfer *Sitophilus granarius* von 92% innerhalb von 48 Stunden erreicht werden (MUCHA-PELZER et al., 2008a). Wirksamkeitsvergleiche zwischen Materialien auf der Basis von Publikationen sind schwierig. Die Wirksamkeit ist abhängig vom Entwicklungsstadium, der chemischen

Zusammensetzung, der Dosierung, der Applikationstechnik, den Klimabedingungen, sowie der Partikelgröße (MEWIS und ULRICHS, 1999, 2001a, c; MUCHA-PELZER et al., 2008a). In früheren Versuchen wurden häufig Daten publiziert, in denen die Prüfsubstanzen direkt aus der Verpackung kommend appliziert wurden. Dabei kommen im Regelfall trockene Materialien zum Einsatz und werden somit die Versuchsergebnisse verfälscht. Werden die Materialien an die höheren relative Luftfeuchten, die oftmals am Einsatzort herrschen, voradaptiert, kann erwartet werden, dass hydrophobe Substanzen, die sich nicht mit Wasser sättigen, eine höhere Wirkungseffizienz aufweisen.

Vielversprechend erscheint die Kombination von Silikaten mit synergistisch wirkenden, bioaktiven Naturstoffen. So zeigte sich, dass die Kombination unterschiedlicher Silikatpräparate mit den Monoterpenoiden Zimtaldehyd und Eugenol synergistisch die insektiziden Wirkungsgrade der Silikate gegenüber *Sitophilus oryzae* erhöhten (ISLAM et al., 2010). Solche Aussagen sind jedoch nicht zu verallgemeinern, sondern sind spezifisch für unterschiedliche Schadorganismen und Einsatzbereiche zu überprüfen.

Geflügelhaltung

Ein Befall von Geflügel mit der Roten Vogelmilbe (*Dermaphysalis gallinae*) hat hohe Tierschutzrelevanz und führt insbesondere in der Legehennenhaltung zu erheblichen wirtschaftlichen Verlusten. Die Lebensweise von *D. gallinae* gestaltet die Bekämpfung sehr schwierig. Bei der chemischen Bekämpfung kann es zur Resistenzbildung kommen. Auch ist die Rückstandsproblematik bei lebensmittelliefernden Tieren zu beachten. Zur Bekämpfung von *D. gallinae* ist deshalb die Anwendung von Silikatpräparaten weit verbreitet.

In Laborversuchen wurde ein Wirksamkeitsvergleich von staubförmigen und flüssigen Präparaten, die bei der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) als Biozide gemeldet und auf dem Markt erhältlich sind, durchgeführt. Es wurden signifikante Unterschiede zwischen den einbezogenen Mitteln festgestellt. Die LT_{50} -Werte (Zeit in der 50% der behandelten Tiere starben) der besten fünf staubförmigen Präparate hatten eine Spannweite von 4,40 bis 12,12 Stunden. Bei den drei flüssigen Präparaten lagen die LT_{50} -Werte zwischen 4,54 und 12,96 Stunden (SCHULZ et al., 2011). Tendenziell kommen aufgrund der besseren Handhabbarkeit im leeren Stall vermehrt flüssige Formulierungen zum Einsatz.

Gartenbau

In Kolumbien werden Silikate in der Schnittblumenproduktion zur Prävention von Pilzinfektionen eingesetzt. Hier kommen vorrangig hydrophile Silikate vermischt mit Talkum zum Einsatz, um z.B. Fusariumbefall in der Schnittrosenproduktion vorzubeugen.

Neben dem Einsatz als „Trocknungsmittel“ stehen jedoch vor allem die insektiziden Eigenschaften im Vordergrund. Da sich zahlreiche phytophage Insekten in gärtnerischen Produktionssystemen auf der Blattunterseite befinden, müssen kontaktinsektizide Mittel, zu denen auch die Silikate zählen, gleichmäßig auf die gesamte Pflanze appliziert werden. Hierzu wurden unter anderem an der Humboldt-Universität zu Berlin in Kooperation mit dem Zentrum für Angewandte Forschung an der TU Dresden elektrostatische Applikationsverfahren entwickelt (Abb. 1). In einer geschlossenen und mobilen Kammer wird auf der Grundlage einer Koronaaufladung eine weiche Partikelwolke generiert, welche eine gleichmäßige Beschichtung von Oberflächen, einschließlich ganzer Pflanzen, mit Silikatpulvern zulässt. Silikat-Schichtdicken von 50 und 125 μm wirkten ausreichend insektizid auf die Coleopteren *Phaedon cochleariae* F., *Epilachna vigintioctopunctata* F. sowie auf die Lepidopterenlarvenstadien von *Spodoptera litura* F. und *Pieris brassicae* L. (MUCHA-PELZER et al., 2008b, 2010).

Für den Einsatz im Gewächshaus ist zu berücksichtigen, dass natürliche, auf Diatomeenerdebasis basierende Mittel in dieser feuchten Umgebung sehr schnell ihre Wirksamkeit aufgrund einer Wassersättigung verlieren. Aus diesem Grunde finden solche Mittel kaum Verwendung. Bevorzugt werden oberflächenmodifizierte Substanzen, die ihre lipophilen Eigenschaften behalten und hydrophob sind, um der Wassersättigung vorzubeugen. Wie zahlreiche Versuche zeigen, verlieren diese Substanzen bei relativen Luftfeuchten von über 70% noch nicht ihre Wirksamkeit (MUCHA-PELZER, 2011).

Versuche, in denen versucht wurde, mit Barrieren gegen Schaderreger zu arbeiten, zeigten nur befriedigende Ergebnisse. So konnte *Forficula auricularia* durch flüssig aufgebraute Barrieren am Aprikosenstamm bzw. die Blutlaus *Eriosoma lanigerum* durch Barrieren am Apfelstamm nur für eine relativ kurze Zeit von der Krone des Baumes abgehalten werden (WELKE et al., 2008). In Österreich wurde versucht, durch Applikation von Silikaten auf natürliche Barrieren (Abb. 2) sowie durch Beschichtung von Schneckenschutzgittern Gradationen

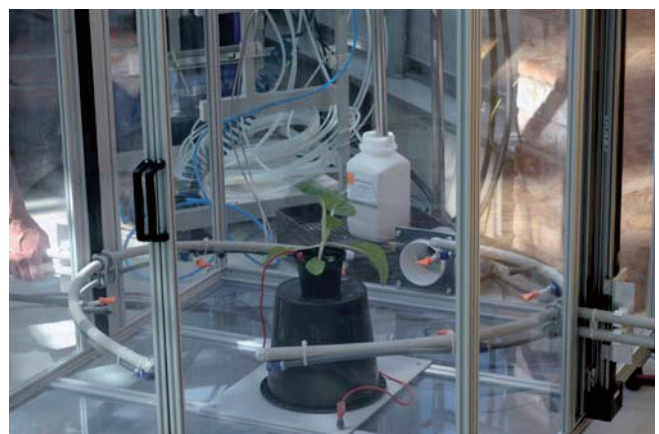


Abb. 1. Kammer zur elektrostatischen Applikation von Silikaten auf Pflanzen.



Abb. 2. Applikation selbsterodierender Silikatschichten auf eine Häuserwand zum Schutz vor Myriapoden.

von Myriapoden in Kleingärten zu unterbinden (MUCHA-PELZER et al., 2009). Hierbei kamen erstmalig selbsterodierende Silikatformulierungen zum Einsatz, welche die Wanderungen der Arthropoden unterbinden sollen. Zu selbsterodierenden Flächen wird momentan intensiv geforscht, da solche nicht-lethalen Mittel auch im ökologischen Landbau eingesetzt werden können.

Noch weitestgehend wenig untersucht sind mögliche phytotoxische Wirkungen unterschiedlicher SiO_2 -haltiger Stäube. Bisher bekannt ist, dass es bei einigen Pflanzen neben einer Reduktion der Photosynthese durch den reinen Schattierungseffekt auch zu einer längerfristigen und irreversiblen Beeinträchtigung des Photosystems kommen kann. In Gewächshausversuchen, in denen Pflanzen definiert mit Silikaten elektrostatisch behandelt wurden, gab es unterschiedliche Ergebnisse. So wurde die photosynthetische Aktivität von *Brassica chinensis* während einer 48-stündigen Behandlungsphase deutlich reduziert, rehabilitierte sich jedoch nach dem Entfernen der Silikatschicht wieder zum unbehandelten Ausgangszustand. Andere Pflanzen reagierten mit einer längerfristig reduzierten Photosyntheseleistung, die vermutlich auf verstopfte Stomata und damit einhergehend veränderten Transpirationsraten einherging (MUCHA-PELZER et al., 2010a).

Neben solchen pflanzenphysiologischen Untersuchungen spielt für den möglichen Einsatz zur Schädlingsbekämpfung im Gartenbau auch die biochemische Adaptation der Pflanze an eine Silikatbehandlung eine wichtige Rolle. An *B. chinensis* konnte gezeigt werden, dass nach Behandlung mit unterschiedlichen Silikaten besonders der Anteil an Indolyl-Glucosinolaten abnahm (MUCHA-PELZER et al., 2010b). Weiterführende Versuche hierzu werden derzeit an der Humboldt-Universität zu Berlin durchgeführt.

Danksagung

Die Autoren widmen diesen Übersichtsartikel zu Silikatstäuben Herrn Prof. Dr. Christoph REICHMUTH. Unter

seiner Leitung im Institut für Vorratsschutz, im heutigen Julius Kühn-Institut, wurde der physisorptive Wirkmechanismus von Diatomeenerden erstmals zweifelsfrei im Rahmen einer Diplomarbeit durch Inga MEWIS bewiesen. Beide Autoren haben als REICHMUTH'S Diplomanden ihre ersten Schritte in die Wissenschaft getätigt und sind ihm für die langjährige Unterstützung dankbar.

Literatur

- ARTHUR, F.H., 2004: Evaluation of methoprene alone and in combination with diatomaceous earth to control *Rhyzopertha dominica* (Coleoptera: Bostrichidae) on stored wheat. *Journal of Stored Products Research* **40**, 485-498.
- ARTHUR, F.H., 2000a: Toxicity of diatomaceous earth to red flour beetles and confused flour beetles: effects of temperature and relative humidity. *Journal of Economic Entomology* **93**, 526-532.
- ARTHUR, F.H., 2000b: Impact of food source on survival of red flour beetles and confused flour beetles (Coleoptera: Tenebrionidae) exposed to diatomaceous earth. *Journal of Economic Entomology* **93**, 1347-1356.
- ATHANASSIOU, C.G., 2006: Toxicity of beta cyfluthrin applied alone or in combination with diatomaceous earth against adults of *Sitophilus oryzae* (L.) (Coleoptera: Curculionidae) and *Tribolium confusum* DuVal (Coleoptera: Tenebrionidae) on stored wheat. *Crop Protection* **25**, 788-794.
- CERUTI, F.C., S.M.N. LAZZARI, 2005: Combination of diatomaceous earth and powder deltamethrin for insect control in stored corn. *Revista Brasileira De Entomologia* **49**, 580-583.
- FAULDE, M.K., J.J. SCHARNINGHAUSEN, S. CAVALJUGA, 2006a: Toxic and behavioural effects of different modified diatomaceous earths on the German cockroach, *Blattella germanica* (L.) (Orthoptera: Blattellidae) under simulated field conditions. *Journal of Stored Products Research* **42**, 253-263.
- FAULDE, M.K., M. TISCH, J.J. SCHARNINGHAUSEN, 2006b: Efficacy of modified diatomaceous earth on different cockroach species (Orthoptera, Blattellidae) and silverfish (Thysanura, Lepismatidae). *Journal of Pesticide Science* **79**, 155-161.
- FIELDS, P., Z. KORUNIĆ, 2000a: The effect of grain moisture content and temperature on the efficacy of diatomaceous earths from different geographical locations against stored-product beetles. *Journal of Stored Products Research* **36**, 1-13.
- FIELDS, P.G., Z. KORUNIĆ, 2000b: Diatomaceous earth to control *Cryptolestes ferrugineus* (Coleoptera: Cucujidae) in stored barley in farm granaries. *Canadian Entomologist* **132**, 247-258.
- GOLOB, P., 1997: Current status and future perspectives for inert dusts for control of stored product insects. *Journal of Stored Products Research* **33**, 69-79.
- HUO, Q., D. ZHAO, J. FENG, K. WESTON, S.K. BURATTO, G.D. STUCKY, S. SCHACHT, F. SCHÜTH, 1997: Room temperature growth of mesoporous silica fibers: A new high-surface-area optical waveguide. *Advanced Materials* **9**, 974-978.
- ISLAM, S. MD., M. MD. HASAN, C. LEI, T. MUCHA-PELZER, I. MEWIS, C. ULRICHS, 2010: Direct and admixture toxicity of diatomaceous earth and monoterpenoids against the storage pests *Callosobruchus maculatus* (F.) and *Sitophilus oryzae* (L.). *Journal of Pest Science* **83**, 105-112.
- KORUNIĆ, Z., 1997: Rapid assessment of the insecticidal value of diatomaceous earths without conducting bioassays. *Journal of Stored Products Research* **33**, 219-229.
- KORUNIĆ, Z., 1998: Diatomaceous earths, a group of natural insecticides. *Journal of Stored Products Research* **34**, 87-97.
- MERGET, R., T. BAUER, H.U. KÜPPER, S. PHILIPPOU, H.D. BAUER, R. BREITSTADT, T. BRÜNING, 2002: Gesundheitsgefahren durch die Inhalation von amorphen Silica. *Archiv of Toxicology* **75**, 625-634.
- MEWIS, I., C. REICHMUTH, 1998: Diatomaceous earths against the Coleoptera: granary weevil *Sitophilus granarius* (Curculionidae), the confused flour beetle *Tribolium confusum* (Tenebrionidae), and the Mealworm *Tenebrio molitor* (Tenebrionidae). In: ZUXUN, J., L. QUAN, L. YONGSHENG, T. XIANCHANG, G. LIANGHUA (Eds.): Proceedings of the 7th International Conference on Stored-product Protection. 14-19 October 1998 in Beijing, PR China, Sichuan Publishing House of Science and Technology, Chengdu, PR China, 765-780.
- MEWIS, I., C. ULRICHS, 1999: Wirkungsweise amorpher Diatomeenerden auf vorratsschädliche Insekten. *Journal of Pesticide Science* **72**, 113-121.

- MEWIS, I., C. ULRICHS, 2001a: Action of amorphous diatomaceous earth against different stages of the stored product pests *Tribolium confusum*, *Tenebrio molitor*, *Sitophilus granarius* and *Plodia interpunctella*. *Journal of Stored Products Research* **37**, 153-164.
- MEWIS, I., C. ULRICHS, 2001b: Action of amorphous diatomaceous earth's against the stored product pest *Sitophilus granarius* and *Tenebrio molitor*. *Gesunde Pflanzen* **53**, 110-119.
- MEWIS, I., C. ULRICHS, 2001c: Effects of diatomaceous earth on water content of *Sitophilus granarius* (L.) (Col., Curculionidae) and its possible use in stored product protection. *Journal of Applied Entomology* **125**, 351-360.
- MUCHA-PELZER, T., C. ULRICHS, K. ZIMMERMANN, N. GORBACH, 2009: Wenn Lästlinge zur Last werden – Tausendfüßler in Röns. *DPS Fachzeitschrift für Schädlingsbekämpfung* **4**, 16-17.
- MUCHA-PELZER, T., 2011: Amorphe Silikate-Möglichkeiten des Einsatzes im Gartenbau zur physikalischen Schädlingsbekämpfung. In: ULRICHS, C., C. BÜTTNER (Eds.): *Berliner ökophysiologische und phytomedizinische Schriften* **17**, Tönning, Der Andere Verlag, 210 S.
- MUCHA-PELZER, T., I. MEWIS, C. ULRICHS, 2010b: Response of glucosinolate and flavonoid contents and composition of *Brassica rapa* ssp. *chinensis* (L.) Hanelt to silica formulations used as insecticides. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* **58**, 12473-12480.
- MUCHA-PELZER, T., R. BAUER, E. SCOBEL, C. ULRICHS, 2010a: Insecticidal effects of different application techniques for silica dusts in plant protection on *Phaedon cochleariae* F. and *Pieris brassicae* L. *Hort. Science* **45**, 1349-1356.
- MUCHA-PELZER, T., N. DEBNATH, A. GOSWAMI, I. MEWIS, C. ULRICHS, 2008b: Bekämpfung von *Epilachna vigintioctopunctata* (F.) und *Spodoptera lituralis* (F.) durch Silikat-Applikation unter Freilandbedingungen. *Gesunde Pflanzen* **60**, 23-28.
- MUCHA-PELZER, T., N. DEBNATH, A. GOSWAMI, I. MEWIS, C. ULRICHS, 2008a: Comparison of different silicas of natural origin as possible insecticides. *Communications in Agricultural and Applied Biological Sciences*. Ghent University **73**, 621-628.
- NIELSEN, P.S., 1998: The effect of a diatomaceous earth formulation on the larvae of *Ephestia kuehniella* Zeller. *Journal of Stored Products Research* **34**, 113-121.
- QUARLES, W., P. WINN, 1996: Diatomaceous earth and stored product pests. *IPM Practitioner* **18**, 1-10.
- SCHULZ, J., J. BERK, J. SUHL, L. SCHRADER, H.M. HAFEZ, C. ULRICHS, 2011: Maßnahmen zur Bekämpfung der Roten Vogelmilbe (*Dermanyssus gallinae*) – Wirksamkeitsvergleich verschiedener Silikatpräparate unter Laborbedingungen. DLG Geflügeltagung, 22. Februar 2011 in Celle, Book of Abstracts.
- SUBRAMANYAM, B., R. ROESLI, 2000: Inert Dusts. In: SUBRAMANYAM, B., D.W. HAGSTRUM, (Eds.): *Alternatives to Pesticides in Stored-Product IPM*. Dordrecht/Boston/London, Kluwer Academic Publishers, 321-380.
- SUBRAMANYAM, B., N. MADAMANCHI, S. NORWOOD, 1998: Effectiveness of Insecto applied to shelled maize against stored-product insect larvae. *Journal of Economic Entomology* **91**, 280-286.
- ULRICHS, C., St. ENTENMANN, A. GOSWAMI, I. MEWIS, 2006: Abrasive and hydrophilic/lipophilic effects of different inert dusts used as insecticide against the stored insect pest *Sitophilus granarius* L. *Gesunde Pflanzen* **58**, 173-181.
- ULRICHS, C., R. HERBST, M. LANGENSIEPEN, C. SCHULTZ, 2004: Fossiles Plankton als natürliches Insektizid – Dem Wirkmechanismus auf der Spur. *Humboldt-Spektrum* **2**, 24-28.
- ULRICHS, C., I. MEWIS, W.H. SCHNITZLER, 2001: Efficacy of neem and diatomaceous earth against cowpea aphids and their deleterious effect on predating Coccinellidae. *Journal of Applied Entomology* **125**, 571-575.
- VÖLK, F., C. REICHMUTH, C. ULRICHS, 2004: Wirksamkeitsüberprüfung hydrophobisierter Diatomeenerden bei unterschiedlichen relativen Luftfeuchten gegenüber vorratsschädlichen Insekten. In: *Biologische Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft* (Ed.): 54. Deutsche Pflanzenschutztagung, 20.-23. September 2004 in Hamburg. *Mitteilungen aus der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft, Berlin-Dahlem*, **396**, 441.
- WARHEIT, D., 2001: Inhalierte amorphe Silica-Partikel: Was wissen wir über ihre toxikologischen Profile? *Journal of Environmental Toxicology and Oncology* **20**, 133-141.
- WELKE, B., I. MEWIS, T. MUCHA-PELZER, A. GOSWAMI, C. ULRICHS, 2008: Stammapplikationen im Obstbau mit nanostrukturierten Silikaten gegen *Eriosoma lanigerum* (Hausm.) und *Forficula auricularia* L. *Gesunde Pflanzen* **60**, 15-21.