



Kollateralschäden im Boden

Roundup und sein Wirkstoff Glyphosat – Wirkungen auf Bodenleben und Bodenfruchtbarkeit

von Martha Mertens

Glyphosat, der Wirkstoff des bekannten Unkrautbekämpfungsmittels „Roundup“, ist das weltweit am meisten eingesetzte Herbizid. Mit dem Einzug der Agro-Gentechnik hat der Einsatz von Glyphosat massiv zugenommen. 80 Prozent der weltweit angebauten gentechnisch veränderten Pflanzen tragen eine Herbizidresistenz, zumeist gegen Glyphosat; sie werden daher häufig auch als „Roundup-Ready“ (RR)-Pflanzen bezeichnet. – Der vorliegende Beitrag geht der Frage nach, wie sich das Breitbandherbizid auf das Bodenleben und die Bodenfruchtbarkeit auswirkt. Die Auswertung zahlreicher Studien über Glyphosat und seine vielfältigen Effekte kommt zu dem Ergebnis, dass Glyphosat keineswegs wie von der Industrie behauptet als ein umweltverträgliches Herbizid gelten kann. Es beeinflusst und schädigt vielmehr das Bodenleben erheblich, führt unter anderem zu vermehrten Pilzkrankheiten und beeinträchtigt über den Boden auch Gesundheit und Ertragsstärke anderer Pflanzen. In einer nachhaltigen Landwirtschaft hat Glyphosat daher keinen Platz.

Glyphosat ist ein Breitbandherbizid, da es ausnahmslos alle Pflanzen schädigt. Da 80 Prozent der weltweit angebauten gentechnisch veränderten Pflanzen eine Herbizidresistenz tragen, zumeist gegen Glyphosat, hat der Einsatz von Glyphosat in den letzten Jahren massiv zugenommen.

Glyphosat wird von verschiedenen Firmen produziert und unter eigenen Markennamen vertrieben. Das bekannteste Produkt ist Roundup von Monsanto. Die auf dem Markt erhältlichen Herbizide enthalten unterschiedliche Mengen Glyphosat, aber auch Hilfsstoffe, die die Mittel stabilisieren, die Ausbringung erleichtern und die Aufnahme von Glyphosat durch pflanzliche, aber auch tierische und menschliche Zellen befördern. Art und Zusammensetzung der Formulierungsmittel werden von den Firmen im Allgemeinen als Geschäftsgeheimnis behandelt und nicht veröffentlicht. In Deutschland sind 52 glyphosathaltige Herbizide für einen breiten Anwendungsbereich zugelassen: für Acker-, Obst- und Weinbau, Zierpflanzen- und Forstbereich sowie sogar für den Haus- und Kleingarten (BVL 2009).

Glyphosat hemmt die 5-Enolpyruvyl-Shikimat-3-Phosphat-Synthase (EPSPS), ein in Pflanzen an der Biosynthese aromatischer Aminosäuren beteiligtes Enzym. Wird die Bildung dieser Aminosäuren blockiert, bricht die Proteinsynthese ab, Wachstumsstillstand und Tod der Pflanzen sind die Folge. Stoffwechselwege, die zu

Vitaminen und sekundären Inhaltsstoffen führen, sind ebenfalls betroffen – mit negativen Effekten auf Wachstum und Abwehrreaktion der Pflanzen.

Glyphosat in Boden und Wasser

Glyphosat [N-(phosphonomethyl)-Glycin] ist seit 1974 auf dem Markt. Es wurde als vergleichsweise umweltverträglich propagiert, da es nur in einen spezifischen pflanzlichen Stoffwechselweg eingreife, im Boden rasch abgebaut werde und nicht ins Grundwasser gelange. Doch wie sich inzwischen zeigt, beeinflusst Glyphosat das Bodenleben in erheblichem Umfang. In den Boden gelangt Glyphosat über die direkte Applikation und durch das Abwaschen besprühter Pflanzenoberflächen bei Regen. Es wird zudem von behandelten Pflanzen freigesetzt, sei es aus absterbendem Pflanzenmaterial oder über Wurzelausscheidungen (Neumann et al. 2007). Noch 16 Tage nach Glyphosat-Behandlung wurden von Roundup-resistenten (RR) Sojabohnen signifikante Mengen ausgeschieden. Glyphosat bindet vergleichsweise gut an Bodenpartikel. In phosphatreichen (gedüngten) Böden liegt es allerdings auch ungebunden vor, da die Bindungsstellen durch Phosphat blockiert werden.

Glyphosat wird primär durch Bakterien abgebaut, etwa durch *Pseudomonas* spp. Als wichtigstes Abbaupro-

dukt gilt Aminomethylphosphon-Säure (AMPA). Die Abbauraten von Glyphosat sind abhängig von den Bodenverhältnissen (z. B. Art und Menge von Mineralien und organischem Material, Temperatur, pH-Wert) und kann von Boden zu Boden erheblich variieren. Gegen den Abbau durch Licht ist es relativ stabil. Für Glyphosat wurden Halbwertszeiten von drei bis 240 Tagen und für AMPA von 76 bis 240 Tagen genannt (Borggard & Gimsing 2008, EC 2002, Schuette 1998). Bei gleichzeitiger Behandlung der Pflanzen mit *Bacillus thuringiensis*-Präparaten erhöht sich möglicherweise die Persistenz von Glyphosat (Accinelli et al. 2004).

Gelöst und an Bodenpartikel gebunden gelangen Glyphosat und sein Metabolit AMPA über das Bodenwasser oder oberflächlichen Abfluss ins Grundwasser und in Oberflächengewässer. Der Gesamteintrag in aquatische Systeme ist jedoch unbekannt. Die Auswaschung von Glyphosat und AMPA hängt stark von der Bodenstruktur ab (Borggard & Gimsing 2008): Grobkörnige Böden haben im Allgemeinen ein höheres Auswaschungspotenzial, auch Sandböden können gefährdet sein, besonders bei hohem Grundwasserstand. Starke Regenfälle nach Glyphosat-Anwendung begünstigen den Eintrag. Glyphosat und AMPA werden zusätzlich durch Abdrift von behandelten Flächen und über Kläranlagen in Gewässer eingetragen. Der Abbau im Wasser erfolgt teilweise langsamer als im Boden, Halbwertszeiten von 27 bis 146 Tagen für Glyphosat werden genannt (EC 2002). Obwohl der Wirkstoff vergleichsweise gut an Bodenpartikel bindet, belegte das dänische Pestizidmonitoring-Programm, dass Glyphosat und AMPA aus der Wurzelzone lehmiger Böden in Konzentrationen ausgewaschen werden, die den zulässigen Trinkwasserwert von 0,1 µg/l überschreiten; Maximalwerte von 31 µg/l für Glyphosat und 1,6 µg/l für AMPA wurden gemessen (Kjaer et al. 2009). AMPA verbleibt deutlich länger im Boden als Glyphosat. Beide Substanzen wurden auch in Deutschland und Frankreich im Oberflächen- und Grundwasser nachgewiesen (Sturm & Kiefer 2007).

Die Formulierungsmittel stellen ein besonderes Problem dar, da sie eigenständig toxisch sind und das Verhalten des Wirkstoffs in der Umwelt beeinflussen. Roundup enthält den aus Talg hergestellten Hilfsstoff Talloamin (POEA, polyethoxylated tallow amine), der aus einer komplexen Mischung aus Fettsäuren und organischen Säuren besteht (Diamond & Durkin 1997). Formuliert Produkte und POEA sind teilweise erheblich toxischer als Glyphosat allein (Cox & Sorgan 2006), insbesondere für aquatische Organismen (Brausch & Smith 2007, Relyea 2005). Deshalb erfassen Toxizitätsstudien, die nur mit Glyphosat und über kurze Zeit durchgeführt wurden, unerwünschte ökotoxische Effekte möglicherweise nicht. In der Praxis sind Organismen zudem häufig verschiedenen Pestiziden ausgesetzt, deren synergis-

tische Wirkungen höher sein können als die einzelnen untersuchten Pestizide (Hayes et al. 2006).

Effekte auf das Bodenleben

Schon lange ist bekannt, dass Glyphosat die Mikroflora im Boden beeinflusst (Roslycky 1982), allerdings wurde diesem Tatbestand lange Zeit keine besondere Aufmerksamkeit geschenkt. EPSPS, das Zielenzym von Glyphosat, ist auch bei Mikroorganismen essentiell für die Biosynthese der aromatischen Aminosäuren. Die in den meisten transgenen RR-Pflanzen gebildete Glyphosat-insensitive EPSPS stammt zwar aus einem Bakterium (*Agrobacterium* sp. CP4), doch nicht alle Mikroorganismen besitzen ähnlich unempfindliche EPSPS-Formen. Werden empfindlich reagierende Organismen reduziert, weniger sensitive jedoch begünstigt, könnten wichtige Bodenprozesse beeinflusst werden, vor allem bei wiederholtem Glyphosat-Einsatz. Studien zur Wirkung von Glyphosat auf die Mikroflora erbrachten divergierende Ergebnisse: Werden die mikrobielle Biomasse und Aktivität allgemein untersucht, finden sich häufig keine signifikanten Effekte bzw. sogar erhöhte Werte (Cerqueira & Duke 2006, Locke et al. 2008). Werden jedoch bestimmte Arten oder Gattungen der Mikroflora näher untersucht, ergeben sich durchaus starke Verschiebungen in Zusammensetzung und Aktivität von Mikroorganismen.

Pseudomonas-Bakterien gelten als unempfindlich und wichtig für den Glyphosatabbau. Doch es gibt auch *Pseudomonas*-Arten, die eine gegen Glyphosat sensitive EPSPS besitzen, z. B. *Pseudomonas fluorescens*, ubiquitäre Bakterien, die im Boden eine wichtige Rolle spielen und antagonistisch gegen pilzliche Schaderreger wirken (Kremer & Means 2009). Glyphosat reduzierte deren Zahl signifikant. Auch von Rhizobien, stickstofffixierenden Bakterien, die in Symbiose mit Leguminosen wie Sojabohnen leben, ist bekannt, dass sie empfindlich auf Glyphosat reagieren (Labe et al. 1999). Wird die Stickstoff-Fixierung beeinträchtigt, kann dies den Stickstoffgehalt der Pflanzen reduzieren und Wachstum und Ertrag verringern. Dies gilt besonders für junge Pflanzen und unter Stressbedingungen, wie bei Glyphosat-behandelten RR-Sojapflanzen gezeigt (Zablotowicz & Reddy 2007). Ein niedriger Stickstoffgehalt beeinflusst zudem die Bildung von Aminosäuren und Proteinen negativ. So gibt es Berichte über geringere Proteingehalte und niedrigere Werte wichtiger Aminosäuren in RR-Sojabohnen (Benbrook 2005).

Pilze reagieren ebenfalls unterschiedlich auf Glyphosat, manche sind empfindlich, andere wachsen besser auf glyphosathaltigen Medien. Dies gilt auch für krankheitserregende Pilze, für die – abhängig von Pathogentyp, Art und Sorte der Nutzpflanzen, Standort,

Bodenbehandlung, Zeitpunkt der Herbizidapplikation und Studiendesign – hemmende und fördernde Effekte durch Glyphosat beschrieben wurden (Powell & Swanton 2008, Sanyal & Shrestha 2008). Glyphosat wirkt beispielsweise hemmend auf *Cochliobolus sativus*, einen parasitischen Pilz der Gerste (Fernandez et al. 2007b). Hingegen fördern Wurzelausscheidungen (Exudate) von glyphosatbehandelten Sojabohnen das Wachstum verschiedener Fusarien und häufiger Glyphosat-Einsatz begünstigt das Vorkommen von *Fusarium solani* (Meriles et al. 2006). Kremer & Means (2009) zeigten in zehnjährigen Feldversuchen in den USA, dass Glyphosat-Applikation die Frequenz der die Wurzeln von RR-Sojabohnen und RR-Mais besiedelnden Fusarien signifikant erhöht. Nicht-transgene oder nicht mit Glyphosat behandelte RR-Pflanzen hatten einen deutlich geringeren Befall. Befall durch Fusarien ist sehr unerwünscht, weil die von ihnen produzierten Toxine für Mensch und Tier schädlich sind. Laut Njiti et al. (2003) steht Fusarium-Befall allerdings nicht mit Glyphosat in Zusammenhang, sondern ist von der jeweiligen Sojasorte abhängig. Doch die statistische Absicherung dieser Studie wurde in Zweifel gezogen (Powell & Swanton (2008). Auch bei Weizen und Gerste wurden nach Glyphosat-Applikation noch nach 18 Monaten vermehrt Fusarien und eine Zunahme der Schwarzbeinigkeit (eine durch den Pilz *Gaeumannomyces graminis* verursachte Krankheit) beobachtet (Fernandez et al. 2005, 2007a,b).

Nicht völlig geklärt ist, auf welchem Weg Glyphosat Pilzgemeinschaften beeinflusst (Powell & Swanton 2008). Von den Wurzeln ausgeschiedenes Glyphosat könnte Pilzen als Nahrungsquelle dienen. Vermehrt ausgeschiedene lösliche Kohlenhydrate und Aminosäuren, wie sie bei glyphosatbehandelten RR-Sojabohnen beobachtet wurden, könnten eine weitere Nahrungsquelle sein. Sollten antagonistisch wirkende Bakterien, die die ausgeschiedenen Substanzen normalerweise metabolisieren und so das Pilzwachstum begrenzen, durch Glyphosat gehemmt werden, würden dagegen korrigierende Einflüsse fehlen. Die Folge: verstärktes Wachstum pathogener Pilze (Kremer & Means 2009).

Erschwerend kommt hinzu: Der Shikimat-Stoffwechsel spielt nicht nur bei der Bildung aromatischer Aminosäuren eine zentrale Rolle, sondern auch bei der Produktion von Abwehrstoffen gegen Krankheitserreger und von Strukturelementen wie Ligninen. Phytoalexine, gegen Pilze wirkende Substanzen, werden beispielsweise über den Shikimat-Stoffwechselweg synthetisiert. Selbst bei Roundup-resistenten Pflanzen kann es, abhängig von der applizierten Glyphosatmenge und der Ausprägung der Roundup-Resistenz, zu negativen Effekten auf den Shikimat-Stoffwechsel kommen. Wird die Bildung der für die Abwehr wichtigen Substanzen durch Glyphosat gehemmt, kann sich die Pflanze weni-

ger effektiv gegen Pathogene wehren (Powell & Swanton 2008). In Kombination könnten diese Faktoren zu vermehrtem Auftreten von Schadpilzen in glyphosatbehandelten Pflanzen führen (Johal & Huber 2009).

Glyphosat bzw. Roundup können andererseits hemmend auf nützliche Pilze wirken, z. B. Mycorrhiza-Pilze, die über ihre enge Verbindung mit Wurzeln die Aufnahme von Mineral- und Nährstoffen erleichtern, oder entomopathogene Pilze, die gegen Schadinsekten wirken. So hemmten Glyphosat-Konzentrationen von mehr als 50 µl/l im Medium das Wachstum von Mycorrhiza-Pilzen (Motavalli et al. 2004). Roundup wirkte sich auch negativ auf vier Arten von entomopathogenen Pilzen aus. Interessanterweise hatte Glyphosat allein keine fungizide Wirkung, verstärkte aber die Toxizität der Formulierungsmittel (Morjan et al. 2002). Dies deutet erneut darauf hin, dass Roundup toxischer sein kann als der Wirkstoff Glyphosat allein und dass deshalb Tests, die nur mit Glyphosat durchgeführt werden, der Realität nicht gerecht werden und unter Umständen geschönte Toxizitätsdaten erbringen. Werden Mycorrhiza-Pilze oder entomopathogene Pilze geschädigt, beeinträchtigt dies Nährstoffaufnahme und Ertrag von Pflanzen bzw. die biologische Schädlingsbekämpfung.

Die Applikation von Roundup beeinflusst möglicherweise nicht nur Mikroorganismen, sondern auch andere Bodenorganismen. Nach Cerdeira & Duke (2006) soll Roundup bzw. Glyphosat für die Bodenfauna (z. B. Regenwürmer) keine direkte Toxizität aufweisen. Indirekte Effekte sind allerdings sehr wohl zu erwarten. So vermieden Regenwürmer in Laborversuchen glyphosatkontaminierten Boden (Verrell & Van Buskirk 2004). Zudem kann von behandelten Pflanzen ausgeschiedenes Glyphosat gemeinsam mit Bodenpartikeln von der Bodenfauna aufgenommen werden und unter Umständen deren Darmflora beeinträchtigen. Hinzu kommt: Wird die Bodenbedeckung durch Wildkräuter infolge des Totalherbizids massiv verändert, wirkt sich dies auf bodenlebende Organismen aus (Brooks et al. 2003), insbesondere solche, die nicht an rasche Wechsel angepasst sind.

Auswirkungen auf die Bodenfruchtbarkeit

Der Chelatbildner Glyphosat bindet Spurenelemente (z. B. Eisen und Mangan) im Boden sehr leicht und kann deren Transport von den Wurzeln bis in die Pflanzensprosse fast völlig unterbinden. Aus den schwer löslichen Glyphosat-Metall-Komplexen lassen sich die für die Pflanzen notwendigen Spurenelemente offenbar nur schwer entziehen (Hobom 2007). Hinzu kommt, dass Bakterien (z. B. *Agrobacterium* spp.), die an der Immobilisierung von Mangan beteiligt sind und so seine Aufnahme durch Pflanzen behindern, durch Glyphosat

Folgerungen & Forderungen

- Glyphosat kann länger als erwartet im Boden verbleiben und in Gewässer gelangen.
- Die Stickstoffbindung bei Leguminosen wird behindert wie auch die Aufnahme von Mikronährstoffen durch Pflanzen.
- Pathogene Pilze wie beispielsweise Fusarien werden hingegen gefördert, was zu vermehrten Pilzkrankheiten führt, zumal gleichzeitig die Abwehrkraft der Pflanzen geschwächt wird. Nützliche Pilze können beeinträchtigt werden.
- Da Glyphosat auch über den Boden auf andere Pflanzen übergehen kann, werden deren Gesundheit und Ertragsstärke negativ beeinflusst.
- Es gibt Hinweise darauf, dass Roundup toxischer sein kann als der Wirkstoff Glyphosat allein; Tests, die nur mit Glyphosat durchgeführt werden, erbringen in diesem Fall geschönte Angaben über die Toxizität des Herbizids.
- Glyphosat ist keineswegs ein umweltverträgliches Herbizid. Ein derartiges Herbizid hat in einer auf Nachhaltigkeit setzenden Landwirtschaft keinen Platz.
- Dies gilt für die derzeitigen Anwendungsbereiche und erst recht im Falle einer Nutzung bei transgenen herbizidresistenten Pflanzen.

selektiert und gefördert werden (Kremer & Means 2009). Wieweit diese Effekte zu einer Unterversorgung mit Mikronährstoffen und reduziertem Ertrag führen, hängt auch von der jeweiligen Bodenbeschaffenheit ab. In den USA wird der breite Glyphosat-Einsatz bei transgenen RR-Pflanzen vermehrt von Manganmangel begleitet. Ertragsrückgänge werden beobachtet, denen mit zusätzlicher Ausbringung von Mangan begegnet werden soll (McLamb 2007). Wird Mangan allerdings gleichzeitig mit Glyphosat ausgebracht, zeigen RR-Sojabohnen eine geringere Glyphosat-Resistenz, außerdem verringert sich die Verfügbarkeit anderer Spurenelemente (Hobom 2007).

Mangan ist Co-Faktor für viele Enzyme und spielt eine wichtige Rolle bei zahlreichen pflanzlichen Prozessen wie der Photosynthese, dem Stickstoff- und Kohlenhydrat-Stoffwechsel und der Krankheitsabwehr. Eine Unterversorgung mit Mangan macht Pflanzen deshalb auch anfälliger für Krankheitserreger. Das vermehrte Auftreten von Schadpilzen wie Fusarien nach Glyphosat-Einsatz steht damit in Zusammenhang (Kremer & Means 2009, Johal & Huber 2009).

Glyphosat kann sogar über den Boden auf andere Pflanzen übergehen, unabhängig von einer Wirkstoff-Aufnahme über die Blätter. Neumann et al. (2007) zeigten, dass Glyphosat nach Applikation auf die Blätter von

RR-Sojabohnen rasch in die Wurzeln gelangt und anschließend in die Rhizosphäre abgegeben wird. Hier wird es offenbar ausreichend lange stabilisiert, um eine indirekte Wirkung auf benachbarte Nichtziel-Pflanzen ausüben zu können, indem etwa ihr Stoffwechsel und die Aufnahme von Mikronährstoffen wie Mangan ebenfalls beeinträchtigt werden. Ein derartiger Übergang von Glyphosat aus behandelten (und absterbenden) Pflanzen auf Kulturpflanzen und eine daraus resultierende Schädigung scheint generell möglich zu sein. Berichte über Probleme mit der Gesundheit und Produktivität von Dauerkulturen (z. B. im Obstbau) nach langjähriger Anwendung von Glyphosat bestätigen dies (Yamada et al. 2009).

Literatur

- Accinelli, C. et al. (2004): Influence of insecticidal toxins from *Bacillus thuringiensis* subsp. *kurstaki* on the degradation of glyphosate and glufosinate-ammonium in soil samples. *Agricult. Ecosyst. Environm.* 103, 497–507.
- Benbrook, C.M. (2005): Rust, resistance, run down soils, and rising costs – problems facing soybean producers in Argentina. Technical paper number 8 (http://www.greenpeace.de/fileadmin/gpd/user_upload/themen/gentechnik/Benbrook-StudieEngl.pdf).
- Borggard, O.K. & Gimsing, A.L. (2008): Fate of glyphosate in soil and the possibility of leaching to ground and surface waters: a review. *Pest Manag. Sci.* 64: 441–456.
- Brausch, J.M. & Smith, P.N. (2007): Toxicity of three polyethoxylated tallowamine surfactant formulations to laboratory and field collected fairy shrimp, *Thamnocephalus platyurus*. *Arch. Environ. Contam. Toxicol.* 52: 217–221.
- Brooks, D.R. et al. (2003): Invertebrate responses to the management of genetically modified herbicide-tolerant and conventional spring crops. I. Soil-surface-active invertebrates. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.* 358, 1847–1862.
- BVL Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit (2009): Pflanzenschutzmittelliste – Glyphosat, Ackerbau (<https://portal.bvl.bund.de/psm/jsp/ListeMain.jsp?page=1>).
- Cerdeira, A.L. & Duke, S.O. (2006): The current status and environmental impacts of glyphosate-resistant crops: A review. *J. Environ. Qual.* 35: 1633–1658.
- Diamond, G.L. & Durkin, P.R. (1997): Effects of surfactants on the toxicity of glyphosate, with reference to RODEO (<http://www.fs.fed.us/foresthealth/pesticide/pdfs/Surfactants.pdf>).
- EC European Commission (2002): Review report for the active substance Glyphosate 6511/VI/99-final (http://ec.europa.eu/food/plant/protection/evaluation/existactive/list1_glyphosate_en.pdf).
- Fernandez, M.R. et al. (2007a): Impacts of crop production factors on Fusarium head blight in barley in eastern Saskatchewan. *Crop Science* 47, 1574–1584.
- Fernandez, M.R. et al. (2007b): Impacts of crop production factors on common root rot of barley in eastern Saskatchewan. *Crop Science* 47, 1585–1595.
- Fernandez, M.R., Selles, F., Gehl, D., DePauw, R.M. & Zentner, R.P. (2005): Crop production factors associated with Fusarium head blight in spring wheat in eastern Saskatchewan. *Crop Science* 45, 1908–1916.
- Hayes, T.B. et al. (2006): Pesticide mixtures, endocrine disruption, and amphibian declines: are we underestimating the impact? *Environ. Health Perspect.* 114 Suppl 1: 40–50.

- Hobom, B. (2007): Gespritzt, gedopt, verkümmert. FAZ 164, N1.
- Johal, G.S. & Huber, D.M. (2009): Glyphosate effects on diseases of plants. *Europ. J. Agronomy* 31, 144–152.
- Kjaer, J. et al. (2009): The Danish pesticide leaching assessment programme. Monitoring results 1999-2006 (http://pesticidvarsling.dk/xpdf/vap-results-99-06_update.pdf).
- Kremer, R.J. & Means, N.E. (2009): Glyphosate and glyphosate-resistant crop interactions with rhizosphere microorganisms. *Europ. J. Agronomy* 31, 153–161.
- Kremer, R.J., Means, N.E. & Kim, S. (2005): Glyphosate affects soybean root exudation and rhizosphere microorganisms. *Int. J. of Analytical Environmental Chemistry* 85, 1165–1174.
- Kremer, R.J. et al. (2000): Glyphosate-tolerant soybean affects root and soil *Fusarium* and soybean cyst nematode. *Proc. North Central Weed Sci. Soc.* 55.
- Labes, G., Danneberg, G. & Simon, R. (1999): Abschätzung der Einwirkungen gentechnisch veränderter Kulturpflanzen auf den Boden, vor allem auf die organische Bodensubstanz als Träger der Lebensraumfunktion. *Umweltbundesamt Berlin, Texte* 34/99.
- Locke, M.A., Zablotowicz, R.M. & Reddy, K.N. (2008): Integration soil conservation practices and glyphosate-resistant crops: impacts on soil. *Pest Manag. Sci.* 64: 441–456.
- McLamb, A. (2007): Manganese linked to higher yields in glyphosate-resistant soybeans. *Crop Talk*, Vol. 1, March 2007 (<http://www.growersmineral.com>).
- Meriles, J.M. et al. (2006): Glyphosate and previous crop residue effect on deleterious and beneficial soil-borne fungi from a peanut-corn-soybean rotation. *J. Phytopathology* 154: 309–316.
- Morjan, W.E., Pedigo, L.P. & Lewis, L.C. (2002): Fungicidal effects of glyphosate and glyphosate formulations on four species of entomopathogenic fungi. *Environ. Entomol.* 31, 1206–1212.
- Motavalli, P.P. et al. (2004): Impact of genetically modified crops and their management on soil microbially mediated plant nutrient transformations. *J. Environ. Qual.* 33: 816–824.
- Neumann, G. et al. (2006): Relevance of glyphosate transfer to non-target plants via the rhizosphere. *Journal of Plant Diseases and Protection, Sonderheft XX*, 963-969.
- Njiti, V.N. et al. (2003): Roundup Ready soybean: Glyphosate effects on *Fusarium solani* root colonization and sudden death syndrome. *Agron. J.* 95, 1140–1145.
- Powell, J.R. & Swanton, C.J. (2008): A critique of studies evaluation glyphosate effects on diseases associated with *Fusarium* spp. *Weed Research* 48: 307–318.
- Reddy, K.N. & Zablotowicz, R.M. (2003): Glyphosate-resistant soybean response to various salts of glyphosate and glyphosate accumulation in soybean nodules. *Weed Science* 51, 496–502.
- Relyea, R. (2005): The lethal impact of Roundup and predatory stress on six species of North American tadpoles. *Arch. Environ. Contam. Toxicol.* 48, 351–357.
- Roslycky, E.B. (1982): Glyphosate and the response of the soil microbiota. *Soil Biology and Biochemistry* 14, 87–92.
- Sanyal, D. & Shrestha, A. (2008): Direct effect of herbicides on plant pathogens and disease development in various cropping systems. *Weed Science* 56, 155–160.
- Schuette, J. (1998): Environmental fate of glyphosate (<http://www.cdpr.ca.gov/docs/emppm/pubs/fatememo/glyphos.pdf>).
- Sturm, S. & Kiefer, J. (2007): Erhebung zur aktuellen Gewässerbelastung mit Pflanzenschutzmitteln. *Energie/Wasser-Praxis* 4/2007, 30–33.
- Verrell, P. & Van Buskirk, E. (2004): As the worm turns: *Eisenia fetida* avoids soil contaminated by a glyphosate-based herbicide. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 72, 219–224.
- Yamada, T. et al. (2009): Glyphosate interactions with physiology, nutrition and diseases of plants: threat to agricultural sustainability? *Europ. J. Agronomy* 31, 111–113.
- Zablotowicz, R.M. & Reddy, K.N. (2007): Nitrogenase activity, nitrogen content, and yield responses to glyphosate in glyphosate-resistant soybean. *Crop Protection* 26, 370–376.

Autorin

Dr. Martha Mertens

ist Diplom-Biologin und Sprecherin des Arbeitskreises Bio- und Gentechnologie des BUND und des gleichnamigen Arbeitskreises des Bund Naturschutz in Bayern e.V.

Ilmmünsterstr. 33
80686 München
E-Mail: martha.mertens@t-online.de

