

ARTYKUŁ ORYGINALNY

Wpływ uprawy na degradację i przemieszczanie terbutylazyny w glebie

Influence of tillage systems on terbuthylazine degradation and leaching in the soil

Mariusz Kucharski***Streszczenie**

Celem badań była ocena wpływu systemu uprawy na szybkość degradacji i przemieszczania terbutylazyny w glebie. Do doświadczeń modelowych wykorzystano glebę pobraną z trzech części pola, które przez 3 lata różnicowano pod względem systemu uprawy: tradycyjny (z orką przedzimową), uproszczony (brona talerzowa + agregat uprawowy) oraz uprawa zerowa (bez uprawy – stosowanie herbicydu zawierającego glifosat + siew bezpośredni). Glebę pobierano próbnikiem rdzeniowym Van der Horsta do kolumn. W stacjonarnej komorze opryskowej wykonano aplikację herbicydu zawierającego terbutylazynę w zalecanej dawce 500 g/ha. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że terbutylazyna należy do substancji o średniej trwałości w glebie ($DT_{50} = 27\text{--}34$ dni). Substancja ta wykazuje najwolniejszy rozkład w glebie z zerowym systemem uprawy. Brak naruszania struktury gleby w uprawie zerowej wpływa korzystnie na mobilność herbicydu, umożliwiając jego szybsze przemieszczanie poza strefę korzeniową roślin.

Słowa kluczowe: uprawa, terbutylazyna, rozkład herbicydu, przemieszczanie, pozostałości, gleba

Abstract

The aim of the study was to evaluate the effect of the cultivation system on the rate of degradation and movement of terbuthylazine in the soil. Model experiments were carried out on soil taken from the field, parts of which were differentiated for 3 years in terms of the cultivation system: conventional (with pre-winter ploughing), reduced (disk harrow + tillage unit) and zero tillage (no tillage – application of glyphosate-containing herbicide + direct sowing). The soil was collected with a Van der Horst core sampler into the columns. In a stationary spray chamber, a herbicide containing terbuthylazine was applied at the recommended dose of 500 g/ha. On the basis of the conducted research, it was found that terbuthylazine is a substance with medium persistence in soil ($DT_{50} = 27\text{--}34$ days). This substance shows the slowest degradation in soil with a zero tillage system. On the other hand, the lack of disturbing the soil structure has a positive effect on the mobility of the herbicide, allowing it to move faster outside the plant root zone.

Key words: tillage systems, terbuthylazine, herbicide degradation, leaching, residues, soil

Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa – Państwowy Instytut Badawczy
Zakład Herbologii i Techniki Uprawy Roli
ul. Orzechowa 61, 50-540 Wrocław

*corresponding author: m.kucharski@iung.wroclaw.pl

Wstęp / Introduction

Zmniejszenie intensywności uprawy roli to temat wielu dyskusji, rozważań i sporów. Zarówno naukowcy, jak też praktycy przytaczają dziesiątki argumentów, wyników badań i obserwacji, które potwierdzają lub zaprzeczają korzyściom stosowania ograniczeń w uprawie. Redukcja zabiegów uprawowych, a szczególnie orki jest skutecznym sposobem kontrolowania zjawiska erozji, utrzymania odpowiedniej wilgotności i temperatury gleby, jak również sposobem na obniżenie kosztów produkcji (Alletto i wsp. 2010; Ali i wsp. 2017; Liu i wsp. 2021). Z drugiej strony, eliminacja lub ograniczenie uprawy powoduje, że wykluczony jest jeden z najważniejszych zabiegów ograniczających zachwaszczenie. Jak wynika z badań, ograniczenia zabiegów uprawowych powodują wzrost zachwaszczenia od kilku do nawet 60%, zwiększa się też dominacja i kompensacja pewnych gatunków chwastów, co negatywnie wpływa na bioróżnorodność i zasobność glebowego banku nasion (Sekutowski 2007; Sekutowski i Smagacz 2014; Jiva i wsp. 2019; Wesołowska i wsp. 2022). Ten efekt jest szczególnie widoczny w połączeniu ograniczeń uprawowych i monokultury (Sekutowski i Domaradzki 2009; Sekutowski i Rola 2010). Zwiększona liczebność chwastów to również obserwowany wzrost występowania chorób grzybowych (Kabir 2005; Gołębiowska i wsp. 2016), pogorszenie parametrów jakościowych i spadek plonu (Morhart i wsp. 2013). Dla ograniczenia opisanych zjawisk konieczne jest wprowadzenie dodatkowej ochrony chemicznej (Andruszczak i wsp. 2014). W takim przypadku napotykamy na dodatkowe problemy wynikające z faktu, że wpływ uproszczonej uprawy roli na środowisko nie jest dobrze poznany. Zastosowane metody uprawowe mogą powodować silne zmiany właściwości fizykochemicznych gleby i jej aktywności biologicznej (Lavorenti i wsp. 2003). Z tego punktu widzenia szczególnie ważna jest wiedza na temat losów stosowanych środków ochrony roślin.

W przypadku większości opisywanych procesów, takich jak retencja, rozkład czy przemieszczanie, wyniki badań zachowania pestycydów w glebie są bardzo zróżnicowane, a czasem sprzeczne. Ta zmienność jest częściowo wyjaśniona wielością procesów i czynników składowych, różnorodnością ich interakcji oraz ich złożoną dynamiką czasową i przestrzenną (Alletto i wsp. 2010). Ponadto brak dokładnego opisu systemów uprawy i strategii pobierania próbek w większości raportów utrudnia kompleksową interpretację tego zróżnicowania wyników. Brak jednoznacznych ustaleń świadczy o złożoności zachodzących procesów i uzasadnia prowadzenie dalszych prac i obserwacji związanych z efektami ograniczeń w uprawie.

Celem badań była ocena wpływu systemu uprawy na szybkość rozkładu i przemieszczanie herbicydu (terbutylazyny) w glebie.

Materiały i metody / Materials and methods

Doświadczenia modelowe prowadzono na glebie pobranej z pola zlokalizowanego w Jelczu-Laskowicach, powiat oleśnicki (N 51.032391 – E 17.356265). W sezonie 2017/2018 na polu uprawiano pszenicę ozimą. Po zbiorze, fragment pola podzielono na 3 równe części (54 × 200 m), które od tego momentu, do wiosny 2021 roku zróżnicowano pod względem systemu uprawy: tradycyjny (z orką przedzimową), uproszczony (brona talerzowa + agregat uprawowy) oraz uprawa zerowa (bez uprawy – stosowanie herbicydu zawierającego glifosat + siew bezpośredni). Dokładny opis zastosowanych zabiegów przedstawiono w tabeli 1. W latach 2019–2020 na tym polu uprawiano kukurydzę. Na wszystkich częściach stosowano ten sam system ochrony przed patogenami. Nie stosowano herbicydów zawierających badaną substancję czynną, tj. terbutylazynę.

Na początku maja 2021 roku z poszczególnych części pola pobrano glebę z profilu glebowego próbnikiem rdzeniowym Van der Horsta (Eijkelkamp Soil & Water, Netherlands) do kolumn o średnicy 6,7 cm i długości 20 cm. Wybrane losowo 3 kolumny przeznaczono do wykonania analiz umożliwiających ocenę podstawowych parametrów gleby w warstwie ornej 0–20 cm. Gleba wykazywała odczyn obojętny (pH 7,1), zawartość C_{org} – 1,19% oraz udział poszczególnych frakcji uziarnienia – il/pył/piasek 8/62/30%. W warunkach laboratoryjnych określono średnią wilgotność (w całym profilu), która wynosiła 62,4% maksymalnej pojemności wodnej gleby. Na wybranym polu, skąd pobrano próbki gleby, nie stwierdzono obecności terbutylazyny, co potwierdziła analiza pozostałości.

Pozostałe kolumny ustawiono pionowo i w stacjonarnej komorze opryskowej wykonano aplikację herbicydu Terbusar 500 SC (terbutylazyna 500 g/l) w zalecanej dawce 1,0 l/ha. Komora opryskowa wyposażona była w ruchomą dyszę typu TeeJet XR 11003-VS, umożliwiającą wydajność cieczy użytkowej równą 200 l/ha przy ciśnieniu roboczym 0,2 MPa. Tak przygotowane kolumny podzielono na dwie części dla przeprowadzenia niezależnych doświadczeń.

Dynamika rozkładu herbicydu w glebie / Dynamics of herbicide decomposition in soil

Przez cały okres prowadzenia doświadczenia wilgotność gleby utrzymywano na stałym, początkowym poziomie stosując codzienne podlewanie (metoda wagowa). Liczba rur z glebą odpowiadała iloczynowi systemów uprawy, liczby pobrań i powtórzeń (3 systemy × 7 pobrań × 4 powtórzenia). Po aplikacji herbicydu rury umieszczono w komorze klimatycznej, w której utrzymywano następujące warunki: temperatura 20°C (dzień) i 10°C (noc), długość cyklu dzień/noc 16/8 h. W czasie trwania cyklu dziennego natężenie światła w komorze wynosiło 12 000 Lx. W cy-

Tabela 1. Harmonogram zabiegów uprawowych
Table 1. Cultivation schedule

Termin Term	Uprawa tradycyjna (UT) Conventional tillage (CT)	Uprawa uproszczona (UU) Reduced tillage (RT)	Uprawa zerowa (UZ) No tillage (NT)
2018			
Lipiec July	zbiór pszenicy ozimej winter wheat harvest	zbiór pszenicy ozimej winter wheat harvest	zbiór pszenicy ozimej winter wheat harvest
Jesień Autumn	brona talerzowa (12 cm) disk harrow (12 cm) orka przedzimowa (25 cm) fall ploughing (25 cm)	brona talerzowa (12 cm) disk harrow (12 cm)	herbicyd (glifosat) herbicide (glyphosate)
2019–2020			
Wiosna Spring	agregat (10 cm) cultivation unit (10 cm) siew kukurydzy maize sowing	agregat (10 cm) cultivation unit (10 cm) siew kukurydzy maize sowing	herbicyd (glifosat) herbicide (glyphosate) siew bezpośredni direct sowing
Jesień Autumn	zbiór kukurydzy maize harvest brona talerzowa (12 cm) disk harrow (12 cm) orka przedzimowa (25 cm) fall ploughing (25 cm)	zbiór kukurydzy maize harvest brona talerzowa (12 cm) disk harrow (12 cm)	zbiór kukurydzy maize harvest herbicyd (glifosat) herbicide (glyphosate)
2021			
Wiosna Spring	agregat (10 cm) cultivation unit (10 cm) pobór próbek gleby soil sampling	agregat (10 cm) cultivation unit (10 cm) pobór próbek gleby soil sampling	herbicyd (glifosat) herbicide (glyphosate) pobór próbek gleby soil sampling

klu nocnym oświetlenie było wyłączone. Próbkę gleby (cała zawartość rury = profil 0–20 cm) pobierano do analizy w przyjętych odstępach czasu. Pierwsze próbki pobrano 1 h po opryskiwaniu (stężenie początkowe). Następne próbki pobierano po 2, 4, 8, 16, 32 i 64 dniach po aplikacji terbutylazyny. Pobrane próbki przechowywano w polietylenowych woreczkach w zamrażarce w temperaturze -20°C , do czasu wykonania analiz (oznaczenie pozostałości).

Przemieszczanie herbicydu w profilu glebowym / Movement of the herbicide in the soil profile

Dwadzieścia godzin po aplikacji herbicydu, w komorze deszczowania przeprowadzono zabieg symulujący opad atmosferyczny (intensywność opadów 18 l/m^2 , całkowity czas deszczowania 3 h). Po upływie doby od deszczowania profile glebowe wytłoczono (wytłaczarka w zestawie próbnika) i pocięto na fragmenty (0–5; 5–10 i 10–20 cm). Pobrane próbki (fragmenty profilu) przechowywano w polietylenowych woreczkach, w zamrażarce, w temperaturze -20°C , do czasu wykonania analiz pozostałości.

Analiza pozostałości terbutylazyny w glebie / Analysis of terbutylazine residues in soil

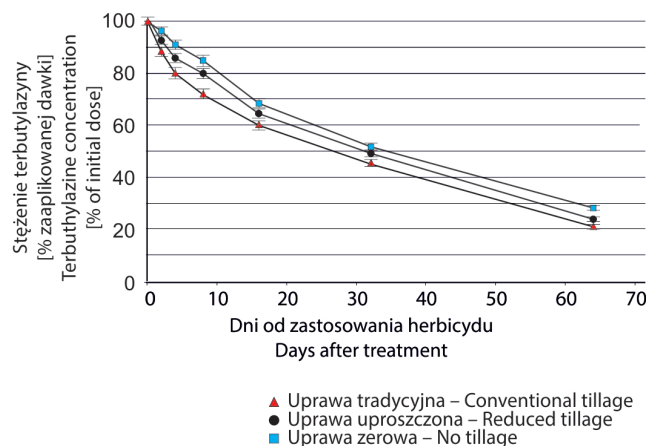
Bezpośrednio przed przystąpieniem do prac analitycznych próbki gleb rozmrożono i dokładnie wymieszano. Z tak przygotowanych próbek pobrano po 15 g gleby i mieszano w stosunku objętościowym 1 : 1 ze środkiem osuszającym-dyspergującym w postaci granulowanej ziemi okrzemkowej (Dionex ASE Prep DE P/N 062819).

Do ekstrakcji analitu z matrycy próbki wykorzystano metodę przyspieszonej ekstrakcji rozpuszczalnikiem. Tę procedurę wykonano w aparacie Dionex 350 AS (Dionex, CA, USA) w cyklu z dwukrotną ekstrakcją metanolem w temperaturze 45°C , przy ciśnieniu 0,2 MPa. W efekcie uzyskano 33 ml klarownego, oczyszczonego przesączu. Taki ekstrakt odparowano na próżniowej wparce rotacyjnej (temperatura 28°C , 90 rpm), a suchą pozostałość rozpuszczono w 2 ml metanolu. Pozostałości terbutylazyny analizowano metodą chromatografii cieczowej HPLC z detektorem UV-VIS (pompa LC-10 AD *VP*, piec CTO-10AS *VP*, detektor SPD-10 A *VP*) w aparacie Shimadzu. Rozdział składników przeprowadzono na kolumnie LUNA Phenyl-Hexyl ($250 \times 4,6 \text{ mm}$, C8 – 5 μm), jako fazę

ruchomą zastosowano mieszaninę o składzie: acetonitryl (50%), H₂O (40%) i metanol (10%). Analiza przebiegała w izokratycznym układzie faz przy stałym przepływie równym 0,6 ml/min, długości fali 230 nm, a poszukiwana substancja została oznaczona przy czasie retencji wynoszącym 18,5 min. Metoda analityczna została zwalidowana zgodnie z wytycznymi DG SANTE, a średni odzysk z próbek wzbożonych wyniósł 91,6%, precyzja 6,2%. Dolna granica oznaczalności terbutylazyny została wyznaczona na poziomie 0,001 mg/kg.

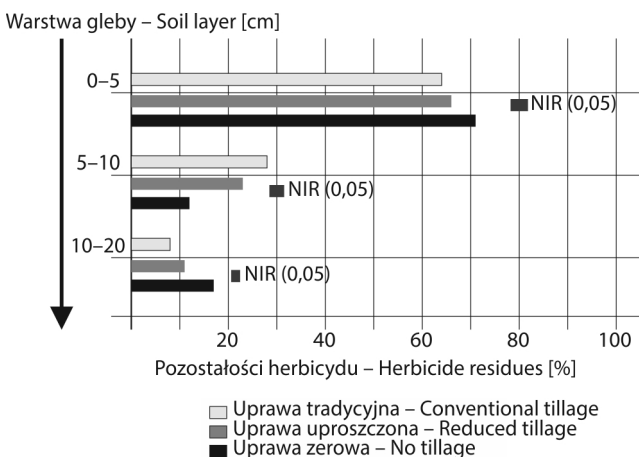
Analiza statystyczna / Statistical analysis

Doświadczenia założono metodą losowanych bloków w czterech powtórzeniach. Obliczenia statystyczne wykonano w programie Statgraphics Centurion. W statystycznym opracowaniu wyników dla części dotyczącej przemieszczania herbicydu w glebie zastosowano metodę analizy wariancji dla doświadczeń w układzie losowanych bloków. Istot-



Rys. 1. Krzywe rozkładu terbutylazyny

Fig. 1. Terbutylazine degradation curves



Rys. 2. Pozostałości terbutylazyny w profilu glebowym

Fig. 2. Terbutylazine residues in soil profile

ność różnic testowano wykorzystując półprzedział ufności Tukeya, a najmniejszą istotną różnicę (NIR) podano dla poziomu ufności wynoszącego 0,05. Dla części związanej z dynamiką rozkładu herbicydu obliczono wartości odchyłeń standardowych. Wyniki wszystkich analiz statystycznych przedstawiono graficznie na wykresach wynikowych (rys. 1, 2).

Wyniki i dyskusja / Results and discussion

Dynamika rozkładu w glebie /

Dynamics of decomposition in soil

Bazując na wartościach średnich zawartości terbutylazyny w próbkach gleby pobranych w ustalonych odstępach czasu wykreślono zależność stężenia substancji czynnej od czasu (dynamika rozkładu w glebie). Stężenie początkowe terbutylazyny (oznaczone 1 h po aplikacji herbicydu) we wszystkich badanych wariantach uprawy wynosiło $0,176 \pm 0,0079$ mg/kg. Dokładny przebieg rozkładu herbicydu w glebie przedstawiono na rysunku 1. Wykorzystując dane wynikowe wybrano również model–równanie matematyczne opisujące przebieg rozkładu herbicydu. Najlepsze dopasowanie uzyskano stosując zależność logarymiczną, tzw. równanie reakcji pierwszego rzędu (współczynnik korelacji $R^2 \geq 0,99$). Równanie o wzorze $C_t = C_0 * e^{-kt}$, gdzie: C_t – oznacza stężenie herbicydu po czasie t , C_0 – stężenie początkowe, a k jest stałą szybkości, pozwoliło na wyliczenie czasu połowicznego rozkładu (DT_{50}). Wartości DT_{50} wyznaczono również graficznie przez interpolację wartości między kolejnymi pomiarami pozostałości (tab. 2). Analizując przebieg krzywych rozkładu można stwierdzić, że rodzaj uprawy wpływał na szybkości rozkładu. Najwolniej terbutylazyna rozkładała się w próbkach gleby pobranych z części pola, gdzie nie stosowano żadnych zabiegów uprawowych (UZ). Różnice w szybkości były widoczne od pierwszych dni prowadzenia doświadczenia. Czas rozkładu (DT_{50}) dla uprawy zerowej wyniósł około 34 dni (niezależnie od metody jego wyznaczenia). Dla pozostałych rodzajów upraw wskaźnik ten był niższy (tab. 2). Różnice w szybkości rozkładu utrzymywały się do końca prowadzenia badań. W 64. dniu od aplikacji herbicydu stężenie nierozłożonej terbutylazyny kształtowało się na poziomie 22–37% wartości początkowej.

Bazując na uzyskanych wynikach należy stwierdzić, że terbutylazyna należy do substancji o średniej trwałości w glebie. Potwierdzają to również badania innych autorów (James i wsp. 1998; Schuhmann i wsp. 2019), wyznaczony DT_{50} w warunkach prowadzonych doświadczeń wynosił odpowiednio 23–37 i 17–25 dni. Oba zespoły potwierdziły również dobre dopasowanie wyników do równania reakcji pierwszego rzędu ($R^2 = 0,90–0,97$). Wpływ ograniczeń w uprawie na tempo rozkładu herbicydów opisują także inni autorzy. Locke i wsp. (2005) oraz Ulbrich i wsp. (2005)

Tabela 2. Krzywe rozkładu terbutylazyny i wartości DT_{50}
Table 2. Terbutylazine degradation curves and values of DT_{50}

Uprawa Tillage	Równania krzywych rozkładu (dla wartości średnich) Equation of degradation curve (for average values)	DT_{50} [dni – days]	
		wyznaczone graficznie graphically determined	wyliczone z równań calculated from equation
UT – CT	$C_t = 0,162 * e^{-0,0234 * t}$, $R^2 = 0,9905$	26,9	29,6
UU – RT	$C_t = 0,170 * e^{-0,0221 * t}$, $R^2 = 0,9969$	30,8	31,4
UZ – NT	$C_t = 0,173 * e^{-0,0205 * t}$, $R^2 = 0,9972$	34,4	33,8

UT – uprawa tradycyjna, CT – conventional tillage, UU – uprawa uproszczona, RT – reduced tillage, UZ – uprawa zerowa, NT – no tillage
 C_t – stężenie terbutylazyny po czasie t – terbutylazine concentration at time t , R^2 – współczynnik korelacji – correlation coefficient

potwierdzają zależności uzyskane w badaniach, czyli spowolnienie rozkładu w uprawie zerowej w porównaniu do uprawy tradycyjnej i uproszczonej.

Przemieszczanie w profilu glebowym / Movement in the soil profile

Rozpatrując wpływ rodzaju uprawy na przemieszczanie terbutylazyny w glebie należy stwierdzić, że uzyskane wyniki nie pozwalają na jednoznaczną ocenę. W warstwie 0–5 cm odnotowano największe zatrzymanie herbicydu w glebie z uprawą zerową (71% zastosowanej dawki). Przy uprawie uproszczonej i tradycyjnej było to odpowiednio 66–64% (rys. 2). Jednak w przypadku części herbicydu, która przemieściła się poniżej tej warstwy gleby można zauważyć tendencję odwrotną. Terbutylazyna była mobilniejsza w przypadku uprawy uproszczonej, a szczególnie w przypadku uprawy zerowej. W najniższej, badanej warstwie gleby (10–20 cm) wykryto aż 17% zaaplikowanego herbicydu (uprawa zerowa) i 8% dla uprawy tradycyjnej. Taki wynik badań nie jest jednak odosobniony. Inni autorzy udowadniają, że nieprzeorane w uprawie uproszczonej, a szczególnie zerowej resztki poźniwne czy mulcz powodują wzrost zawartości materii organicznej na powierzchni gleby i jej stopniowy spadek wraz z głębokością. To z kolei prowadzi do wzrostu retencji pestycydów w wierzchniej warstwie gleby. Z drugiej strony system uprawy zerowej poprawia łączność makroporów, co zwiększa wypłukiwanie pestycydów wraz z opadami (Ma i Selim 2005; Kasteel i wsp. 2007; Alletto

i wsp. 2010). Pomimo zróżnicowania wyników badań, większość autorów udowadnia, że uprawa zerowa przyczynia się do zwiększenia mobilności herbicydów w glebie (Düring i wsp. 2002; Domaradzki i Sekutowski 2006; Weber i wsp. 2006; Scherner i wsp. 2018).

Złożoność i wzajemne oddziaływanie procesów fizykochemicznych towarzyszących rozkładowi i mobilności herbicydów w różnych systemach uprawy prowadzi do wniosku, wyrażanego przez wielu autorów, że znacznie bardziej niż rodzaj uprawy na te zjawiska mają wpływ właściwości gleby, obecność mikroorganizmów, warunki pogodowe oraz rodzaj substancji czynnej, formuła preparatu i dodatek różnego rodzaju substancji wspomagających (Alletto i wsp. 2010; Fernández-Pérez i wsp. 2011; Wujek i wsp. 2016; Kucharski 2020; Ronka i Kucharski 2020).

Wnioski / Conclusions

System uprawy roli jest jednym z czynników wpływających na zachowanie się herbicydów w glebie. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że terbutylazyna należy do substancji o średniej trwałości w glebie. Jej czas połowicznego rozkładu w warunkach prowadzenia doświadczenia wyniósł 27–34 dni. Substancja ta wykazuje najwolniejszy rozkład w glebie z zerowym systemem uprawy. Z drugiej strony brak naruszania struktury gleby wpływa korzystnie na mobilność herbicydu, umożliwiając jego szybsze wymywanie z powierzchniowej warstwy gleby i przemieszczanie poza strefę korzeniową roślin.

Literatura / References

- Ali S., Shah G.A., Tahir M.N., Mehmood S., Gulzar A., Ahmad I., Khan B.A. 2017. Effect of different fallow tillage systems integrated with glyphosate herbicide on soil moisture dynamics and wheat grain yield. *Pakistan Journal of Agricultural Research* 30 (4): 386–398. DOI: 10.17582/journal.pjar/2017/30.4.386.398
- Alletto L., Coquet Y., Benoit P., Heddadj D., Barriuso E. 2010. Tillage management effects on pesticide fate in soils. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 30: 367–400. DOI: 10.1051/agro/2009018
- Andruszczak S., Kraska P., Kwiecińska-Poppe E., Pałus E. 2014. The effect of tillage system and herbicide application on weed infestation of crops of winter spelt wheat (*Triticum aestivum* ssp. *spelta* L.) cultivars. *Acta Agrobotanica* 66 (4): 173–184. DOI: 10.5586/aa.2013.064

- Domaradzki K., Sekutowski T. 2006. Wpływ technologii uprawy na dynamikę rozkładu i przemieszczanie w profilu glebowym herbicydów z grupy inhibitorów syntezy ALS. [Influence of tillage technology on degradation rate and translocation of ALS inhibitor herbicides in soil profile]. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych* 508: 41–46.
- Düring R.-A., Hoß T., Gäth S. 2002. Depth distribution and bioavailability of pollutants in long-term differently tilled soils. *Soil and Tillage Research* 66 (2): 183–195. DOI: 10.1016/S0167-1987(02)00026-0
- Fernández-Pérez M., Garrido-Herrera F.J., González-Pradas E. 2011. Alginate and lignin-based formulations to control pesticides leaching in a calcareous soil. *Journal of Hazardous Materials* 190 (1–3): 794–801. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2011.03.118
- Gołębiowska H., Płaskowska E., Weber R., Kieloch R. 2016. The effect of soil tillage and herbicide treatments on the incidence of *Fusarium* fungi genus in the grain of rye. *Plant, Soil and Environment* 62 (10): 435–440. DOI: 10.17221/647/2015-PSE
- James T.K., Rahman A., Holland P.T., McNaughton D.E., Heiermann M. 1998. Degradation and movement of terbutylazine in soil. *Proceedings of the 51. New Zealand Plant Protection Conference* 51: 157–161. DOI: 10.30843/nzpp.1998.51.11679
- Jiva E.K., Daniva E., Kolo M.G.M. 2019. Effects of tillage system and weed control method on weed infestation and yield of lowland rice (*Oryza sativa* L.). *East African Agricultural and Forestry Journal* 83 (1): 60–68. DOI: 10.1080/00128325.2018.1519293
- Kabir Z. 2005. Tillage or no-tillage: Impact on mycorrhizae. *Canadian Journal of Plant Science* 85 (1): 23–29. DOI: 10.4141/P03-160
- Kasteel R., Garnier P., Vachier P., Coquet Y. 2007. Dye tracer infiltration in the plough layer after straw incorporation. *Geoderma* 137 (3–4): 360–369. DOI: 10.1016/j.geoderma.2006.08.033
- Kucharski M. 2020. Nowa generacja wieloskładnikowych adiuwantów doglebowych w ochronie roślin. Badania polowe i laboratoryjne. [New generation of multicomponent soil adjuvants for plant protection. Field and laboratory tests]. *Przemysł Chemiczny* 99 (4): 577–580. DOI: 10.15199/62.2020.4.12
- Lavorenti A., Rocha A.A., Prata F., Regitano J.B., Tornisielo V.L., Pinto O.B. 2003. Reactions of diclosulam in a rhodic hapludox soil under no-till and conventional tillage systems. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo* 27 (1): 183–190. DOI: 10.1590/S0100-06832003000100019
- Liu Z., Cao S., Sun Z., Wang H., Qu S., Lei N., He J., Dong Q. 2021. Tillage effects on soil properties and crop yield after land reclamation. *Scientific Reports* 11: 4611. DOI: 10.1038/s41598-021-84191-z
- Locke M.A., Zablotowicz R.M., Bauer P.J., Steinriede R.W., Gaston L.A. 2005. Conservation cotton production in the southern United States: herbicide dissipation in soil and cover crops. *Weed Science* 53 (5): 717–727. DOI: 10.1614/WS-04-174R1
- Ma L.W., Selim H.M. 2005. Predicting pesticide transport in mulch amended soils: a two-compartment model. *Soil Science Society of America Journal* 69: 318–327.
- Morhart C., Sheppard J., Seidl F., Spiecker H. 2013. Influence of different tillage systems and weed treatments in the establishment year on the final biomass production of short rotation coppice poplar. *Forests* 4 (4): 849–867. DOI: 10.3390/f4040849
- Ronka S., Kucharski M. 2020. Application of novel polymeric, highly specific adsorbent for the removal of terbutylazine from complex environmental samples. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry* 102 (16): 3880–3893. DOI: 10.1080/03067319.2020.1776862
- Scherner A., Schreiber F., Fomsgaard I.S., Melander B., Luis A., Avila L.A., Kudsk P. 2018. Effect of tillage systems on the dissipation of prosulfocarb herbicide. *Weed Technology* 32 (2): 195–204. DOI: 10.1017/wet.2017.103
- Schuhmann A., Klammler G., Weiss S., Gans O., Fank J., Haberhauer G., Gerzabek M.H. 2019. Degradation and leaching of bentazone, terbutylazine and S-metolachlor and some of their metabolites: A long-term lysimeter experiment. *Plant, Soil and Environment* 65 (5): 273–281. DOI: 10.17221/803/2018-PSE
- Sekutowski T. 2007. Wpływ technologii uprawy i ochrony herbicydowej na wysokość plonu pszenicy ozimej uprawianej w monokulturze. [Effect of tillage systems and weed control on the yield of winter wheat cultivated in monoculture]. *Inżynieria Rolnicza* 3 (91): 159–166.
- Sekutowski T., Domaradzki K. 2009. Bioróżnorodność gatunkowa chwastów w monokulturze pszenicy ozimej w warunkach stosowania uproszczeń w uprawie roli. [Biodiversity of weed species in winter wheat monoculture caused by reduced of tillage]. *Fragmenta Agronomica* 26 (4): 160–169.
- Sekutowski T., Rola H. 2010. Wpływ monokultury i systemu uprawy roli oraz ochrony herbicydowej na agrofitycenozę kukurydzy. [Determination of monoculture, tillage system and herbicide application on maize agrophytocenosis]. *Fragmenta Agronomica* 27 (1): 128–140.
- Sekutowski T., Smagacz J. 2014. Share of anthropophytes in the crop sequence: winter wheat – maize – spring wheat depending on tillage system. *Acta Agrobotanica* 67 (2): 117–122. DOI: 10.5586/aa.2014.016
- Ulbrich A.V., Souza J.R.P., Shaner D. 2005. Persistence and carryover effect of imazapic and imazapyr in Brazilian cropping systems. *Weed Technology* 19 (4): 986–991. DOI: 10.1614/WT-04-208R2.1
- Weber J.B., Taylor K.A., Wilkerson G.G. 2006. Soil cover and tillage influenced metolachlor mobility and dissipation in field lysimeters. *Agronomy Journal* 98 (1): 19–25. DOI: 10.2134/agronj2004.0222
- Wesołowska S., Daniłkiewicz D., Gawęda D., Haliniarz M., Rusecki H., Łukasz J. 2022. The effect of tillage systems and weed control methods on the yield and quality of spelt grain (*Triticum aestivum* ssp. *spelta* L.). *Agriculture* 12 (9): 1390. DOI: 10.3390/agriculture12091390
- Wujek B., Kalitowska O., Kucharski M. 2016. Wpływ formy użytkowej na rozkład i mobilność herbicydu w glebie. [Effect of formulation on degradation rate and mobility of a herbicide in soil]. *Przemysł Chemiczny* 95 (9): 1709–1711. DOI: 10.15199/62.2016.9.10