



1. Prolog

Einführung

Die landwirtschaftliche Produktion ist von einer variierenden Intensität geprägt. Der Begriff Intensität beinhaltet dabei technologische Maßnahmen (z. B. die Durchführung der Bodenbearbeitung) und den Einsatz von Dünge- und Pflanzenschutzmitteln (PSM) (Herzog et al., 2006). Der Einsatz von PSM ist ein integraler Bestandteil, der zur Regulierung von Schaderregern und somit zur Sicherung und Steigerung der Anbauproduktivität beiträgt. Doch trotz der Obstruktionshaltung der Öffentlichkeit gegenüber PSM (BfR, 2010) steigt der Verbrauch weltweit an (FAO, 2008). Allerdings stellt diese Steigerung keine Garantie für maximale Erträge dar, denn durch Schaderreger treten weiterhin hohe Verluste auf (Cai, 2008; Pimentel, 2009; Birch et al., 2011). Zusätzlich zu dieser Problematik steht die Landwirtschaft vor weiteren Herausforderungen durch den Klimawandel (Von Tiedemann und Ulber, 2008; Godfray et al., 2012), den zunehmenden Bedarf an Nahrungsmitteln durch die wachsende Weltbevölkerung (Tilman et al., 2002; FAO, 2009) und die steigende Nachfrage nach Energierohstoffen und dementsprechend Energiepflanzen (Steinfeld und Wassenaar, 2007; Godfray et al., 2010). Diese Umstände können in der Konsequenz einen Anstieg der Intensität des PSM-Einsatzes nach sich ziehen (Tilman et al., 2001).

Europaweit machen Fungizide mit ungefähr 50 % den größten Anteil der insgesamt rund 220.000 Tonnen (2003; 25 EU-Mitgliedstaaten) ausgebrachten PSM aus (Eurostat, 2007). Im Vergleich dazu lagen die in Deutschland abgesetzten PSM-Mengen in der letzten Dekade zwischen 35.000 und 44.000 Tonnen, wovon Herbizide mit 37 % bis 45 % stets den größten Anteil aufwiesen (BMELV, 2011). Die tatsächlich ausgebrachte Menge lag 2003 bei rund 23.000 Tonnen PSM und 12.500 Tonnen Herbiziden (54 % der Gesamtmenge) (Eurostat, 2007). Daraus wird die hohe Bedeutung der Unkrautregulierung für die deutsche Landwirtschaft ersichtlich. Heitefuss (1997) sieht in der Herbizidanwendung eine kostengünstigere Alternative für die landwirtschaftliche Produktion verglichen mit der mechanischen Unkrautbekämpfung. Dabei scheint kulturübergreifend die Zunahme der pfluglosen Bodenbearbeitung mittels Direkt- und Mulchsaatenverfahren als Maßnahme zum Erosionsschutz hauptsächlich für den stetigen Anstieg des Herbizideinsatzes verantwortlich zu sein (Holland, 2004; Chauhan et al., 2012). Der Einsatz eines einzelnen Herbizids zur Unkrautregulierung ist nach heutigem Kenntnisstand aus bekämpfungsstrategischen, ökologischen und ökonomischen Gesichtspunkten als nicht mehr zeitgemäß und ausreichend



effizient einzustufen (Chauhan et al., 2012). Die Vorteile einer Herbizidkombination sind durch ein breiteres Unkrautwirkungsspektrum (Schweizer und May, 1993; Roßberg et al., 2010) und durch Kosteneinsparungen aufgrund reduzierter Aufwandmengen (Marwitz et al., 2012) gegeben.

Der Anbau von Zuckerrüben (*Beta vulgaris* L.) wird insgesamt als intensiv angesehen (Defra, 2002; MEA, 2005). Insbesondere der Schutz der empfindlichen jungen Zuckerrübenpflanzen vor erhöhter Konkurrenz um die begrenzt verfügbaren Wachstumsfaktoren Licht, Wasser und Nährstoffe mit Unkräutern (Petersen, 2004) erfordert intensive Regulierungsmaßnahmen (Märländer et al., 2003). Deshalb werden in Zuckerrüben Herbizide auf fast 100 % der konventionellen Anbauflächen ausgebracht (Buhre et al., 2011). Doch im Vergleich zum deutlichen Anstieg der Herbizidintensität und Behandlungshäufigkeit von 2005 bis 2007 verringerte sich die Anzahl der durchgeführten herbiziden Applikationen und deren Intensität im Zuckerrübenanbau im Jahr 2009 gegenüber den Vorjahren (Roßberg et al., 2010). Dabei wird das Maß der Intensität durch den dimensionslosen Behandlungsindex abgebildet, der das Verhältnis der tatsächlichen Herbizidaufwandmenge und behandelten Fläche zur zugelassenen Aufwandmenge und Gesamtfläche angibt (Roßberg et al., 2002). Der hohe Anteil von 70 % an den gesamten PSM-Anwendungen über alle Wirkstoffgruppen (Ladewig et al., 2009) führt dazu, dass Herbizide mit einem Behandlungsindex von 2,2 die Pflanzenschutzintensität im Zuckerrübenanbau maßgeblich charakterisieren (Roßberg et al., 2010). Der Herbizideinsatz erfolgt in der Praxis üblicherweise an drei bis vier Terminen im Nachauflaufverfahren (d. h. nach Auflaufen der Rüben, im Keimblattstadium der Unkräuter) als Kombination mit variierender Herbizid- bzw. Wirkstoffanzahl und Aufwandmenge (Vasel et al., 2012). Dabei richtet sich die Wahl des Herbizids und der Intensität nach dem standortspezifischen Auftreten der Unkräuter, insbesondere nach der Leit- bzw. Problemverunkrautung.

Durch das „Reduktionsprogramm chemischer Pflanzenschutz“ (BMVEL, 2005) und den „Nationalen Aktionsplan zur nachhaltigen Anwendung von PSM“ (BMELV, 2008) hat sich die Legislative in Deutschland des Themas PSM-Einsatz angenommen, um eine langfristige Risikominderung für Mensch und Natur zu erreichen. Darüber hinaus dürfen PSM-Maßnahmen nur nach der guten fachlichen Praxis durchgeführt werden, was ab 2014 für alle EU-Mitgliedsstaaten die sachgerechte Einhaltung des integrierten Pflanzenschutzes verpflichtend einschließt. Der integrierte Pflanzenschutz verfolgt dabei das Ziel, die PSM-Anwendung auf das notwendige Maß hinsichtlich eines sicheren Ertrages unter vorrangiger



Berücksichtigung anderweitiger Bekämpfungsmaßnahmen (z. B. biologische, pflanzenzüchterische und kulturtechnische) zu reduzieren (PflSchG, 2012). Zudem wird die ökologische Wirkung von PSM im Zulassungsverfahren umfangreich bewertet und eine Zulassung durch das Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit erfolgt nur dann, wenn keine „schädlichen Auswirkungen auf die Gesundheit von Mensch oder Tier oder auf das Grundwasser oder [...] insbesondere auf den Naturhaushalt“ zu erwarten sind (PflSchG, 2012). Die Wirkung der immer mehr an Bedeutung gewinnenden Herbizidstrategien mit unterschiedlicher Wirkstoffanzahl und Aufwandmenge bleibt durch das Zulassungsverfahren jedoch unberücksichtigt. Doch gerade aus ökotoxikologischer Sicht können unterschiedlich intensive Anwendungsstrategien zu voneinander abweichenden Effekten führen. So kann eine einmalige Applikation mit hoher Aufwandmenge einen akuten Effekt nach sich ziehen, wohingegen geringe Aufwandmengen bei mehrmaliger Applikation zu chronischen Effekten bei einzelnen Nichtzielorganismen führen können (Becker, 1994). Das Gefährdungspotential bzw. die Ökotoxizität auf Organismen beruht letztlich auf den physikalisch-chemischen Stoffeigenschaften und vor allem auf der Aufwandmenge, welcher der Organismus ausgesetzt ist (Fent, 1998). Daraus lässt sich ableiten, dass ein ökologisches Gefährdungspotenzial stark von der Pflanzenschutzintensität abhängig ist und schädliche Effekte zugelassener Herbizide insbesondere in Kombinationen auf Nichtzielorganismen daher nicht auszuschließen sind (vgl. Schäfer et al., 2012).

Agrarökosysteme sind von Regulationsmaßnahmen des Landwirtes und dem daraus resultierenden Umweltbelastungspotential abhängige Nutzökosysteme (Knauer, 1993). Je nach Intensität der landwirtschaftlichen Anbaumaßnahmen können ökologische Wirkungen im gesamten Naturhaushalt (Boden, Wasser und Luft) auftreten (Benton et al., 2003; Pretty, 2009), da mit den anthropogenen Eingriffen direkte und indirekte Veränderungen in den Ökosystemen einhergehen (Pilgrim et al., 2010). Infolge des PSM-Einsatzes vermuteten Geiger et al. (2010) einen europaweiten Biodiversitätsverlust auf Agrarflächen, was dazu führen kann, dass Ökosystemprozesse und deren Funktionalität nachhaltig beeinflusst werden (Naeem et al., 1994). Doch gerade diese Ökosystemprozesse sollten vor allem im Kompartiment Boden als landwirtschaftlicher Produktionsfaktor im Mittelpunkt von Schutzmaßnahmen stehen. Die Ökosystemdienstleistungen eines intakten Bodenökosystems üben z. B. mit der Detoxifikation, Schädlingskontrolle und Nährstoffbereitstellung durch die Mineralisierung eine förderliche Wirkung auf den Ertrag der Kulturpflanze und somit den Gewinn des Landwirts aus (Barrios, 2007).



Herbizide weisen im Vergleich zu anderen Wirkstoffgruppen, vor allem Insektiziden und Fungiziden, die geringsten direkten schädlichen Wirkungen auf Nichtzielorganismen auf (Edwards und Bohlen, 1996; Palma et al., 2008). Vielmehr üben sie einen indirekten Einfluss auf die im Agrarökosystem lebenden Organismen durch die Beseitigung der Unkräuter aus (Wardle et al., 1995), denn diese dienen als Nahrungsquelle und Habitat für viele Organismen (Marshall et al., 2003). Dessen ungeachtet beschreiben Studien variierende und organismenspezifische ökologische Effekte von Herbiziden. Navntopf et al. (2006) fanden bei einer um 75 % reduzierten Herbizidaufwandmenge positive Effekte auf die Laufkäferabundanz und -biomasse in Wintergetreide verglichen mit einer praxisüblichen Aufwandmenge heraus. Auch Fischer und Heimbach (2011) untersuchten Effekte von Herbizidstrategien mit unterschiedlichen Intensitäten auf die Laufkäferfauna in Zuckerrüben, stellten aber keine signifikanten Unterschiede in der Abundanz fest. Andere Herbizide wie Linuron und Trifluralin führten wiederum in Feldversuchen in Soja zum Rückgang der mikrobiellen Biomasse und Abundanz im Boden (Nowak et al., 2008). Herbizide können auch zu schädlichen Wirkungen bei Bodenlebewesen wie Regenwürmern (Lee, 1985) oder epigäischen Arthropoden (Freemark und Boutin, 1995) führen. Demgegenüber stellten Mele und Carter (1999) eine signifikant höhere Regenwurmpopulation auf Flächen fest, auf denen im Vergleich zur empfohlenen Herbizidaufwandmenge eine doppelte Aufwandmenge appliziert wurde. Generell berücksichtigen Studien zu bodenökologischen Wirkungen von Herbiziden vorwiegend einzelne Herbizide in Mikro- oder Mesokosmen (Brust, 1990; Springett und Gray, 1992; Heupel, 2002; Dittbrenner et al., 2010; Haque et al., 2011). Praxisnahe Freilandversuche erfassen zumeist nicht die Wechselwirkungen unterschiedlicher Anbauintensitäten (z. B. Pflanzenschutz- und Bodenbearbeitungsintensität) und/oder die Vielfältigkeit der Standorteffekte (z. B. Boden- und Witterungsparameter).

Studien, die Effekte von Pflanzenschutzintensitäten im Zusammenhang mit der Gewässerbelastung untersuchten, zeigten, dass geringe PSM-Aufwandmengen zu niedrigen PSM-Konzentrationen und verringerten Ökotoxizitäten in Gewässern führen (Kreuger, 1998; Kreuger und Törnqvist, 1998; Hunt et al., 2006). Hinsichtlich der Gewässerbelastung, insbesondere die des Grundwassers zur Trinkwassergewinnung, stellen Herbizide die häufigste Ursache für Qualitätsprobleme dar (Alloway und Ayres, 1996). Der Grund dafür ist wahrscheinlich auf die Applikation zum Zeitpunkt eines geringen Kulturdeckungsgrades zurückzuführen, wodurch ein hoher Bodeneintrag begünstigt wird. Die in oder auf den Boden gelangenden Herbizide können im ungünstigsten Fall unabhängig von der Bodenbearbeitung (z. B. infolge von Starkniederschlagsereignissen kurz nach der Applikation oder durch



Trockenrisse) durch die Tiefenverlagerung im Bodenprofil (Flury, 1996; Malone et al., 2003) und den lateralen Abfluss (Wauchope, 1978; Battaglin et al., 2003; Masters et al., 2008) in hohen Konzentrationen in Gewässer gelangen. In Oberflächengewässern können Herbizide direkte toxische Wirkungen hervorrufen (Mohr et al., 2008; Abrantes et al., 2008). Einzelfälle aus jüngster Vergangenheit zeigen, dass eine potentielle Gefahr für den Naturhaushalt durch Herbizide auch trotz sachgerechter und bestimmungsgemäßer Anwendung gegeben, aber diese von vielfältigen Einflussfaktoren wie Standorteigenschaften und Wirkstoffcharakteristika sowie deren Wechselwirkung abhängig ist. So wurde der in Zuckerrüben zur Anwendung kommende Wirkstoff Chloridazon und seine Hauptabbauprodukte in den vergangenen Jahren europaweit in Oberflächengewässern und Grundwässern mit Konzentrationen über dem zulässigen Grenzwert detektiert (Steck, 2008; Buttiglieri et al., 2009). Dabei ist neben den Wirkstoffcharakteristika (z. B. Sorptionsverhalten, Wasserlöslichkeit und Persistenz) vor allem die Bodenart für die Verlagerung in angrenzende Gewässer und deren Belastung ausschlaggebend. Dementsprechend ist auf reinen Sandböden und schwach tonigen oder schluffigen Sanden die Anwendung von Chloridazon durch die Anwendungsbestimmung NG 407 untersagt (BVL, 2012). In schwerer durchlässigen lehm- und tonhaltigen Böden besteht hingegen keine Gefahr der Grundwasserkontamination (Cuevas et al., 2008). Nachteilige Effekte können jedoch nicht einfach kompartiment- oder ökosystemübergreifend quantifiziert werden. Denn Pestemer und Malkomes (1983) fanden heraus, dass in einer Zuckerrübenspritzfolge keine Einflüsse von Chloridazon auf die bodenbiologische Aktivität (z. B. Strohabbau, Dehydrogenaseaktivität) als Indikator für die Ökosystemfunktion vorlagen.

Aufgrund seiner substantiellen ökologischen Dienstleistungen muss dem Schutz des Bodenökosystems mehr Beachtung entgegengebracht werden (BMVEL, 2002). Trotz des Nutzungsinteresses müssen Landwirtschaft und Umweltschutz nicht im Widerspruch zueinander stehen. Denn im Sinne einer zeitgemäßen und nachhaltigen Landwirtschaft sind der Schutz und die Förderung natürlicher Prozesse und Regulationen zu berücksichtigen und unabdingbar. Darüber hinaus fordert die Umsetzung gesetzlicher und regulativer Vorgaben im Zuge des integrierten Pflanzenschutzes und des Nationalen Aktionsplans mehr Transparenz und Beiträge zur Aufklärung von Umweltwirkungen und -risiken von PSM für alle Kompartimente. Daher wurde diese Thematik im Rahmen des interdisziplinären Verbundforschungsprojektes „Entwicklung von Leitlinien für den integrierten Pflanzenschutz in Zuckerrüben und exemplarische Ermittlung der ökologischen und ökonomischen Auswirkungen von innovativen Anwendungen von Pflanzenschutzmitteln“ unter

Koordination des Institutes für Zuckerrübenforschung (IfZ, Göttingen) aufgegriffen, in das die vorliegende Arbeit als Teilprojekt eingebettet war (siehe Abbildung 1).

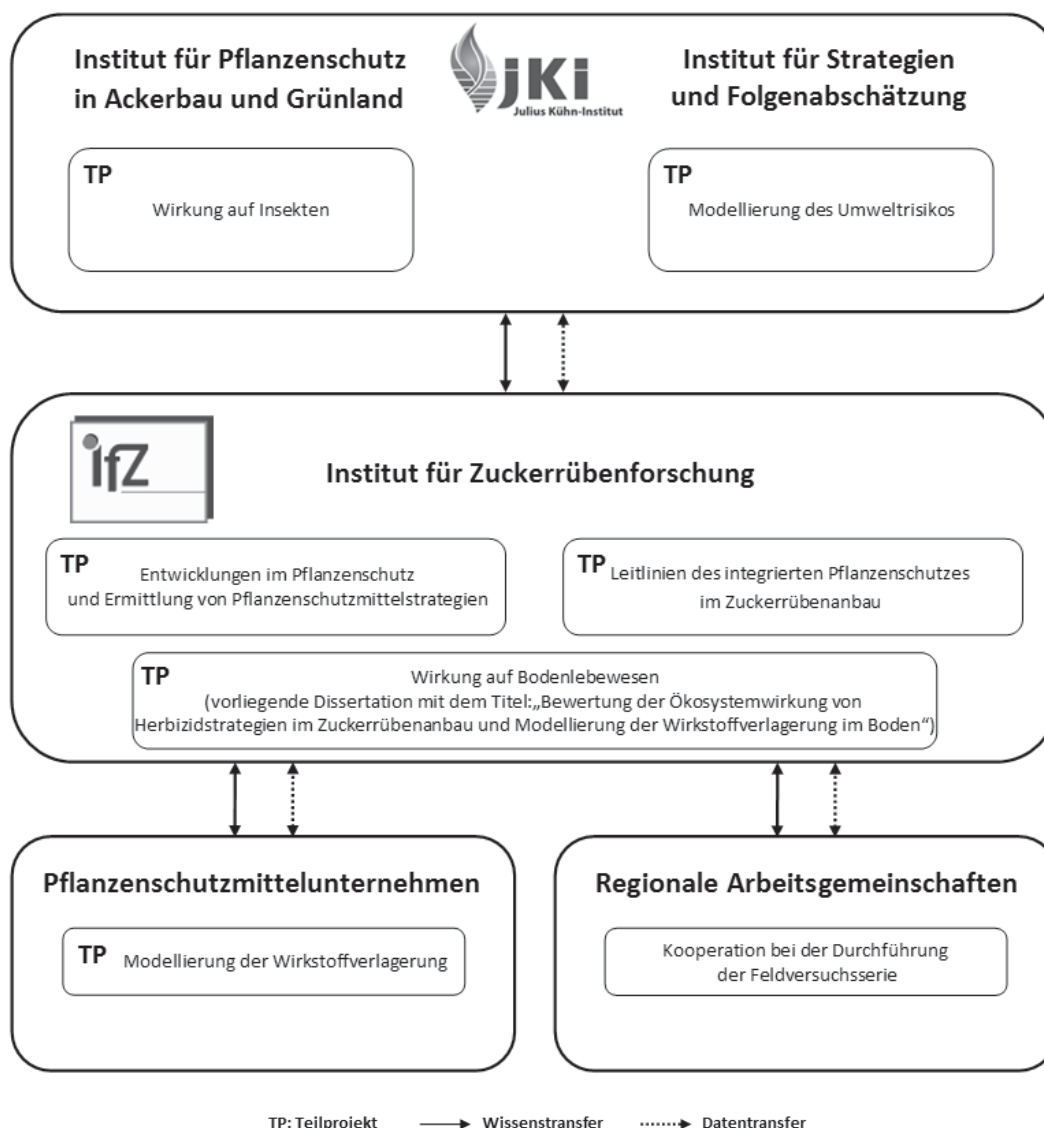


Abbildung 1: Beteiligte Kooperationspartner im Forschungsverbundprojekt „Entwicklung von Leitlinien für den integrierten Pflanzenschutz in Zuckerrüben und exemplarische Ermittlung der ökologischen und ökonomischen Auswirkungen von innovativen Anwendungen von Pflanzenschutzmitteln“ sowie integrierte Teilprojekte (TP) einschließlich der vorliegenden Dissertation.

Konzept und Zielsetzung

Die Anwendung von Herbizidstrategien fand bislang nur unzureichend Eingang in wissenschaftlichen Studien. Daher verfolgt diese Arbeit das Ziel, die ökologische Wirkung herbizider Wirkstoffe in praxisrelevanten Anwendungsstrategien im Zuckerrübenanbau zu untersuchen und deren ökotoxikologisches Risiko zu bewerten. Dabei sah die Konzeption des



Projektes vor, belastbare Aussagen zur ökologischen Wirkung von drei sich in ihrer Intensität unterscheidenden Herbizidstrategien anhand von bundesweiten Feldversuchen zu treffen. Zur Quantifizierung der ökologischen Wirkung der Herbizidstrategien wurden diese in den Jahren 2008 und 2009 an insgesamt 19 sich in ihren Witterungs- und Bodenbedingungen unterscheidenden Standorten untersucht. Zwischen den Herbizidstrategien wurden aufgrund ihrer geringen ökologischen Wirkung (z. B. Edwards und Bohlen, 1996) nur geringe Unterschiede erwartet. Um eine mögliche Überlagerung dieser geringen Unterschiede durch die voraussichtlich stärkeren Effekte der Bodenbearbeitung auf das Agrarökosystem (z. B. Holland, 2004) zu berücksichtigen, wurden die Herbizidstrategien in konventioneller (Pflugsystem) und konservierender (Mulchsystem) Bodenbearbeitung geprüft.

Die multifaktoriellen Versuche umfassten die Beurteilung ökologischer Wirkungen auf die Ökosystemstruktur und -funktion des Edaphons (Abbildung 2). Zur Bewertung möglicher ökologischer Wirkungen auf die Struktur der Bodenfauna wurde exemplarisch der bodenbiologische Indikator „Regenwurm“ gewählt. In Voruntersuchungen zur Austreibungseffizienz zweier Methoden im Herbst 2007 zeigte sich die Formalinmethode (Raw, 1959) gegenüber der Senfanwendung (Gunn, 1992) als geeigneter, um die Regenwurmpopulation angemessen zu erfassen (unveröffentlicht). An jedem Standort wurde die Regenwurmpopulation an zwei Terminen im Jahr mittels Formalinmethode untersucht. Dabei wurde der Einfluss der Bodenbearbeitung auf die Regenwurmpopulation durch Probenahmen im Frühjahr und die ökologische Wirkung der Herbizidstrategien zusätzlich durch Probenahmen im Herbst ermittelt. Zur Beurteilung einer möglichen Wirkung auf die Ökosystemfunktion wurde die biologische Aktivität des Edaphons als Indikator herangezogen. Hierfür kamen mit dem Minicontainer-Test (Eisenbeis, 1993) und dem Köderstreifen-Test (Von Törne, 1990) zwei Screeningmethoden mit unterschiedlichen Ansätzen zum Einsatz. Durch die kombinierte Anwendung beider Methoden ist eine hohe Repräsentativität für die biologische Aktivität des Edaphons gegeben.

Vor dem Hintergrund des Risikos der Gewässerkontamination durch PSM war eine weitere Fragestellung, inwieweit durch die Anwendung der Herbizidmischungen wirkstoffspezifische Gefahren für das Grundwasser und Oberflächengewässer bestehen. Die Modellierung der Wirkstoffverlagerung mit dem Modell FOCUS PEARL (Tiktak et al., 2000) sollte darüber Aufschluss geben (Abbildung 2). Auf Basis der modellierten Wirkstoffrückstände im Boden erfolgte eine Risikoabschätzung der Herbizidstrategien (Abbildung 2). Um die Ergebnisse der Risikoabschätzung zur Struktur der Bodenfauna aus den Feldversuchen in Beziehung zu

setzen, wurde zur Bewertung der Toxizität der Herbizidstrategien ebenfalls der Indikator „Regenwurm“ berücksichtigt. Als ökotoxikologische Bewertungsgröße wurde die Toxische Einheit (toxic unit - TU) verwendet (Sprague, 1970).

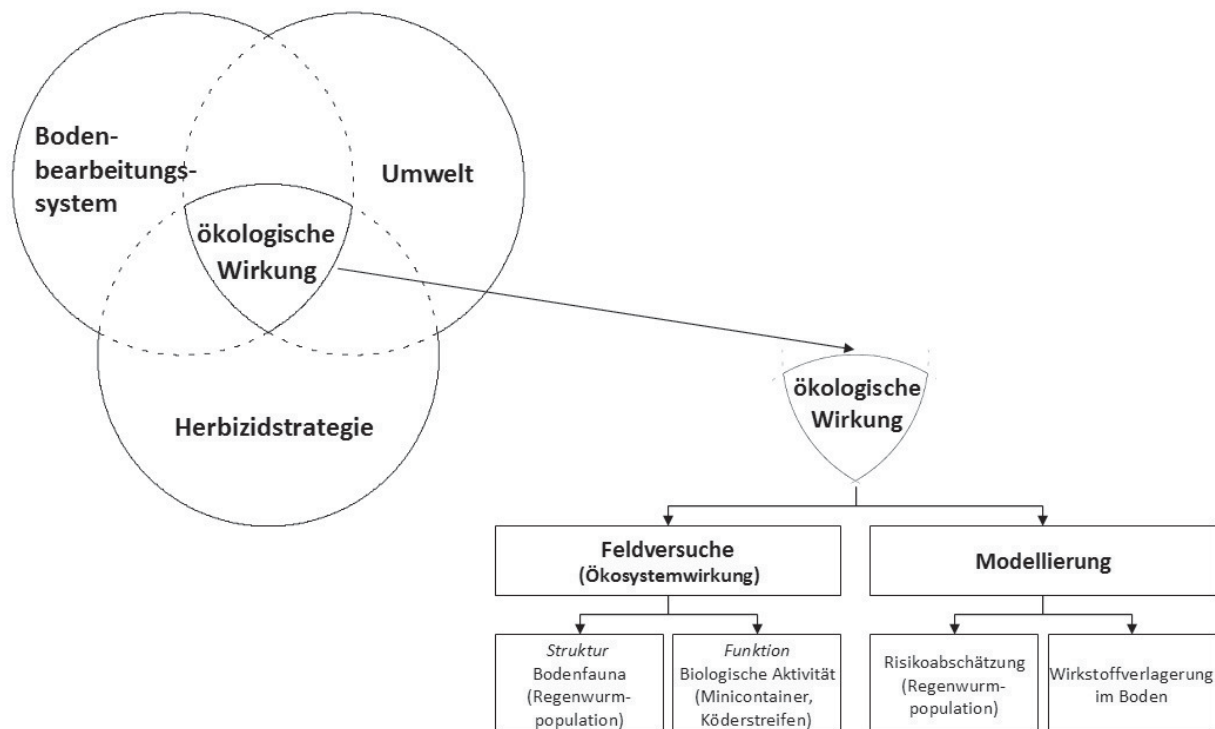


Abbildung 2: Konzeptioneller Ansatz des Promotionsprojektes. Die ökologische Wirkung folgender Einflussfaktoren wurden in den Jahren 2008 und 2009 an insgesamt 19 bundesweiten Standorten in Feldversuchen mit Zuckerrüben geprüft: Umwelt = Kombination aus Standort und Jahr; Bodenbearbeitungssystem = Mulchsystem und Pflugsystem; Herbizidstrategie: Strategie 1: zwei Herbizide mit 100 % der zugelassenen Aufwandmenge; Strategie 2: drei Herbizide mit < 50 % der zugelassenen Aufwandmenge; Strategie 3: sechs Herbizide mit ≤ 35 % der zugelassenen Aufwandmenge.

Aufbau der Arbeit

Die Ökosystemstruktur und -funktion des Edaphons sind Grundlage der ersten drei Artikel. Hierbei werden im ersten Artikel (Kapitel 2) die Ergebnisse zur Untersuchung der Regenwurmpopulation im Jahr 2008 beschrieben, wohingegen der zweite Artikel (Kapitel 3) die ökologische Wirkung der drei Herbizidstrategien über beide Jahre (2008 und 2009) beinhaltet und ferner dominante Regenwurmart und der Diversitätsindex nach Shannon (1948) zur Beurteilung herangezogen werden. Die einjährigen Ergebnisse wurden in der Zeitschrift *Zuckerindustrie* (Marwitz et al., 2011) und die Auswertung der zweijährigen Versuchsreihe im *European Journal of Agronomy* (Marwitz et al., 2012) veröffentlicht. Gegenstand des dritten Artikels (Kapitel 4) ist die ökologische Wirkung der



Herbizidstrategien auf die biologische Aktivität des Edaphons in Abhängigkeit von Bodenbearbeitungssystem und Umwelt (Standort x Jahr). Der Artikel wurde bei der Zeitschrift *European Journal of Agronomy* eingereicht. Im fünften Kapitel „Epilog“ werden die Modellierungsergebnisse der Wirkstoffverlagerung im Boden aufgeführt und außerdem Stellung zum ökologischen Risiko der Herbizidstrategien für Regenwürmer auf Basis der modellierten Wirkstoffkonzentrationen genommen. Die Veröffentlichung des Epilogs ist in Vorbereitung. In einem abschließenden Fazit werden die Ergebnisse dieser Arbeit zusammengefasst interpretiert und ihre ökologische Relevanz für den Zuckerrübenanbau aufgezeigt.

Literaturverzeichnis (Prolog und Fazit)

- Abrantes, N., R. Pereira, A. Soares, F. Goncalves, 2008. Evaluation of the ecotoxicological impact of the pesticide Lasso (R) on non-target freshwater species, through leaching from nearby agricultural fields, using terrestrial model ecosystems. *Water, Air and Soil Pollution* 192:211-220.
- Alloway, B.J. und D.C. Ayres, 1996. Schadstoffe in der Umwelt: chemische Grundlagen zur Beurteilung von Luft-, Wasser- und Bodenverschmutzungen. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg.
- Barrios, E., 2007. Soil biota, ecosystem services and land productivity. *Ecological Economics* 64:269-285.
- Battaglin, W.A., E.M. Thurman, S.J. Kalkhoff, S.D. Porter, 2003. Herbicides and transformation products in surface waters of the Midwestern United States. *Journal of the American Water Resources Association* 39:743-756.
- Becker, H., 1994. Einleitung. In: Deutsche Forschungsgemeinschaft, Hrsg. *Ökotoxikologie von Pflanzenschutzmitteln*. Verlag Chemie, Weinheim, 19-21.
- Benton, T.G., J.A. Vickery, J.D. Wilson, 2003. Farmland biodiversity: is habitat heterogeneity the key? *Trends in Ecology and Evolution* 18:182-188.
- BfR (Bundesinstitut für Risikobewertung), 2010. Pflanzenschutzmittel-Rückstände in Lebensmitteln: die Wahrnehmung der deutschen Bevölkerung - ein Ergebnisbericht. BfR Wissenschaft, Dahlem.
- Birch, A.N.E., G.S. Begg, G.R. Squire, 2011. How agro-ecological research helps to address food security issues under new IPM and pesticide reduction policies for global crop production systems. *Journal of Experimental Botany* 62:3251-3261.
- BMVEL (Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft), 2002. Gute fachliche Praxis zur Vorsorge gegen Bodenschadverdichtungen und Bodenerosion. BMVEL, Bonn.



- BMVEL (Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft), 2005. Reduktionsprogramm chemischer Pflanzenschutz: nachhaltige Landwirtschaft - Vorsorgender Verbraucherschutz - Schutz des Naturhaushaltes. BMVEL, Berlin.
- BMELV (Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz), 2008. Nationaler Aktionsplan zur nachhaltigen Anwendung von Pflanzenschutzmitteln: Risikominderung im Pflanzenschutz - weniger Risiko - mehr Vertrauen. BMELV, Bonn.
- BMELV (Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz), 2011. Statistisches Jahrbuch über Ernährung, Landwirtschaft und Forsten. Landwirtschaftsverlag Münster Hiltrup, ISBN 978-3-7843-5191-9.
- Brust, G.E., 1990. Direct and indirect effects of four herbicides on the activity of carabid beetles (Coleoptera: Carabidae). *Pesticide Science* 30:309-320.
- Buhre, C., K. Bürcky, F. Schmitz, M. Schulte, E. Ladewig, 2011. Umfrage zur Produktionstechnik im Zuckerrübenanbau - Sachstand und Trends (1994 - 2010). *Zuckerindustrie* 136:670-677.
- Buttiglieri, G., M. Peschka, T. Frömel, J. Müller, F. Malpei, P. Seel, T.P. Knepper, 2009. Environmental occurrence and degradation of the herbicide n-chloridazon. *Water Research* 43:2865-2873.
- BVL (Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit), 2012. PSM Zulassungsbericht: Rebell Ultra (006983-00/00). BVL, Braunschweig.
- Cai, D.W., 2008. Understand the role of chemical pesticides and prevent misuses of pesticides. *Bulletin of Agricultural Science and Technology* 1:36-38.
- Chauhan, B.S., R.G. Singh, G. Mahaja, 2012. Ecology and management of weeds under conservation agriculture: a review. *Crop Protection* 38:57-65.
- Cuevas, M.V., L. Cox, M.J. Calderón, M.C. Hermosín, J.E. Fernández, 2008. Chloridazon and lenacil dissipation in a clayey soil of the Guadalquivir river marhes (southwest Spain). *Agriculture, Ecosystems and Environment* 24:245-251.
- Defra (Department for Environment, Food and Rural Affairs), 2002. Sugar beet and the environment in the UK. Report by the United Kingdom in accordance with Article 47(3) of Council Regulation 1260/2001 on the environmental situation of agricultural production in the sugar sector.
- Diercks, R. und R. Heitefuss, 1994. Integrierter Pflanzenbau. Verlagsunion Agrar, München.
- Dittbrenner, N., R. Triebkorn, I. Moser, Y. Capowiez, 2010. Physiological and behavioural effects of imidacloprid on two ecologically relevant earthworm species (*Lumbricus terrestris* and *Aporrectodea caliginosa*). *Ecotoxicology* 19:1567-1573.
- Edwards, C.A. und P.J. Bohlen, 1996. Biology and Ecology of Earthworms. Chapman and Hall, London.
- Eisenbeis, G., 1993. Zersetzung im Boden. In: Ehrnsberger, R., Hrsg. Bodenmesofauna und Naturschutz, Bedeutung und Auswirkung von anthropogenen Maßnahmen. Informationen zu Naturschutz und Landschaftspflege 6. Naturschutzverband Niedersachsen, Verlag Günter Runge, Cloppenburg, 53-76.



- EU (Europäische Union), 2000. Richtlinie 2000/60/EG des europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik. Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften L 327:1-72.
- Eurostat (Statistisches Amt der Europäischen Gemeinschaft), 2007. The use of plant protection products in the European Union: data 1992 - 2003. Official Publications of the European Communities, Luxembourg.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations), 2008. World agriculture: towards 2015/2030 - Summary report. FAO, Rome, ISBN 92-5-104761-8.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations), 2009. World Summit on Food Security. FAO, Rome 16-19 November.
- Fent, K., 1998. Ökotoxikologie. Georg Thieme Verlag, Stuttgart.
- Fischer F. und U. Heimbach, 2011. Auswirkung verschiedener Herbizidstrategien auf Laufkäfer (Carabidae) in Zuckerrüben. Zuckerindustrie 136:104-108.
- Flury, M., 1996. Experimental evidence of transport of pesticides through field soils - a review. Journal of Environmental Quality 25:25-45.
- Freemark, K. und C. Boutin, 1995. Impacts of agricultural herbicide use on terrestrial wildlife in temperate landscapes: a review with special reference to North America. Agriculture, Ecosystems and Environment 52: 67-91.
- Geiger, F., J. Bengtsson, F. Berendse, W.W. Weisser, M. Emmerson, M.B. Morales, P. Ceryngier, J. Liira, T. Tschardt, C. Winqvist, S. Eggers, R. Bommarco, T. Pärt, V. Bretagnolle, M. Plantegenest, L.W. Clement, C. Dennis, C. Palmer, J.J. Oñate, I. Guerrero, V. Hawro, T. Aavik, C. Thies, A. Flohre, S. Hänke, C. Fischer, P.W. Goedhart, P. Inchausti, 2010. Persistent negative effects of pesticides on biodiversity and biological control potential on European farmland. Basic and Applied Ecology 11:97-105.
- Godfray, H.C.J., J.R. Beddington, I.R. Crute, L. Haddad, D. Lawrence, J.F. Muir, J. Pretty, S. Robinson, S.M. Thomas, C. Toulmin, 2010. Food security: the challenge of feeding 9 billion people. Science 327:812-818.
- Godfray, H.C.J., J. Pretty, S.M. Thomas, E.J. Warham, J.R. Beddington, 2012. Linking policy on climate and food. Science 331:1013-1014.
- Gunn, A., 1992. The use of mustard to estimate earthworm populations. Pedobiologia 36:65-67.
- Gutsche, V., J. Strassemeyer, E. Ladewig, 2012. Modellierung des Umwelt-Risikopotenzials von Pflanzenschutzstrategien im Zuckerrübenanbau. Gesunde Pflanzen 64:11-19.
- Haque, A., R. Das Gupta, P.P. Chakravorty, 2011. Effect of two herbicides on *Xenylla Welchi* (Hexapoda: Collembola) under laboratory conditions. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology 86:583-586.
- Heitefuss, R., 1997. Pflanzenschutz - Grundlagen der praktischen Phytomedizin. Georg Thieme Verlag, Stuttgart.
- Herzog, H., B. Steiner, D. Bailey, J. Baudry, R. Billeter, R. Bukáček, G. De Blust, R. De Cock, J. Dirksen, C.F. Dormann, R. De Filippi, E. Frossard, J. Liira, T. Schmidt, R.



- Stöckli, C. Thenail, W. van Wingerden, R. Bugter, 2006. Assessing the intensity of temperate European agriculture at the landscape scale. *European Journal of Agronomy* 24:165-181.
- Heupel, K., 2002. Avoidance response of different collembolan species to Betanal. *European Journal of Soil Biology* 38:273-276.
- Holland, J. M., 2004. The environmental consequences of adopting conservation tillage in Europe: reviewing the evidence. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 103:1-25.
- Hunt, J.W., B.S. Anderson, B.M. Phillips, R.S. Tjeerdema, N. Richard, V. Connor, K. Worcester, M. Angelo, A. Bern, B. Fulfroost, D. Mulvaney, 2006. Spatial relationships between water quality and pesticide application rates in agricultural watersheds. *Environmental Monitoring and Assessment* 121:245-262.
- Knauer, N., 1993. Agrarökosysteme - Notwendigkeit und Möglichkeit einer naturnahen Regulierung. *Schriften des naturwissenschaftlichen Vereins für Schleswig-Holstein* 63:103-116.
- Koch, H.-J., C. Pringas, J. Scherer, 2003. Conservation tillage for sustainable sugarbeet production in Germany - environmental and phytopathological aspects. *Zuckerindustrie* 128:810-813.
- Kreuger, J., 1998. Pesticides in stream water within an agricultural catchment in southern Sweden, 1990-1996. *Science of the Total Environment* 216:227-251.
- Kreuger, J. und L. Törnqvist, 1998. Multiple regression analysis of pesticide occurrence in streamflow related to pesticide properties and quantities applied. *Chemosphere* 37:189-207.
- Ladewig, E., D. Roßberg, P. Lukashyk, 2009. Erhebungen zur Pflanzenschutzmittelanwendung in Zuckerrüben (NEPTUN). *Zuckerrübe* 58:182-85.
- Lee, K.E., 1985. *Earthworms - Their Ecology and Relationships with Soils and Land Use*. Academic Press, Sydney.
- Malone, R.W., S. Logsdon, M.J. Shipitalo, J. Weatherington-Rice, L. Ahuja, L. Ma, 2003. Tillage effect on macroporosity and herbicide transport in percolate. *Geoderma* 116:191-215.
- Märländer, B., C. Hoffmann, H.-J. Koch, E. Ladewig, R. Merkes, J. Petersen, N. Stockfisch, 2003. Environmental situation and yield performance of the sugar beet crop in German: heading for sustainable development. *Journal of Agronomy and Crop Science* 189:201-226.
- Marshall, E.J.P., V.K. Brown, N.D. Boatman, P.J.W. Lutman, G.R. Squire, L.K. Ward, 2003. The role of weeds in supporting biological diversity within crop fields. *Weed Research* 43:77-89.
- Marwitz A., E. Ladewig, B. Märländer, 2011. Wirkung von Herbizid-Strategien auf die Regenwurmpopulation und Aktivität der Bodenfauna in Zuckerrüben in Abhängigkeit von Bodenbearbeitung und Standort. *Zuckerindustrie* 136:41-52.



- Marwitz, A., E. Ladewig, B. Märländer, 2012. Impact of herbicide application intensity in relation to environment and tillage on earthworm population in sugar beet in Germany. *European Journal of Agronomy* 39:25-34.
- Masters, B., K. Rohde, N. Gurner, W. Higham, J. Drewry, 2008. Sediment, nutrient and herbicide runoff from cane farming practices in the Mackay Whitsunday region: a field-based rainfall simulation study of management practices. Queensland Department of Natural Resources and Water for the Mackay Whitsunday Natural Resource Management Group, Australia.
- MEA (Millenium Ecosystem Assessment), 2005. Ecosystems and human well-being: policy response: findings of the responses working group of the Millenium Ecosystem Assessment. Island Press, Washington.
- Mele, P.M. und M.R. Carter, 1999. Impact of crop management factors in conservative tillage farming on earthworm density, age, structure and species abundance in south-eastern Australia. *Soil and Tillage Research* 50:1-10.
- Mohr, S., M. Feibicke, R. Berghahn, R. Schmiediche, R. Schmidt, 2008. Response of plankton communities in freshwater pond and stream mesocosms to the herbicide metazachlor. *Environmental Pollution* 152:530-542.
- Naeem, S., L.J. Thompson, S.P. Lawler, J.H. Lawton, R.M. Woodfin, 1994. Declining biodiversity can alter the performance of ecosystem. *Nature* 368:734-737.
- Navntopf, S., P. Esbjerg, W. Riedel, 2006. Effects of reduced pesticide dosages on carabids (Coleoptera: Carabidae) in winter wheat. *Agricultural and Forest Entomology* 8:57-62.
- Nowak, A., J. Nowak, M. Blaszak, M. Hawrot, G. Hury, D. Klodka, D. Musik, K. Przybulewska, B. Smolik, J. Szymczak, A. Telesinski, 2008. Einfluss von Linuron- und Trifluralin-Rückständen auf Mikroorganismen und biochemische Boden- und Pflanzeigenschaften im Soja-Anbau. *Journal of Plant Diseases and Protection, Special Issue XXI*:125-134.
- Palma, P., V.L. Palma, R.M. Fernandes, A. Soares, I.R. Barbosa, 2008. Acute toxicity of atrazine, endosulfan sulphate and chlorpyrifos to *Vibrio fischeri*, *Thamnocephalus platyurus* and *Daphnia magna*, relative to their concentrations in surface waters from the Alentejo region of Portugal. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* 81:485-489.
- Pestemer, W. und H.-P. Malkomes, 1983. Einfluss von Pflanzenschutzmitteln einer Zuckerrüben-Spritzfolge auf biologische Aktivitäten und auf den Abbau von Chloridazon im Boden. I. Freilandversuche. *Weed Research* 23:283-291.
- PflSchG (Pflanzenschutzgesetz), 2012. Gesetz zum Schutz der Kulturpflanzen. Pflanzenschutzgesetz vom 6. Februar 2012 (BGBl. I S. 148, 1281).
- Petersen, J., 2004. A review on weed control in sugar beet: from tolerance zero to period threshold. In: Inderjit, ed. *Weed Biology and Management*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 467-483.
- Pilgrim, E.S., C.J.A. Macleod, M.S.A. Blackwell, R. Bol, D.V. Hogan, D.R. Chadwick, L. Cardenas, T.H. Misselbrook, P.M. Haygarth, R.E. Brazier, P. Hobbs, C. Hodgson, S. Jarvis, J. Dungait, P.J. Murray, L.G. Firbank, 2010. Interactions among agricultural



- production and other ecosystem services delivered from European temperate grassland systems. *Advances in Agronomy* 109:117-154.
- Pimentel, D., 2009. Pesticides and pest control. In: Rajinder, P. und A.K. Dhawan, eds. *Integrated Pest Management: Innovation-Development Process*. Springer Science + Business Media, 83-87.
- Pretty, J., 2009. Can ecological agriculture feed nine billion people. Online publication: www.monthlyreview.org/2009/11/01/can-ecological-agriculture-feed-nine-billion-people.
- Raw, F., 1959. Estimating earthworm population by using formalin. *Nature* 184:1661-1662.
- Roßberg, D., V. Gutsche, S. Enzian, M. Wick, 2002. NEPTUN 2000 - Erhebung von Daten zum tatsächlichen Einsatz chemischer Pflanzenschutzmittel im Ackerbau Deutschlands. *Berichte aus der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft* 98, Braunschweig.
- Roßberg, D., E.-H. Vasel, E. Ladwig, 2010. NEPTUN 2009 - Zuckerrübe. *Berichte aus dem Julius Kühn-Institut* 152, Braunschweig.
- Schäfer R.B., P.C. von der Ohe, J. Rasmussen, J.B. Kefford, M. Beketov, R. Schulz, M. Liess, 2012. Thresholds for the effects of pesticides on invertebrate communities and leaf breakdown in stream ecosystems. *Environmental Science and Technology* 46:5134-5142.
- Schweizer, E.E. und M.J. May, 1993. Weeds and weed control: Science into Practice. In: Cooke, D.A. und R.K. Scott, eds. *The sugar beet crop*. Chapman and Hall, London, 484-519.
- Shannon, C.E., 1948. A mathematical theory of communication. *The Bell System Technical Journal* 27:379-423.
- Sprague, J.B., 1970. Measurement of pollutant toxicity to fish, II-Utilizing and applying bioassay results. *Water Research* 4:3-32.
- Springett, J.A. und R.A.J. Gray, 1992. Effect of repeated low doses of biocides on the earthworm *Aporrectodea caliginosa* in laboratory culture. *Soil Biology and Biochemistry* 24:1739-1744.
- Steck, U., 2008. Trinkwasserqualität und Pflanzenschutzmittel - wohin geht die Entwicklung? *Journal of Plant Diseases and Protection, Special Issue XXI*:121-124.
- Steinfeld, H. und T. Wassenaar, 2007. The role of livestock production in carbon and nitrogen cycles. *Annual Review of Environment and Resources* 32:271-294.
- Tiktak, A., F. van den Berg, J.J.T.I. Boesten, M. Leistra, A.M.A. von der Linden, D. van Kraalingen, 2000. Pesticide emission assessment at regional and local scales: users manual of FOCUS Pearl version 1.1.1. RIVM Report 711401008, Alterra Report 28, Bilthoven.
- Tilman, D., J. Fargione, B. Wolff, C. D'Antonio, A. Dobson, R. Howarth, D. Schindler, W.H. Schlesinger, D. Simberloff, D. Swackhamer, 2001. Forecasting agriculturally driven global environmental change. *Science* 292:281-284.
- Tilman, D., K.G. Cassman, P.A. Matson, R. Naylor, S. Polasky, 2002. Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature* 418:671-677.



- Von Tiedemann, A. und B. Ulber, 2008. Verändertes Auftreten von Krankheiten und Schädlingen durch Klimaschwankungen. In: Von Tiedemann, A., R. Heitefuss, F. Feldmann, Hrsg. Pflanzenproduktion im Wandel - Wandel im Pflanzenschutz. Deutsche Phytomedizinische Gesellschaft, Braunschweig, 79-89.
- Von Törne, E., 1990. Assessing feeding activities of soil living animals. I. Bait-lamina-test. *Pedobiologia* 34:89-101.
- Vasel, E.-H., E. Ladewig, B. Märländer, 2012. Weed composition and herbicide use strategies in sugar beet cultivation in Germany. *Journal für Kulturpflanzen* 64:112-125.
- Wauchope, R.D., 1978. The pesticide content of surface water draining from agricultural fields - a review. *Journal of Environmental Quality* 7:459-472.
- Wardle, D.A., 1995. Impacts of disturbance on detritus food webs in agro-ecosystems of contrasting tillage and weed management practices. *Advances in Ecological Research* 26:105-185.