



UNIWERSYTET ROLNICZY
im. Hugona Kołłątaja w Krakowie



**WYDZIAŁ ROLNICZO-
EKONOMICZNY**

mgr inż. Angelika Kliszc

Autoreferat rozprawy doktorskiej

**Skuteczność regeneracji stanowisk w uprawie pszenżyta jarego
z wykorzystaniem międzyplonu**

Praca wykonana pod kierunkiem

dr hab. inż. Joanny Puła, prof. URK

w Katedrze Agroekologii i Produkcji Roślinnej

Wydział Rolniczo-Ekonomiczny

Uniwersytet Rolniczy im. Hugona Kołłątaja w Krakowie

Promotor pomocniczy

dr inż. Aneta Perzanowska

Katedra Agronomii

Wydział Rolnictwa i Ekologii

Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

Kraków 2023

Spis treści

1.		
1.	Streszczenie	3
2.	Summary.....	5
3.	Publikacje stanowiące rozprawę doktorską	7
4.	Wprowadzenie.....	10
5.	Hipotezy badawcze i cel pracy.....	19
6.	Materiał i metody	21
	6.1 DOŚWIADCZENIA POLOWE.....	21
	6.1.1 Doświadczenie w SD KAiPR w Krakowie-Mydlnikach.....	21
	6.1.2 Doświadczenie w Górskiej Stacji Doświadczalnej KAiPR w Czyrnej k. Krynicy-Zdrój	22
	6.2 DOŚWIADCZENIA LABORATORYJNE	23
	6.2.1 Analiza oddziaływania ekstraktów z facelii błękitnej na wzrost i rozwój siewek pszenżyta jarego	23
	6.2.2 Analiza preferencji pokarmowych dżdżownic <i>L. terrestris</i> L. w odniesieniu do trzech roślin międzyplonowych	23
	6.3 ANALIZY STATYSTYCZNE	24
7.	Streszczenia załączonych publikacji.....	25
	7.1 Publikacja 1	25
	7.2 Publikacja 2	28
	7.3 Publikacja 3	30
	7.4 Publikacja 4	33
8.	Wnioski	35
9.	Pozycje literatury cytowane w autoreferacie.....	37
10.	Dorobek naukowy.....	42
11.	Publikacje wchodzące w skład rozprawy doktorskiej i oświadczenia autorów	50

1. Streszczenie

Skuteczność regeneracji stanowisk pod uprawą pszenżyta jarego z wykorzystaniem międzyplonu

Regeneracja stanowisk w płużnej uprawie roślin i na polach w terenach urzeźbionych jest możliwa w oparciu o: 1) wprowadzanie gatunków roślin międzyplonowych do zmianowania, 2) akcelerację organizmów pożytecznych towarzyszących uprawom (m.in. skąposzczetów glebowych, mikroorganizmów), a także, 3) eliminację organizmów szkodliwych (szkodników roślin, chorobotwórczych mikroorganizmów oraz chwastów).

Celem ogólnym pracy była ocena regenerującej roli komponentów agroekosystemu rośliny zbożowej - międzyplonów ścierniskowych: gorczycy białej (*Sinapis alba* L. odm. Borowska), gryki zwyczajnej (*Fagopyrum esculentum* Moench., odm. Kora), facelii błękitnej (*Phacelia tanacetipholia* Benth., odm. Stala) oraz dżdżownic w różnych systemach i warunkach prowadzenia uprawy.

Pierwszym celem szczegółowym była próba opisanie mechanizmu agroekologicznego regenerującego stanowisko w uprawie rośliny zbożowej – pszenżyta jarego (*xTriticosecale* ex. Wittmax., odm. Mamut) na glebie lekkiej z udziałem roślin międzyplonowych i dżdżownic. Z badań polowych wynika, że najwięcej osobników dojrzałych odłowiono na stanowisku z gryką zwyczajną – 42%. Także osobniki juwenilne zasiedlały najczęściej ryzosferę *F. esculentum* (w 47.2%), co było z kolei efektem zdeponowania tam w trakcie wegetacji pszenżyta jarego kokonów. Realizację drugiego celu szczegółowego osiągnięto poprzez laboratoryjną ocenę powinowactwa troficznego. Dżdżownice *L. terrestris* L. karmiono substratem zawierającym biomasę nadziemnych części roślin międzyplonowych testowanych w doświadczeniu polowym. Zaproponowano nowy wskaźnik dynamiki dekompozycji pokarmu (F24/AWE), który wyraża siłę i wkład populacji dżdżownic w proces przerabiania roślinnej materii organicznej. Z badań wynika, że dżdżownice najchętniej wybierały dwa (*S. alba* oraz *F. esculentum*) spośród czterech testowanych gatunków roślin. Najniższy wskaźnik dekompozycji F24/AWE zanotowano na obiektach z obecnością *xTriticosecale* (0.07), a największy dla *S. alba* (0.27) i *F. esculentum* (0.24).

Trzeci szczegółowy cel badań odnosił się do wpływu naturalnych komponentów (dżdżownice, chwasty) towarzyszących uprawom prowadzonym na stokach i ich wpływu na regenerację stanowiska glebowego. Stwierdzono, że populacja dżdżownic w obrębie

upraw ekologicznych była większa średnio o 12.43%, w porównaniu z obiektami prowadzonymi w systemie konwencjonalnym. Również chwasty w ekologicznych uprawach roślin wykazały większą liczebność (średnio o 121%). Występowała tam także zwiększona infiltracja (o 13.6%) i mniejszy spływ powierzchniowy (średnio o 6.47%) co pokazuje, że w systemie rolnictwa ekologicznego naturalne komponenty agroekosystemu osłabiają działanie procesów erozyjnych występujących na stokach.

Czwarty cel szczegółowy podjętych badań koncentrował się wokół określenia potencjału allelopatycznego różnych części *P. tanacetifolia* pod kątem ich wpływu na początkowy wzrost i rozwój roślin pszenżyta jarego. Wyciągi wodne z liści i kwiatów wykazały istotnie mocniejszy efekt inhibicyjny względem kiełkujących ziarniaków pszenżyta jarego (blisko 12.50% skiełkowanych roślin po siedmiu dniach). Najśłabszy efekt inhibicyjny względem długości poszczególnych części siewek pszenżyta został udowodniony dla ekstraktów wodnych z korzeni rośliny międzyplonowej. Udowodniono także stymulujący wpływ wyciągów wodnych z korzenia (niezależnie od stężenia) na długość pochewki liściowej pszenżyta jarego (o 16.67% w stosunku do kontroli).

Podjęte badania wskazują kierunek zmian zachodzących w podziemnej części agroekosystemów, szczególnie w uprawie pszenżyta jarego i roślin na terenach urzeźbionych. Dalsze badanie zależności ekologicznych i allelopatycznych w sieci powiązań pomiędzy organizmami glebowymi a roślinami, zwłaszcza preferencji pokarmowych dżdżownic względem mikroorganizmów i gatunków roślin, dają szansę bardziej szczegółowego poznania wewnętrznych mechanizmów regenerujących agroekosystem.

Słowa kluczowe: preferencje i aktywność troficzna dżdżownic, ryzosfera *Fagopyrum esculentum* Moench, populacje organizmów towarzyszących uprawom, potencjał allelopatyczny *Phacelia tanacetifolia* Benth., erozja wodna, agroekologiczne mechanizmy regeneracji stanowisk

2. Summary

Efficiency of regeneration of sites under cultivation of spring triticale with the use of stubble crop

Regeneration of plowed agricultural stands with cereal plants sown after itself, as well as sloping farmlands agriculture, is based on the following treatments: 1) introduction of catch crop species in crop rotation, 2) acceleration of accompanying beneficial organisms crops (e.g. soil oligochaetes, microorganisms), and 3) elimination of harmful organisms (pests, pathogenic microorganisms and weeds).

The general objective of the study was to assess the regenerative role of the agroecosystem's components - stubble crops: white mustard (*Sinapis alba* L. cv. Borowska), common buckwheat (*Fagopyrum esculentum* Moench, cv. Kora), lacy phacelia (*Phacelia tanacetifolia* Benth., cv. Stala), as well as earthworms and weeds of a cereal plant in various cultivation systems and soil conditions.

The first specific objective was an attempt to describe the agroecological mechanism regenerating the site in the cultivation of a cereal plant - spring triticale (*xTriticosecale* ex. Wittmax., cv. Mamut) on light soil with the participation of stubble crops and earthworms. The field research shows that the largest number of mature individuals were caught in the site with common buckwheat, i.e. 42.0%. Juvenile individuals also inhabited the rhizosphere of *F. esculentum* most often (47.2%), which in turn was the result of depositing cocoons there during the vegetation of spring triticale. The implementation of the second specific objective was achieved through laboratory assessment of the trophic affinity. *L. terrestris* L. earthworms were fed with a substrate containing biomass of above-ground parts of catch crops tested in the field experiment. A new indicator of food decomposition dynamics (F24/AWE) was proposed, which expresses the strength and contribution of the earthworm population to the process of processing plant organic matter. The research shows that earthworms preferred two (mustard and buckwheat) of the four tested plant species. The lowest F24/AWE decomposition rate was recorded on objects with the presence of triticale (0.07), and the highest for mustard (0.27) and buckwheat (0.24).

The third specific objective of the research concerned the impact of natural components accompanying crops (earthworms, weeds) on slopes and their impact on the regeneration of the soil. It was found that the population of earthworms within organic

farming was higher by 12.43% on average compared to conventional system. Weeds in organic crops also showed a higher abundance (by av. 121%). There was also an increased infiltration (by 13.6%) and surface runoff (by av. 6.47%) in the organic farming system, which shows that the natural components of the agroecosystem weaken the effect of erosion processes occurring on the slopes.

The fourth specific objective focused on determining the allelopathic potential of various parts of *P. tanacetifolia* in terms of their effect on the initial growth and development of spring triticale. Water extracts from leaves and flowers showed a significantly stronger inhibitory effect on germinating triticale plants (on average nearly 12.50% of sprouted plants after seven days). The weakest inhibitory effect in relation to the length of individual parts of triticale seedlings was proved for water extracts from the roots of the stubble crop. The stimulating effect of water extracts from the root (irrespective of the concentration) on the length of the leaf sheath of spring triticale was also proven (by 16.67% compared to the control).

The undertaken research indicates the direction of changes taking place in the underground part of agroecosystems, especially in the cultivation of spring triticale and plants in sloping areas. Further study of the ecological and allelopathic relationships in the network of connections between soil organisms and plants, especially the food preferences of earthworms for microorganisms and plant species, provide an opportunity to learn more about the internal mechanisms that regenerate the agroecosystem.

Key words: preferences and trophic activity of earthworms, rhizosphere of *Fagopyrum esculentum* Moench, populations of organisms accompanying crops, allelopathic potential of *Phacelia tanacetifolia* Benth., water erosion, agroecological mechanisms of soil regeneration

3. Publikacje stanowiące rozprawę doktorską

Publikacja 1. The change of pH value and *Octolasion cyaneum* Savigny earthworms' activity under stubble crops after spring triticale continuous cultivation **MNiSW₂₀₂₂ – 20 pkt**

Kliszcz A., Puła J. (2020). The Change of pH Value and *Octolasion cyaneum* Savigny Earthworms' Activity under Stubble Crops after Spring Triticale Continuous Cultivation. *Soil Systems* 4(3): 39. <https://doi.org/10.3390/soilsystems4030039>

Publikacja 2. Assessment of earthworms activity based on eaten biomass from selected catch crops **MNiSW₂₀₂₂ – 20 pkt**

Kliszcz A., Puła J. (2019). Assessment of earthworms activity based on eaten biomass from selected catch crops. *Annales Universitatis Paedagogicae Cracoviensis Studia Naturae*, 4(1), 81–90. <https://doi.org/10.24917/25438832.4.4>

Publikacja 3. Effect of conventional and organic farming on crop yield and water erosion intensity on sloping farmland **MNiSW₂₀₂₂ – 70 pkt**

Klima K., Puła J., **Kliszcz A.** (2022). Effect of conventional and organic farming on crop yield and water erosion intensity on sloping farmland. *Agronomy Science*, 77(3), 41–52. <https://doi.org/10.24326/as.2022.3.3>

Publikacja 4. Wider use of honey plants in farming: Allelopathic potential of *Phacelia tanacetifolia* Benth. **MNiSW₂₀₂₂ – 100 pkt**

Kliszcz A., Puła J., Mozdzeń K., Tatoj A., Zandi P., Stachurska-Swakoń A., Barabasz-Krasny B. (2023). Wider Use of Honey Plants in Farming: Allelopathic Potential of *Phacelia tanacetifolia* Benth. *Sustainability* 15(4): 3061. <https://doi.org/10.3390/su15043061>

IF₂₀₂₁ – 3.889

Sumaryczny IF – 3.889

Sumaryczna punktacja MNiSW – 210 pkt

„... piękne to na co patrzą.”

Mdr 13, 7b

„Jak liczne są dzieła Twoje, Panie!
Ty wszystko mądrze uczyniłeś,
ziemia jest pełna Twych stworzeń.”

Ps 104, 24

Składam serdeczne podziękowania mojej Pani Promotor – dr hab. inż. Joannie Puła, prof. URK
za życzliwość i okazane wsparcie podczas trwania doktoratu
za cenne wskazówki i dobre intuicje oraz za czas poświęcony na wspólną pracę.

Moje podziękowanie kieruję także do Pani dr inż. Anety Perzanowskiej
dziękując za pomoc w analizach gleby, inspirujące rozmowy, poświęcony czas
i otwarte serce podczas każdego mojego pobytu na SGGW.

Dziękuję Panu Profesorowi dr hab. inż. Kazimierzowi Klimie
za współpracę nad tematami badawczymi realizowanymi w Górskiej Stacji Doświadczalnej URK
w Czyrnej k. Krynicy-Zdrój już od czasu mojej pracy magisterskiej.

Dziękuję także wszystkim Pracownikom Katedry Agroekologii i Produkcji Roślinnej,
Współpracownikom, Przyjaciołom - żyjącym i zmarłym -
oraz osobom, które spotkałam w tym czasie, bez Was ta droga byłaby o wiele trudniejsza. Dziękuję!

Z serca dziękuję również moim Bliskim, Tacie i Siostrze, których pomoc, wsparcie i uśmiech
towarzyszyły mi przez cały ten czas.

4. Wprowadzenie

Gospodarowanie zasobami naturalnymi, m.in. w celu zaspokojenia potrzeb społeczności ludzkiej, jak i poszanowanie piękna i harmonii świata stworzonego, poprzez rozsądne korzystanie z puli elementów ożywionych i nieożywionych, nakierowuje naukowców i każdego, kto korzysta z dóbr płynących z ekosystemów, by szukał rozwiązań gwarantujących bezpieczeństwo egzystencji i ciągłość korzystania z zasobów naturalnych. Każdy ekosystem, w tym agroekosystem, zawiera miliony interakcji pomiędzy żywymi komponentami a środowiskiem ich występowania. Biocenoza i biotop stanowią samoregulujący się system zależności trwający w czasie i w konkretnej przestrzeni, wypracowywany miliony lat przed pojawieniem się człowieka. W miarę postępu technologicznego i biologicznego w rolnictwie ta ingerencja dokonuje się w sposób coraz bardziej kompleksowy, m.in. opracowane zostały programy ochrony upraw (Platforma Sygnalizacji Agrofagów, 2023), wprowadza się do uprawy nowe odmiany i specjalistyczne narzędzia polowe oraz systemy wspomaganie decyzji, nakierowując obecne gospodarowanie agroekosystemami na tory rolnictwa precyzyjnego. Wskazane działania mają na celu podporządkowanie sobie wszystkich biotycznych i abiotycznych elementów agroekosystemów i zarządzania nimi w perspektywie zwykle krótkoterminowego działania. Z drugiej strony rolnictwo musi obecnie sprostać niełatwym wymagom konsumentów, którzy zgłaszają zapotrzebowanie na kilka bądź kilkanaście gatunków roślin. Ta sytuacja wymusza tym samym niezrównoważone sposoby gospodarowania zasobem niezwykle trudno odnawialnym, jakim jest gleba (Hillel, 2012). W wyniku tego, uprawy są często prowadzone jako monokultury bądź uproszczone płodozmiany, w których układ roślin jest dwu- lub trzygatunkowy, np. pszenica-kukurydza-kukurydza. Dodatkowo tą kwestię komplikuje deficyt nawozów naturalnych (takich jak obornik) i odejście od ich stosowania na korzyść nawozów mineralnych, które są substratem bardziej wystandaryzowanym i praktycznie bezpośrednio dostępnym. Należy jednak zaznaczyć, że w obecnej sytuacji geopolitycznej dalsza ciągłość ich aplikowania w dotychczasowych dawkach w produkcji polowej jest obarczona wysokim ryzykiem. W związku z tym poszukuje się sposobów osłabienia negatywnych skutków działań prowadzących do utraty bioróżnorodności i żyzności stanowisk. Podejmowane są badania mające na celu poznanie agroekologicznych mechanizmów wpływających na regenerację stanowisk, zwłaszcza mocno eksploatowanych lub oligotroficznych (Restovich i in., 2019),

a także intencyjne wzmocnianie ich w kolejnych sezonach wegetacyjnych, co rozumiane jest jako zarządzanie agroekosystemem w ujęciu ekologicznym (ang. *ecology-based field management, sustainable agroecosystem management*). Szczególną przestrzenią działania mechanizmów agroekologicznych w praktyce rolniczej pozostaje gospodarowanie w systemie rolnictwa ekologicznego, gdzie wszystkie zabiegi agrotechniczne zakorzenione są w ekologii – nauce o wzajemnych powiązaniach organizmów żywych między sobą i ze środowiskiem ich występowania (Friederichs, 1958; Haeckel, 1866).

W ten nurt wpisuje się regeneracja stanowisk w oparciu o poznanie procesów agroekologicznych zachodzących w glebie pod monokulturą roślin zbożowych, w tym pszenżyta jarego oraz zastosowanie poznanych zależności w kierunkowej regeneracji takich siedlisk. W praktyce rolniczej i w przeprowadzonych wieloletnich eksperymentach polowych obserwowany jest spadek plonu roślin zbożowych uprawianych w monokulturach (Ścigalska, 2001). W tej sytuacji pierwszym rekomendowanym od wielu lat sposobem agrotechnicznym mającym na celu zmniejszenie negatywnych skutków wynikających z monokultury jest uprawa międzyplonu (Andrzejewska, 1999; Kraska, 2011; Wojciechowski i Lehmann, 2013). Podobnie, regeneracja gleby pod uprawami realizowanymi na stokach (osłabianie erozji wodnej i wietrznej) zakłada uprawę roślin tak, by maksymalizować pokrycie powierzchni gleby przez rośliny (współczynnik LAI) w trakcie sezonu wegetacyjnego i w okresie zimowym oraz promować występowanie organizmów, które poprzez swoją aktywność życiową budują korytarze zwiększając infiltrację wody oraz osłabiają intensywność spływu powierzchniowego wzdłuż stoku (Gao i in., 2020; Klima i in., 2020, 2022).

Pierwszym z komponentów agroekologicznych wpływających na regenerację stanowisk glebowych w agroekosystemach, szczególnie wrażliwych na procesy degradacyjne, są rośliny. Stanowią one ważną grupę organizmów na polu uprawnym i nie pozostają obojętne względem innych organizmów kształtujących środowisko glebowe (Ganugi i in., 2021; Zhang i in., 2022; Zhou i in., 2017). Oddziałują na te organizmy poprzez dostarczanie biomasy i składników pokarmowych dla kolejnych ogniw łańcucha troficznego (Kliszcz i Puła, 2019; Milcu i in., 2008; Shahbaz i in., 2018). Są też donorami allelozwiązków, takich jak: glikozydy cyjanogenne (np. amigdalina), S- glikozydy (izotiocyjanian, synalbina), glikozydy flawonoidowe (rutyna, kwercetyna), kwas benzoesowy, ferulowy, kofeinowy oraz inne związki (w tym saponiny, taniny i terpeny), których akceptorami mogą być zarówno inne rośliny (koliny), jak i zwierzęta oraz mikroorganizmy (marazminy, fitoncydy) (Kliszcz i in. 2021). Również obecność

i liczebność populacji różnych gatunków roślin towarzyszących uprawom może w trudnych warunkach prowadzenia uprawy (tereny urzeźbione) wpłynąć pozytywnie na zmniejszenie intensywności procesów erozyjnych występujących na stoku.

Rośliny międzyplonowe charakteryzują się szybkim tempem wzrostu i rozwoju nadziemnych oraz podziemnych części, generując relatywnie duże ilości biomasy. Mogą mieć właściwości fitosanitarne względem rośliny następczej (Mielniczuk i in. 2020), a także wykazują pozytywne oddziaływanie korzeni na matrycę glebową, przyczyniając się do polepszenia struktury i innych właściwości fizykochemicznych (Hudek i in., 2022; Koudahe i in., 2022). W szczególności są ważnym elementem w zwiększaniu bioróżnorodności i liczebności pożytecznych organizmów glebowych zaliczanych do różnych domen (Patkowska i in., 2016; Thapa i in., 2021).

Testowane w trakcie badań polowych i laboratoryjnych gatunki roślin międzyplonowych (*Sinapis alba* L., *Fagopyrum esculentum* Moench. oraz *Phacelia tanacetifolia* Benth.) należą do różnych rodzin botanicznych i ich zastosowanie jako międzyplonów jest szeroko opisane w literaturze (Jian i in., 2020; Khan i in., 2021; Kwiatkowski i in., 2019; Zaniewicz-Bajkowska i in., 2013).

S. alba (gorczyca biała) jest gatunkiem z rodziny krzyżowych, wykazuje właściwości fitosanitarne względem roślin zbożowych (Sawicka i Kotiuk, 2007), ogranicza straty azotu z gleby (zawartość związków azotu w biomase wynosi średnio 3% w porównaniu do facelii błękitnej - 2,5% - Wilczewski i Skinder, 2008), posiada palowy system korzeniowy. Gatunek jest donorem S-glukozynolanów (sinalbina, sinirgina), które po hydrolizie katalizowanej mirozynazą tworzą izotiocyjanian allilu (CAS 57-06-7) (Vargas-Herniez i in., 2023), związek powszechnie wykorzystywany w odławianiu dżdżownic (Edwards i Arancon, 2022). *Sinapis alba* L. posiada właściwości allelopatyczne względem *Digitaria sanguinalis* i *Amaranthus palmeri* (Wang i in., 2015) oraz *Amaranthus blitoides* (Alcantara i in., 2011). Jest rośliną fitosanitarną względem buraka cukrowego gdyż ogranicza populację mątwika burakowego w glebie (Mostowska, 2020).

F. esculentum (gryka zwyczajna) należy do rodziny rdestowatych, z palowym systemem korzeniowym i silnie rozwiniętymi korzeniami II i III rzędu. Wydzieliny korzeniowe mogą rozpuszczać trudno rozpuszczalne związki fosforu (Lopez i in., 2021; Zhu i in., 2002). Biomasa tego gatunku zawiera relatywnie duże ilości kwasu ferulowego, a także rutyny (Dziadek i in., 2018). W literaturze można znaleźć informacje o szerokim przedziale zawartości związków

polifenolowych ogółem (1800-6300 mg GEA-100 g) w biomase gryki zwyczajnej (Dogra, 2010; Lieber i in., 2012).

P. tanacetifolia (facelia błękitna) zaliczana do rodziny ogórecznikowatych jest polecana do uprawy na stanowiska suche. Biomasa tej rośliny po przemarznieniu jest krucha, i przez to szybciej rozkładana przez mikroorganizmy, zasilając glebową materię organiczną (SOM-soil organic matter), zwłaszcza lekką frakcję POM (*particulate organic matter*). Wykazuje udokumentowany negatywny wpływ na początkowy wzrost i rozwój *Bromus secalinus* L., zarówno względem biotypów odpornych na herbicydy jak i wrażliwych (Pytlarz i Gala-Czekaj, 2022a). Kwiatkowski i in. (2019) wskazują na wyższe zawartości cynku w biomase tej rośliny.

Wszystkie wskazane rośliny międzyplonowe należą do grupy roślin strukturotwórczych oraz miododajnych. Ponadto rezultaty ostatnich badań wskazują na pozytywny wpływ mączki z nasion wspomnianych wyżej gatunków na ograniczenie kiełkowania biotypów chwastów odpornych na herbicydy (Pużyńska i in., 2019; Pytlarz i Gala-Czekaj, 2022a, 2022b). W kontekście oddziaływań allelopatycznych potencjalnie występujących między rośliną międzyplonową a uprawianym gatunkiem zboża jarego – pszenżytem, podjęto także próbę scharakteryzowania pierwotnych relacji oraz reakcji jakie w początkowych fazach wzrostu i rozwoju rośliny akceptora (zboża) powoduje wodny ekstrakt z różnych części rośliny międzyplonowej. Do badań wybrano *P. tanacetifolia*. Przeprowadzone badania laboratoryjne nad dynamiką kiełkowania ziarniaków pszenżyta w obecności wodnych wyciągów są pierwszymi badaniami w literaturze przedmiotu, koncentrującymi się na oddziaływaniu facelii błękitnej na wczesne fazy wzrostu i rozwoju pszenżyta jarego.

Oprócz wymienionych cech gatunków roślin międzyplonowych, w dalszym ciągu obszarem nie rozpoznany pozostawało ich oddziaływanie na organizmy pożyteczne towarzyszące uprawom w podziemnej części agroekosystemu, w tym na dżdżownice. W literaturze nie znaleziono badań, które by testowały powinowactwo troficzne (preferencje pokarmowe) dżdżownic w stosunku do konkretnego gatunku rośliny uprawnej. Dlatego postawiono hipotezy badawcze odnoszące się do proponowanego mechanizmu agroekologicznego, w którym konkretny gatunek rośliny międzyplonowej jest preferowany przez populacje gatunków dżdżownic z grupy ekologicznej *anecic* i *endogeic*. W toku badań polowych w trakcie przygotowywania doktoratu, stwierdzono występowanie dżdżownic na stanowisku poddawanych regeneracji w uprawie pszenżyta jarego po sobie, jednak

z niejednakowym rozkładem liczebności populacji względem trzech testowanych gatunków roślin międzyplonowych (*S. alba*, *F. esculentum*, *P. tanacetifolia*).

Drugim komponentem agroekologicznym wpływającym na ekosystem rolniczy, zwłaszcza jego glebową część, są dżdżownice. To zwierzęta glebowe należące do gromady siodełkowców (Clitellata) i podgromady skąposzczetów (Oligochaeta) z rodziny Lumbricidae, stanowią większość biomasy zwierząt bezkręgowych bytujących w środowisku glebowym (Edwards i Arancon, 2022). Powszechnie zasiedlają gleby użytkowane rolniczo, jak również pozostałe tereny, w tym siedliska semi-naturalne oraz przekształcone antropogenicznie, np. rekultywowane. Liczebność populacji dżdżownic w zależności od siedliska sięga 2 000 osobników·m⁻² i zależy przede wszystkim od wilgotności, co związane jest z pobieraniem przez organizm dżdżownicy tlenu rozpuszczonego w śluzie okrywającym naskórek (Edwards i Arancon, 2022). Na użytkach zielonych – pastwiskach, ich biomasa w glebie jest szacowana na 10-krotność masy zwierząt wypasanych na stanowisku (Edwards, 2004). Dżdżownice są zwierzętami o wydłużonym, obłym ciele i budowie metamerycznej (podzielonej na segmenty), składającym się z części przedniej z głową, zwojem nerwowym i systemem pięciu większych naczyń krwionośnych. W tej części znajduje się także otwór gębowy, umięśniona gardziel, przełyk i żołądek o dwojakiej budowie: wola, gdzie pokarm jest magazynowany oraz umięśniona część, gdzie pokarm jest miażdżony. Część środkowa, w której znajduje się siodełko (organ odpowiedzialny za rozmnażanie i formowanie kokonów) oraz wydłużona część tylna, gdzie jest główna część jelita, w której formowane są koprolity (odchody dżdżownic). Rodzina Lumbricidae obejmuje 599 gatunków (DrilloBase, 2023a), z czego 19 jest powszechnie spotykanymi w Europie (Edwards i Arancon, 2022). W Polsce do tej pory stwierdzono obecność 46 gatunków dżdżownic (DrilloBase, 2023b). W związku z rozwojem technik molekularnych (użycie markerów molekularnych COI, 16S, 28S, ND1 i 12S) liczba ta w obrębie Lumbricidae ciągle się zmienia. Gatunki powszechnie występujące w obrębie Holoarktyki tworzą najliczniejsze zespoły wielogatunkowe i posiadają szereg reakcji przystosowawczych do niesprzyjających warunków siedliskowych, takich jak zapadanie w diapauzę w okresie suszy i przy spadku temperatury poniżej 0°C. Przykładowo, gatunek *Aporrectodea caliginosa* zapada w diapauzę w klimacie umiarkowanym, gdy wilgotność gleby spada poniżej 25% (Baltzer, 1956), a *Aporrectodea trapezoides* w klimacie podzwrotnikowym przy wilgotności poniżej 10% (Buckerfield, 1992). Osobniki gatunków w ramach rodzaju *Aporrectodea* uznawane są za powszechnie występujące w Biosferze, a konkretne populacje

mogą wykazywać cechy przystosowawcze do niskich poziomów wilgotności gleby w klimacie okresowo suchym, zwłaszcza w miesiącach suszy (Ljungstrom i Emiliani 1971; Ljungstrom i in., 1973). *A. caliginosa* jest także gatunkiem zaliczanym do kriofili i oligotrofów (Sheikh i in., 2022).

Dyskurs naukowy na temat tych organizmów glebowych rozpoczął się na szeroką skalę wraz z ostatnim opublikowanym dziełem naukowym Charlesa Darwina *The Formation of Vegetable Mould, through the Action of Worms, with Observations on Their Habits* (1881), w którym autor zawarł syntezę trwających od ponad 40 lat spostrzeżeń dotyczących zachowań, preferencji pokarmowych oraz roli dżdżownic w kształtowaniu środowiska glebowego. Od tamtej pory dżdżownice zaczęły być postrzegane jako organizmy pożyteczne towarzyszące uprawom. W 1977 roku Bouche zaproponował podział dżdżownic na siedem grup ekologicznych, z czego główne trzy (*epigeic*, *endogeic* oraz *anecic*) funkcjonują powszechnie w literaturze. Podział ten trwa do dzisiaj, jednak od 2020 roku dzięki pracy Bottinelli i in. (2021) został on gruntownie przepracowany przy pomocy narzędzi statystycznych (PCA, random forest models) co pozwoliło włączyć do oceny również inne zmienne, nie tylko cechy morfologiczne czy behawioryzm troficzny gatunków dżdżownic. Gatunki określane mianem *epigeic* są najmniejszych rozmiarów, mają purpurofioletowe zabarwienie nabłonka wra skórno-mięśniowego, a także charakteryzują się większą ruchliwością i szybszym metabolizmem. Ich pożywieniem jest ściółka zdeponowana na powierzchni gleby. Grupa *endogeic* to gatunki większych rozmiarów, dochodzące do 150 mm długości. Ich zabarwienie przechodzi w brunatne, szarobrunatne, niekiedy zielonkawoszarawe. Gatunki tej grupy stanowią jeden z najważniejszych elementów wpływających na poprawę struktury gleby, tworząc w warstwie ornej korytarze o nachyleniu horyzontalnym. Z kolei, gatunki należące do grupy *anecic* osiągają największe rozmiary (do 60 cm w przypadku jednego z najdłuższych gatunków europejskich – *Lumbricus badensis* Michaelsen 1907 (Kutschera i Elliott, 2010), budują korytarz przechodzący pionowo przez profil glebowy i rozgałęziający się dopiero u wyjścia przy powierzchni, skąd żywią się ściółką, którą ściągają z powierzchni gleby. Istotnie wpływają na infiltrację wody ze względu na rozmiar ciała (długość i średnica) oraz wielkość budowanego korytarza w glebie (Shipitalo i Korucu, 2017). Ich zdolność infiltracyjna szacowana jest na $282 \text{ mm} \cdot \text{godz}^{-1}$ (Bouché i Al-Addan, 1997) i najefektywniej zachodzi w bioporach o średnicy powyżej 6 mm (Capowiez i in., 2009; van Schaik i in., 2014).

Obecnie dżdżownice postrzegane są jako jeden z kluczowych komponentów agroekosystemów, aktywnie oddziałując na pozostałe jego elementy. Ich wkład ma charakter zarówno bezpośredni, jak i pośredni, i dotyczy udziału w cyklach biogeochemicznych zachodzących w glebie, a także w procesach infiltracji wody w profilu glebowym i dyspersji mikroorganizmów w ryzosferze roślin oraz tworzeniu skupisk komórek mikroorganizmów w matrycy glebowej (*hot-spots*) (Daane i in., 1997; Koutika i in., 2001; Medina-Sauza i in., 2019). Wraz z rozwojem nauki ich kluczowa rola zaczęła być coraz wyraźniej udowodniana. Obecnie wraz z intensyfikacją problemów związanych z zanieczyszczeniem środowiska organizmy te mogą służyć jako naturalne komponenty akumulujące w sobie nadmiar metali ciężkich (Seribekkyzy i in., 2022), PAH (*Polycyclic Aromatic Hydrocarbon*) (Thakur i in., 2023) i cząstek nanoplastiku (Lahive i in., 2022). Warto wspomnieć także o ostatnich badaniach (Zhou i Yao, 2020; Zhu i in., 2021), w których udowodniono spadek ilości mobilnych elementów genetycznych (MGE- *mobile genetic elements*) oraz genów odporności na antybiotyki w społeczności mikroorganizmów znajdującej się w jelitach i koprolitach różnych gatunków dżdżownic z trzech grup ekologicznych. Badania te dają wyraźny sygnał, że dżdżownice mogą pomóc w oczyszczaniu gleby, materiału pochodzenia antropogenicznego, jakim są osady ściekowe, poprzez eliminację mikroorganizmów mających w swoim materiale genetycznym geny odporności na substancje biologicznie czynne.

Mikroorganizmy glebowe razem z roślinami i fauną glebową odpowiadają za całość procesów metabolicznych zachodzących w glebie. Stanowią drugi obok dżdżownic kluczowy czynnik regenerujący bądź degradujący stanowisko w uprawie roślin zbożowych. Intensyfikacja tych procesów i funkcji ekosystemowych w agroekosystemach zachodzi głównie w sferze oddziaływania korzeni roślin i wydzielanych w ryzosferze metabolitów oraz wzdłuż korytarzy tworzonych przez dżdżownice, jak i w sferze aktywności życiowej innych reprezentantów mikro-, mezo- i makrofauny (drillosfera). Tym samym w ryzosferze i drillosferze tworzą się bakteryjne i grzybowe *hot-spoty*, które są aktywowane i kształtowane ilościowo i jakościowo przez aktywność życiową organizmów wyższych ewolucyjnie, np. bezkręgowców (Aira i in., 2009; Kuzyakov i in., 2000). Bioróżnorodność życia mikrobiologicznego w glebie jest ogromna. I choć tradycyjny podział mikroorganizmów glebowych rozróżnia bakterie, archeony i grzyby, to jednak mnogość ich możliwości metabolicznych (funkcji) w odniesieniu do substratu, na którym żerują jest już o wiele bardziej

zróżnicowana. I tak na przykład podstawowe funkcje ekosystemowe, świadczone przez licznie występujące mikroskopijnych rozmiarów organizmy w glebie dotyczą m.in.: proteolizy (*Bacillus*, *Clostridium*, *Proteus*, *Pseudomonas*), amonifikacji (*Bacillus subtilis*, *B. megatherium*, *Pseudomonas fluorescens*, *P. areuginosa*), nitryfikacji (*Nitrosomonas*, *Nitrosococcus*, *Nitrobacter*) i denitryfikacji związków azotu w glebie (*Bacillus licheniformis*, *Pseudomonas stutzeri*, *Thiobacillus denitrificans*) (Kwaśna, 2014). Mikroorganizmy wiążą także azot atmosferyczny na własne potrzeby, są to diazotrofy beztlenowe z rodzaju *Clostridium*, względnie beztlenowe z rodzajów *Arthrobacter*, *Pseudomonas*, *Aerobacter* i *Flavobacterium*, diazotrofy tlenowe *Azotobacter*, *Azomonas*, *Bacillus*, *Beijerinckia*, *Derxia*, *Achromobacter*, *Blautia* oraz *Cyanobacteria* (Łyszcz i Gałązka, 2016; Turk-Kubo i in., 2022; Kucharski i in., 2015). Mogą także pozostawać w symbiozie z rośliną – gospodarzem (bakterie brodawkowe *Rhizobium*, *Bradyrhizobium*, *Allorhizobium*, *Azorhizobium*, *Mesorhizobium*, *Sinorhizobium*). Przeprowadzają również procesy humifikacji związków próchnicznych i sekwestracji węgla w glebie (np. *Acinetobacter calcoaceticus* - Jurys i Feizienè, 2021), odpowiadają za metabolizm związków fosforu do formy przyswajalnej dla roślin (*Pseudomonas sp.*, *Alcaligenes sp.*, *Pantoea sp.*, *Brevibacterium sp.*, *Klebsiella sp.*, *Cellulomonas sp.*, *Acinetobacter sp.* - Ullah i in., 2023). Wydzielają związki sygnałowe pozytywnie wpływające na rośliny (jak np. kwas indolilo-3-octowy u *Enterobacter cloacae* - Mishra i in., 2022) i produkują antybiotyki (np. bakterie z rodzaju *Streptomyces*). Dżdżownice wpływają na wszystkie z wymienionych grup drobnoustrojów, jednak z różną intensywnością. Dominujące w koprolitach dżdżownic taksony bakteryjne są także tymi, które są zdolne do degradacji związków benzoesowych i aromatycznych (Furlong i in., 2002; Dallinger i Horn, 2014; Gopal i in., 2017). Natomiast w ścianach jelit ulokowane są endosymbionty bakteryjne produkujące N₂O, jak np.: *Dechloromonas denitrificans* sp. nov., *Flavobacterium denitrificans* sp. nov., *Paenibacillus anaericus* sp. nov. oraz *Paenibacillus terrae* strain MH72 (Horn i in., 2005).

Intensywna praktyka rolnicza ma swoje konsekwencje, zarówno pozytywne, jak i negatywne w funkcjonowaniu agroekosystemów oraz wpływa na ich funkcje i usługi odbierane powracającym strumieniem korzyści i strat z powrotem do gospodarki. Wykonywane zabiegi agrotechniczne koncentrują się ostatecznie na środowisku glebowym, nawet jeśli dotyczą nadziemnych części roślin poddawanych takim zabiegom. Substancje czynne środków ochrony roślin mogą być zmywane z nadziemnych części roślin i trafiać do gleby, a na terenach o większym nachyleniu stoku (9%) dodatkowo zachodzi

niebezpieczeństwo bogatego w biogeny i pozostałości pestycydów zmywu powierzchniowego, zanieczyszczającego cieki śródpolne w zlewni potoków i rzek górskich oraz związane z tym zaburzenia równowagi ekologicznej siedlisk oligotroficznych. Istnieje więc potrzeba wprowadzenia sposobów regeneracji, najlepiej w oparciu o zasób naturalny danego agroekosystemu, relacje i aktywność organizmów środowiska glebowego, by zapobiec konsekwencjom procesów degradacyjnych zachodzących w agroekosystemach. Rezultaty uzyskane w wyniku podjętych badań mogą być podstawą do przyczynowo-skutkowego spojrzenia na zabieg regeneracyjny w uprawie pszenżyta jarego po sobie, jakim jest wysiew międzyplonu ścierniskowego z gryki zwyczajnej, a także na uprawę roślin w systemie rolnictwa ekologicznego na terenach urzeźbionych. Wykonane badania wpisują się w działania zmierzające do wypracowania nowych, zrównoważonych praktyk opartych na agroekologii i poznaniu wzajemnych zależności organizmów żyjących w intensywnie zarządzanych agroekosystemach, bądź na terenach z naturalnymi ograniczeniami.

Wraz z rozwojem precyzyjnych narzędzi biologii molekularnej, takich jak sekwencjonowanie fragmentu 16S rDNA genomów bakteryjnych oraz ITS2 i ITS3 genomów grzybowych, dalsze badania nad mechanizmami agroekologicznymi skupiać się będą wokół zagadnień oceny liczebności populacji organizmów pożytecznych towarzyszących uprawom, a także ich wzajemnych relacji ekologicznych. Do tych komponentów regenerujących stanowisko należą dżdżownice oraz ich mikrobiologiczne symbionty, będące jednocześnie PGPM względem roślin uprawnych. Określając strukturę przynależności taksonomicznej danej społeczności mikroorganizmów glebowych można uzyskać także informacje o ich możliwych funkcjach udokumentowanych wcześniej w literaturze. Z drugiej strony, skład i liczebność populacji mikroorganizmów w koprolitach dżdżownic w drillosferze generalnie jest uwarunkowana przez rodzaj i jakość pokarmu oraz czynniki ekologiczne panujące w biotopie. Zatem, dalsze szczegółowe badania są niezbędne do lepszego zrozumienia i udokumentowania wzajemnych związków wynikających z gatunkowo-specyficznych (ang. *species-specific*) relacji ekologicznych i allelopatycznych komponentów agroekosystemów zaangażowanych w podtrzymywanie dobrej kondycji gleby.

5. Hipotezy badawcze i cel pracy

Po przeprowadzeniu analizy danych literaturowych przedstawiono cztery hipotezy badawcze ujmujące aspekt oddziaływań allelopatycznych pomiędzy agroekologicznymi komponentami środowiska glebowego (roślinami międzyplonowymi, dżdżownicami, chwastami) w kontekście procesów regeneracyjnych na polu uprawnym.

Hipoteza 1. Dżdżownice z grupy ekologicznej *endogeic* wykazują preferencje względem zasiedlania ryzosfery testowanych w uprawie pszenżyta jarego (*xTriticosecale* odm. Mamut) gatunków roślin międzyplonowych (*Sinapis alba* L., *Fagopyrum esculentum* Moench., *Phacelia tanacetifolia* Benth.).

Hipoteza 2. Dżdżownice *L. terrestris* L. wykazują preferencje pokarmowe względem biomasy gatunków roślin międzyplonowych (*Sinapis alba* L., *Fagopyrum esculentum* Moench., *Phacelia tanacetifolia* Benth.).

Hipoteza 3. Obecność dżdżownic w uprawach roślin prowadzonych w systemie rolnictwa ekologicznego na stokach o nachyleniu 9% zmniejsza negatywne skutki procesów erozyjnych (ilość i jakość zmywu powierzchniowego).

Hipoteza 4. Ekstrakty wodne z różnych części *Phacelia tanacetifolia* Benth wpływają na wzrost i rozwój pszenżyta jarego odm. Mamut w początkowych fazach rozwoju.

Celem ogólnym pracy było wskazanie agroekologicznych mechanizmów regeneracji stanowisk w różnych systemach i warunkach prowadzenia uprawy, związanych z badanymi roślinami międzyplonowymi (*Sinapis alba* L., *Fagopyrum esculentum* Moench., *Phacelia tanacetifolia* Benth.), oraz organizmami towarzyszącymi uprawom (dżdżownice oraz chwasty).

Celami szczegółowymi prowadzonych doświadczeń były:

1. Ocena powiązań siedliskowych dżdżownic z grupy *endogeic* z ryzosferą roślin międzyplonowych (*Sinapis alba* L., *Fagopyrum esculentum* Moench, *Phacelia tanacetifolia* Benth.) w uprawie pszenżyta jarego (x*Triticosecale* odm. Mamut).
2. Ocena preferencji pokarmowych i dynamika poboru pokarmu przez dżdżownice *L. terrestris* L. względem roślin międzyplonowych (*Sinapis alba* L., *Fagopyrum esculentum* Moench., *Phacelia tanacetifolia* Benth.).
3. Ocena liczebności populacji dżdżownic oraz parametrów ilościowych i jakościowych zmywów powierzchniowych w doświadczeniu polowym prowadzonym na stoku o nachyleniu 9% w systemie konwencjonalnym i ekologicznym.
4. Sprawdzenie oddziaływania allelopatycznego ekstraktów wodnych z różnych części *Phacelia tanacetifolia* Benth. na początkowy wzrost i rozwój siewek pszenżyta jarego odm. Mamut.

Przedstawione hipotezy i cele badawcze wpisują się w nurt odkrywania agroekologicznych podstaw gospodarowania środowiskiem glebowym w rolnictwie, które są bazą dla skutecznej regeneracji stanowisk, zwłaszcza tam gdzie prowadzenie uprawy zwiększa procesy degradujące glebową część agroekosystemu, ze względu na warunki glebowo-klimatyczne i czynniki agrotechniczne.

6. Materiał i metody

Realizację celów szczegółowych podjęto w większości w oparciu o materiał badawczy pochodzący z dwóch doświadczeń polowych (tabela 1).

Tabela 1. Harmonogram prac realizowanych w rozprawie doktorskiej

Cel szczegółowy	Miejsce pobrania materiału do badań	Metody
1	Doświadczenie polowe 1 SD Kraków-Mydlniki	- doświadczenie laboratoryjne: pomiar dynamiki kiełkowania pszenżyta jarego (GP, MGT, CVG, GI, T50, U), oraz oznaczenie parametrów biometrycznych po 7 dniach: świeża, sucha i turgorowa masa (g), długość (cm), wyptyw elektrolitów (%)
2		- doświadczenie polowe: dwukrotny odłów dżdżownic z warstwy ornej w pierwszym roku prowadzenia doświadczenia polowego (2019, w odstępie 10 tygodni), pomiar pH, wilgotności i temperatury glebowej <i>in situ</i> (raz w tygodniu marzec-lipiec), obserwacja częstości występowania koprolitów na polu
3	Materiał zakupiony u dostawcy	- doświadczenie laboratoryjne: trzykrotny pomiar dynamiki poboru pokarmu przez dżdżownice <i>L. terrestris</i> L. (12, 24, 63 h), zastosowanie zaproponowanego wskaźnika F24/AWE – stosunek średniej masy pobranego pokarmu w ciągu 24 h do średniej masy dżdżownic
4	Doświadczenie polowe 2 GSD Czynna	- doświadczenie polowe: jednokrotny połów dżdżownic w trzeciej dekadzie sierpnia w trzecim roku prowadzenia doświadczenia polowego zlokalizowanego na stoku w systemie konwencjonalnym i ekologicznym, ocena pokrycia powierzchni przez rośliny (LAI m ² m ⁻² , liczba chwastów·m ⁻² , % pokrycia powierzchni przez chwasty), pomiar infiltracji mm·min ⁻¹ , pomiar zmywu powierzchniowego (kg·ha ⁻¹ oraz oznaczenie jonów biogennych (N-NO ₃ , N-NH ₄ , P, K) w przesączu spływu powierzchniowego uzyskanego w polu (kg·ha ⁻¹), wyniki uśredniono dla danych otrzymanych w ciągu trzech lat prowadzenia doświadczenia

6.1 DOŚWIADCZENIA POLOWE

6.1.1 Doświadczenie w SD KAiPR w Krakowie-Mydlnikach

Trzyczynnikowe doświadczenie polowe założono w układzie doświadczalnym kompletnym losowanych podbloków (split-split-plot). Doświadczenie zlokalizowane w Stacji Doświadczalnej Uniwersytetu Rolniczego im. Hugona Kołłątaja w Krakowie (50.085264 N, 19.833110 E) prowadzone było w sezonach wegetacyjnych 2018-2021.

Czynniki doświadczenia:

1) pierwszego rzędu - gatunek rośliny międzyplonowej (gorczyca biała *Sinapis alba* L. odm. Borowska, facelia błękitna *Phacelia tanacetifolia* Benth. odm. Stala, gryka zwyczajna *Fagopyrum esculentum* Moench. odm. Kora).

2) drugiego rzędu - termin przyorania międzyplonu (jesienny i wiosenny).

3) trzeciego rzędu - sposób prowadzenia uprawy pszenżyta jarego (*xTriticosecale* Wittm. Ex A. Camus odm. Mamut) po sobie (uprawa bez nawożenia i stosowania środków ochrony roślin – NAT, uprawa z zastosowaniem nawozów mineralnych – MF oraz uprawa gdzie stosowane były zarówno nawozy mineralne i środki ochrony roślin – PEST).

Doświadczenie było prowadzone w trzech powtórzeniach. Powierzchnia poletka doświadczalnego wynosiła 12 m². Szczegółowy opis znajduje się w Publikacji 1.

Utwór glebowy scharakteryzowano w oparciu o wykonany profil glebowy w obszarze doświadczenia polowego. Na podstawie oznaczenia składu granulometrycznego metodą Casagrande'a w modyfikacji Prószyńskiego stwierdzono jego homogeniczność do głębokości ok. 70 cm. W tej warstwie dominuje frakcja piaskowa (79-82%), następnie pyłowa (15-16%) oraz iltowa (<0.002mm) ok. 4%. Utwór sklasyfikowano jako piasek słabo gliniasty (pg) według PTG 2008, co określa to stanowisko wg kategorii agronomicznej jako glebę lekką (klasa IVb). Poniżej tego poziomu (ok. 70 cm) utwór glebowy zmienia się w piasek słabo gliniasty (ps), a następnie na głębokości ok. 114 cm przechodzi w piasek luźny (pl). Według map glebowo-rolniczych teren doświadczenia polowego zawiera się w obszarze V kompleksu przydatności rolniczej (żytni dobry) (MIIP, 2023).

6.1.2 Doświadczenie w Górskiej Stacji Doświadczalnej KAiPR w Czirnej k. Krynicy-Zdrój

Dwuczynnikowe doświadczenie polowe (2019-2021) założono na stoku o nachyleniu 9% w Górskiej Stacji Doświadczalnej KAiPR w Czirnej Niżnej k. Krynicy-Zdrój (N 49°25'; E 20°58', 545 m n.p.m.). Powierzchnia poletka doświadczalnego wynosiła 44 m² (n=4). Doświadczenie polowe prowadzono w układzie doświadczalnym pasów prostopadłych (split-block).

Czynniki doświadczenia:

1) pierwszego rzędu - system prowadzenia uprawy (konwencjonalny i ekologiczny),

2) drugiego rzędu - gatunek rośliny uprawnej (ziemniak, owies zwyczajny i wyka jara).

Rośliny uprawiane były w płodozmianie. Szczegółowy opis znajduje się w Publikacji 3.

Mięszkość warstwy ornej wynosiła ok. 18 cm. Skład granulometryczny utworu glebowego kształtował się następująco: 28% frakcji piaskowej, 29% frakcji pyłowej oraz 43% frakcji iłowej. Według WRB FAO (2015) utwór glebowy przyporządkowano jako Endoeutric Stagnosol (Siltic, Endoskeletal) (Kabała i in., 2019).

6.2 DOŚWIADCZENIA LABORATORYJNE

6.2.1 Analiza oddziaływania ekstraktów z facelii błękitnej na wzrost i rozwój siewek pszenżyta jarego

W doświadczeniu laboratoryjnym testowano wpływ 0, 10, 12.5, 15% ekstraktów wodnych z *Phacelia tanacetifolia* Benth. (odm. Stala) na początkowy wzrost i rozwój siewek pszenżyta jarego (odm. Mamut). Pomiar dynamiki kiełkowania pszenżyta jarego oznaczono w oparciu o indeksy: GP, MGT, CVG, GI, T50, U. Parametry biometryczne siewek pszenżyta jarego określono po 7 dniach: świeża, sucha i turgorowa masa (g), długość (cm), wypływ elektrolitów (%). Testy przeprowadzono na szalkach Petriego (Ø 9 cm) (n=4), gdzie obserwowano 25 roślin.

6.2.2 Analiza preferencji pokarmowych dżdżownic *L. terrestris* L. w odniesieniu do trzech roślin międzyplonowych

Doświadczenie laboratoryjne założono w układzie kwadratu łacińskiego, testując gatunek dżdżownicy *L. terrestris* L., z grupy ekologicznej *anecic*. Testowane dżdżownice poddawano żywieniu w oparciu o cztery różne substraty, przy czym jeden badany organizm znajdował się w jednej szalce Petriego (Ø 9 cm, microcosm). Na każdej szalce badano dynamikę poboru jednego wariantu pożywienia wobec jednego badanego okazu (n=7). Testowanym pożywieniem było pięć substratów: gleba, gleba+biomasa z gorczycy białej (*S. alba*), gleba+biomasa z gryki zwyczajnej (*F. esculentum*), gleba+biomasa z facelii błękitnej (*P. tanacetifolia*), gleba+biomasa z pszenżyta jarego (*xTriticosecale*). W badaniach wykorzystano uprzednio zebrane z doświadczenia polowego (Doświadczenie 1) części nadziemne roślin,

które wysuszono w warunkach laboratoryjnych, zmielono i przesiano przez sito \varnothing 1 mm. Następnie biomasę roślinną (7% w/w) zmieszano z glebą (którą wcześniej przesiano przez sito o \varnothing 2 mm) i utrzymywano w wilgotności ok. 35%. Aspekt ilościowy w dynamice poboru pokarmu przez dżdżownice, jak również jakościowy (chętniej pobrany rodzaj pokarmu) oznaczono po 12 h, 24 h oraz 63 h. Wówczas ważono szalki na precyzyjnej wadze analitycznej (z dokładnością do 0.0001 g), po każdorazowym usuwaniu dżdżownicy i jej świeżych koprolitów. Na podstawie uzyskanych pomiarów zaproponowano wskaźnik F24/AWE mierzący dynamikę poboru i preferencje pokarmowe dżdżownic wobec testowanego pożywienia.

6.3 ANALIZY STATYSTYCZNE

W Publikacji **1** różnice pomiędzy obiektami w świeżej masie dżdżownic odłowionej w polu testowano za pomocą testu Wilcoxon dla par wiązanych ($\alpha=0.05$).

W Publikacji **2** różnice pomiędzy średnimi w poborze różnych rodzajów pokarmu testowano za pomocą jednoczynnikowej ANOVA z powtarzalnymi pomiarami. Różnice w zawartościach C i N oraz wartości współczynnika F24/AWE testowano za pomocą jednoczynnikowej ANOVA z zastosowaniem testu *post-hoc* HSD Tukey ($\alpha=0.05$).

W Publikacji **3** przy określaniu statystycznie istotnych różnic pomiędzy średnimi obiektowymi zastosowano dwuczynnikową ANOVA z testem *post-hoc* LSD (NIR) Fischera ($\alpha=0.05$).

W Publikacji **4** statystycznie istotne różnice w średnich obiektowych testowano za pomocą jednoczynnikowej ANOVA i testu *post-hoc* Duncana ($\alpha=0.05$).

Wszystkie obliczenia przeprowadzono w oparciu o programy statystyczne: STATISTICA (v.13.3 i 13.0), FR-ANALWAR (v.4.3), MS Excel.

7. Streszczenia załączonych publikacji

7.1 Publikacja 1

Klisch A., Puła J. (2020). The Change of pH Value and *Octolasion cyaneum* Savigny Earthworms' Activity under Stubble Crops after Spring Triticale Continuous Cultivation. *Soil Systems* 4(3): 39. <https://doi.org/10.3390/soilsystems4030039>

Dżdżownice są jednymi z kluczowych organizmów odpowiadających za wiele cech fizycznych (struktura gleby), chemicznych (wzrost pH) oraz biologicznych gleby. Drążą korytarze w ryzosferze i pozostawiają na ich ściankach koprolity i śluz, w obrębie, których stymulowana jest aktywność mikrobiologiczna oraz deponowane są biogeny. Korzenie roślin wrastając w drillosferę korzystają z tego rezerwuaru łatwo przyswajalnych składników pokarmowych i stykają się z hot-spotami mikrobiologicznymi, gdzie niejednokrotnie zachodzi protokooperacja pomiędzy roślinami a taksonami mikrobiologicznymi. W klimacie umiarkowanym szczyt aktywności tych zwierząt glebowych przypada na okres wiosenny, późnoletni oraz jesienny (Edwards i Arancon, 2022), co pokrywa się z występowaniem międzyplonów na polu.

Celem badań była ocena preferencji siedliskowych dżdżownic z grupy *endogeic* zasiedlających ryzosferę roślin międzyplonowych obecnych na doświadczeniu polowym 1 w SD Kraków-Mydlniki. Założono następującą hipotezę: dżdżownice z grupy ekologicznej *endogeic*, które są obecne na polu uprawnym w uprawie pszenżyta jarego po sobie, wykazują preferencje względem zasiedlania ryzosfery badanych roślin międzyplonowych (*S. alba*, *F. esculentum*, *P. tanacetifolia*), jak również stosowanych zabiegów agrotechnicznych (przyoranie biomasy międzyplonów jesienią lub wiosną, stosowanie bądź nie nawozów mineralnych i pestycydów). W ramach badań wykonano dwa odłowy mezofauny glebowej (w odstępie 10 tygodni, bez zwracania) na obiektach gdzie prowadzono uprawę pszenżyta jarego po sobie od trzech lat (NAT, MF i PEST) z wysiewem po raz drugi roślin międzyplonowych (jesień 2020). Szczegółowy plan analiz i zabiegów agrotechnicznych wraz z dawkami środków ochrony roślin i nawozów mineralnych znajduje się w sekcji *Material and methods* Publikacji 1.

Pierwszy odłów przeprowadzono po zbiorze zboża (ok. 4 tygodni po zastosowaniu pestycydów w uprawie pszenżyta jarego) i scharakteryzowano wpływ zastosowanych pestycydów na rozmieszczenie poszczególnych grup wiekowych dżdżownic i ich aktywność w trakcie sezonu wegetacyjnego (świeże koprolity). Jako tło do rozwoju populacji dżdżownic szczególnie badano dwa czynniki biotopu: pH i wilgotność gleby (pomiarów parametrów prowadzono w okresie marzec-lipiec 2019 roku raz w tygodniu). Zastosowane fungicydy (*protiokonazol* 53 g l⁻¹ (5,4%), *spiroksamina* 224 g i⁻¹ (22.9%), *tebukonazol* 148 g l⁻¹ (15.1%) oraz insektycyd (*chloropiryfos* 44.86%) wpłynęły negatywnie na świeżą biomasę dżdżownic (średnio ze wszystkich obiektów mniej o 7.89%) w stosunku do obiektów o tym samym stopniu troficzności (zastosowana ta sama dawka nawozów mineralnych). Po pierwszym odłowieniu nie zwrócono okazów z powrotem na pole ze względu na konieczność zmierzenia potencjału odradzania się populacji i migracji osobników (łącznie) oraz określenia przynależności taksonomicznej osobników dojrzałych. Drugi termin odłowów prowadzony był w pełni wegetacji międzyplonów ścierniskowych (10 tygodni po pierwszym odłowieniu), i wówczas określono liczebność poszczególnych grup wiekowych dżdżownic *endogeic* oraz ich masę (g·m⁻²). Przeprowadzone badania miały na celu ujawnienie potencjalnego mechanizmu preferencji siedliskowych dżdżownic *endogeic* (zwłaszcza dżdżownicy z gatunku *Octalasion cyaneum* Sav., która liczebnie przeważała w badanej populacji). Ilościowa kumulacja osobników na stanowiskach z konkretną rośliną międzyplonową byłaby wskazaniem na potencjalny mechanizm agroekologiczny przyczyniający się do regeneracji stanowiska (zgodnie z hipotezą 1).

Z przeprowadzonych badań wynika, że struktura populacji dżdżownic na badanym polu zmieniła się w czasie wegetacji międzyplonów, tj. ze zdeponowanych kokonów wykuły się młode dżdżownice (hatchlings), prawie w całości zasilając grupę osobników młodocianych (juveniles). Dojrzałe płciowo osobniki (matured) stanowiły drugą co do wielkości grupę osobników odłowionych w ryzosferze roślin międzyplonowych. Liczebność osobników dorosłych warunkuje składanie kokonów i wykluwanie się dżdżownic w przyszłym sezonie wegetacyjnym. Najwięcej osobników dojrzałych odłowiono na stanowisku z gryką zwyczajną (*F. esculentum*) – 42.0%. Także osobniki juvenilne zasiedlały najczęściej ryzosferę *F. esculentum* (w 47.2%), co było z kolei efektem zdeponowania tam w trakcie wegetacji pszenżyta jarego kokonów (obecnych jedynie w pierwszym terminie odłowów dżdżownic).

Scharakteryzowano także wilgotność stanowiska na dwóch poziomach głębokości: 5 cm i ok. 34 cm; która w terminie wegetacji pszenżyta jarego wynosiła średnio 13.00%, a podczas wegetacji międzyplonów kształtowała się na średnim poziomie - 15.81%. Wartości pH gleby nie różniły się istotnie pomiędzy obiektami, a zaobserwowane tendencje na polu dotyczyły ogólnych zmian wynikających z przechodzenia do kolejnych faz wegetacyjnych pszenżyta jarego. Zaobserwowano także bardziej wilgotne stanowisko na obiektach z gryką (o 1.2 punktów procentowych) utrzymywanych przez okres zimowy w formie mulczu w stosunku do tych, gdzie biomasę przyorano jesienią. W pierwszym terminie największa liczebność populacji dżdżownic została zarejestrowana na obiekcie PEST (z biomasą z gryki przyoraną na jesień) $5.65 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ oraz na obiektach MF po facelii i gorczycy, przyorywanych w terminie wiosennym (odpowiednio $3.25 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ oraz $4.15 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$). W drugim połowie, największe wartości świeżej biomasy dżdżownic oznaczono sumarycznie w ryzosferze gryki zwyczajnej - w obiekcie MF (średnio $8.80 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$). Relatywnie niskie liczebności dżdżownic *endogea* wiążą się z oligotroficznym charakterem badanego stanowiska i wykonywanymi zabiegami agrotechnicznymi.

7.2 Publikacja 2

Kliszcz A., Puła J. (2019). Assessment of earthworms activity based on eaten biomass from selected catch crops. *Annales Universitatis Paedagogicae Cracoviensis Studia Naturae*, 4(1), 81–90. <https://doi.org/10.24917/25438832.4.4>

Aktywność troficzna mezofauny glebowej, zwłaszcza dżdżownic (rodzina Lumbricidae), stanowi kluczowy element w podnoszeniu żyzności agroekosystemów. Ilościowe aspekty ich strategii pokarmowych zostały opisane w literaturze (Heine i Larink, 1993; Sizmur i in., 2017, Kliszcz i Puła, 2019), jednak preferencje pokarmowe poszczególnych gatunków skąposzczetów glebowych są jak dotąd słabo rozpoznane (Curry i Schmidt, 2009).

Celem eksperymentu było zaobserwowanie preferencji pokarmowych dżdżownic z gatunku *Lumbricus terrestris* L. oraz ilości i dynamiki poboru pokarmu przez te organizmy. *L. terrestris* jest powszechnie występującym gatunkiem skąposzczetów glebowych w Polsce i zasiedlającym uprawy prowadzone w systemie bezpłużnym (*no-till*) na obszarach użytkowanych rolniczo. Jest on jednocześnie modelowym organizmem dżdżownicy z grupy ekologicznej *anecic* w badaniach laboratoryjnych nad ekofizjologią dżdżownic.

W badaniach wykorzystano części nadziemne roślin (*S. alba*, *F. esculentum*, *P. tanacetifolia* oraz *xTriticosecale*) uprzednio zebrane z doświadczenia polowego (Doświadczenie polowe 1). Nowością podjętych badań była ocena preferencji pokarmowych *L. terrestris*, bowiem w literaturze ten temat był rzadko podejmowany i zwłaszcza w odniesieniu do ściółki różnych gatunków drzew liściastych bądź chwastów (Doube i in. 1997, Bonkowsky i in. 2000, Neilson i Boag 2003). Zaproponowano także nowy wskaźnik dynamiki dekompozycji (F24/AWE), który wyraża siłę i wkład populacji dżdżownic w proces przerabiania roślinnej materii organicznej. W wyniku przeprowadzonych badań potwierdzono hipotezę badawczą 2 i stwierdzono, że dżdżownice najchętniej wybierały dwa (*S. alba* oraz *F. esculentum*) spośród czterech testowanych gatunków roślin: *S. alba*, *F. esculentum*, *P. tanacetifolia* oraz *xTriticosecale*. Najniższy wskaźnik dekompozycji F24/AWE wśród roślin zanotowano na obiektach z obecnością *xTriticosecale* (0.07), a największy z udziałem *S. alba* (0.27) i *F. esculentum* (0.24). Wynik ten wyraża udział pokarmu pobranego przez dżdżownicę w ciągu 24 godzin (F24) do średniej masy testowanej dżdżownicy (AWE) i jest interpretowany następująco: im większy pobór pokarmu przez osobnika o mniejszej masie, tym większa

efektywność przerabiania pokarmu przez tego osobnika w danym ekosystemie. Wskaźnik został tak zaproponowany, by jego większe wartości intuicyjnie wskazywały lepszy substrat, tj. taki, który w większych ilościach przerabiany jest na koprolity. Zmodyfikowana wersja tego wskaźnika może znaleźć zastosowanie w ocenie aktywności troficznej dżdżownic anecic w systemach bezpłuznych, gdzie organizmy te pobierają pokarm z powierzchni pola i przerabiają go na koprolity deponowane na powierzchni (ang. *middens*). W takich uprawach powierzchnia pola jest zazwyczaj pokryta ściółką roślin. Modyfikacja tego wskaźnika polegałaby wtedy na zamianie parametru średniej masy testowanej dżdżownicy na suchą masę koprolitu zdeponowanego w obrębie ujścia korytarza poszczególnego osobnika oraz zwiększeniu czasu obserwacji z 24 h do min. 48 h.

7.3 Publikacja 3

Klima K., Puła J., Kliszcz A. (2022). Effect of conventional and organic farming on crop yield and water erosion intensity on sloping farmland. *Agronomy Science*, 77(3), 41–52. <https://doi.org/10.24326/as.2022.3.3>

Pozostając w temacie regeneracji stanowisk glebowych oceniono liczebność dżdżownic pod różnymi uprawami zlokalizowanymi na stoku i porównano te wyniki z innymi analizami wykonywanymi na tym doświadczeniu. Gospodarowanie na terenach urzeźbionych wiąże się z koniecznością dobierania metod, które będą osłabiały naturalne zjawisko erozji występujące powszechnie na stokach (Ma i in. 2019) i bardziej angażowały naturalną stronę ekosystemu (dżdżownice, rośliny towarzyszące). W doświadczeniu uprawiano: ziemniak, owies i wykę jarą w systemie rolnictwa konwencjonalnego i ekologicznego przez 3 lata (szczegółowy opis metodyki jest zawarty w Publikacji 3). Liczebność populacji dżdżownic w glebie (ze wszystkich grup ekologicznych łącznie) określano w oparciu o metodę *hand-sorting* (podobnie jak w metodyce Publikacji 1), lecz jedynie do głębokości 18 cm, zgodnie z poziomem miąższości warstwy ornej. Ocena populacji dżdżownic dokonana była jednokrotnie w trzecim roku prowadzenia doświadczenia polowego. Wykonany klimatogram Waltera-Gausa wskazuje na korzystny układ opadów atmosferycznych do temperatury w okresie przed i w trakcie połowów dżdżownic (opady przewyższają ewapotranspirację, Fig. 2). Warunki pogodowe zostały scharakteryzowane przez klimatogramy, także ze względu na badaną infiltrację, gdyż teoretycznie ewapotranspiracja przewyższa infiltrację, gdy krzywa temperatury ($^{\circ}\text{C}/10$) znajduje się nad słupkiem opadów ($\text{mm}/20$). W przedstawionej pracy taka sytuacja występuje jedynie dla trzech miesięcy w przeciągu 3 lat, co potwierdza zasadność poszukiwania sposobów osłabiania procesów erozyjnych na badanym stanowisku glebowym.

Oprócz określenia liczebności skąposzczetów glebowych oceniono także: plon roślin ($\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$), charakterystyki wskazujące na pokrycie powierzchni pola na stoku (wskaźnik ulistnienia uprawianych roślin LAI ($\text{m}^{-2}\cdot\text{m}^{-2}$), liczbę roślin towarzyszących (chwastów) na 1 m^2 oraz procentowe pokrycie powierzchni gleby chwastami metodą fitosocjologiczną. Infiltrację ($\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$) mierzono w trzeciej dekadzie sierpnia, oznaczano ilościowo spływ powierzchniowy ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) oraz jakościowo zmyw powierzchniowy ($\text{N}\text{-NO}_3$, $\text{N}\text{-NH}_4$, P, K $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{rok}^{-1}$). Wyniki uzyskane w poszczególnych trzech latach (2019-2021) uśredniono.

W pracy wykazano, że prowadzenie uprawy w systemie ekologicznym na terenach urzeźbionych prowadzi do zmniejszenia zjawiska erozji wodnej wyrażonej poprzez spływ powierzchniowy (mniej o 6.47% w stosunku do średniej dla upraw prowadzonych w systemie konwencjonalnym) oraz zwiększenia infiltracji o 13.6% (średnia dla wszystkich roślin dla trzech lat). W systemie rolnictwa ekologicznego udział naturalnych komponentów agroekosystemu osłabia działanie procesów erozyjnych na stokach. Stwierdzono, że populacja dżdżownic w obrębie upraw ekologicznych była większa średnio o 12.43% w porównaniu z obiektami prowadzonymi w systemie konwencjonalnym. Chwasty stanowiły drugą istotną grupę organizmów zatrzymującą spływ powierzchniowy na stoku, przeciwdziałającą procesom erozyjnym. Wartości LAI były nieistotne statystycznie pomiędzy systemami, lecz analizy zachwaszczenia wskazywały na większe pokrycie powierzchni roślin towarzyszących w obiektach ekologicznych (średnio dla wszystkich roślin uprawnych 90.9 szt. \cdot m⁻² w porównaniu z konwencjonalnym 41.0 szt. \cdot m⁻²).

Wartości infiltracji w badanych systemach (8.17 mm \cdot min⁻¹ konwencjonalny i 9.21 mm \cdot min⁻¹ ekologiczny) potwierdziły glebochroną funkcję roślin towarzyszących uprawom i dżdżownic. Również pokrycie powierzchni przez chwasty (21.0% konwencjonalny, 38.1% ekologiczny) znalazło wyraz w zarejestrowanych wartościach zmywu powierzchniowego (średnie dla wszystkich roślin 1 468.0 kg \cdot ha⁻¹ w systemie konwencjonalnym oraz 1 378.8 kg \cdot ha⁻¹ w ekologicznym). Warto wspomnieć, że nie tylko części nadziemne chwastów zatrzymują wodę razem z glebą spływającą po nachyleniu, ale również korzenie chwastów przyczyniają się do zwiększonej infiltracji, gdyż przestrzeń wokół korzeni i miejsce po ich obumarciu może być wykorzystane przez wodę do wnikięcia w głąb profilu glebowego. Najbardziej glebochroną funkcję spełniała wyka jara, dla której blisko dwukrotnie większe zachwaszczenie w systemie ekologicznym (134.4 szt. \cdot m⁻², w stosunku do 74.5 szt. \cdot m⁻² w konwencjonalnym) skutkowało największym zarejestrowanym w obrębie doświadczenia poziomem infiltracji 10.94 mm \cdot min⁻¹.

Uprawa roślin okopowych nie jest zalecana do prowadzenia na terenach urzeźbionych ze względu na występowanie drastycznej erozji w obrębie warstwy ornej powstającej w wyniku uprawy w szerokich rzędach. Również uprawa na oborniku stanowi pewne ryzyko zmywu powierzchniowego bogatego w biogeny i jednostki mikrobiologiczne, który po przeniknięciu do oligotroficzných siedlisk zaburza równowagę ekosystemu. Jednak uprawa takich roślin jest

konieczna w praktyce rolniczej ze względu na zasady zachowania prawidłowego następstwa roślin w zmianowaniu. Przeprowadzone badania wskazują, że uprawa roślin okopowych na przykładzie ziemniaka w systemie ekologicznym stanowi ponad połowę mniejsze ryzyko środowiskowe wyrażone ilością zmytych z pola jonów biogennych ($N-NO_3$, $N-NH_4$, P_{tot}), a w przypadku K_{tot} prawie 3,5-krotnie mniejszą depozycję, niż ta sama uprawa realizowana w oparciu o zasady rolnictwa konwencjonalnego (z użyciem nawozów mineralnych i środków ochrony roślin).

Roślina zbożowa (owies zwyczajny) uprawiana w płodozmianie z rośliną bobowatą oraz okopową plonowała wyżej średnio o $0.66 t \cdot ha^{-1}$ w systemie konwencjonalnym w porównaniu do ekologicznego, jednak stosowane zabiegi agrotechniczne wpłynęły na zmniejszenie liczebności dżdżownic na polu (średnio o 9.72%), chwastów (o $69.03 \text{ szt.} \cdot m^{-2}$), zmniejszenie infiltracji o 0.88 mm min^{-1} , zwiększenie zmywu powierzchniowego o 8.9 kg ha^{-1} oraz podwojenie zawartości jonów biogennych ($N-NO_3$, $N-NH_4$, P_{tot} , K_{tot}) w zmywie powierzchniowym w stosunku do uprawy w systemie ekologicznym.

W toku badań potwierdzono hipotezę badawczą **3** i stwierdzono istotnie statystycznie większe wartości infiltracji oraz mniejsze wartości parametrów dotyczących erozji powierzchniowej na stoku (spływ i zmyw powierzchniowy) w uprawach prowadzonych metodami ekologicznymi, gdzie udział zarówno dżdżownic jak i chwastów był statystycznie istotnie wyższy. W ten sposób udowodniono regenerującą rolę roślin uprawnych i organizmów towarzyszących tym uprawom w systemie rolnictwa ekologicznego na terenach urzeźbionych.

7.4 Publikacja 4

Kliszcz A., Puła J., Możdżeń K., Tatoj A., Zandi P., Stachurska-Swakoń A., Barabasz-Krasny B. (2023). Wider Use of Honey Plants in Farming: Allelopathic Potential of *Phacelia tanacetifolia* Benth. *Sustainability* 15(4): 3061. <https://doi.org/10.3390/su15043061>

W pracy zaprezentowano wyniki badań laboratoryjnych oceniających wpływ wodnych wyciągów z różnych części facelii błękitnej (*P. tanacetifolia*) na wzrost i rozwój siewek pszenżyta jarego odmiany Mamut. *P. tanacetifolia* pozostaje rośliną nierozpoznaną w literaturze w zakresie potencjału allelopatycznego wykazywanego względem wczesnych faz wzrostu i rozwoju roślin zbożowych. Natomiast coraz częściej wykorzystuje się tę roślinę jako międzyplon (Kwiatkowski i in., 2019; Kwiatkowski i in., 2020; Pawłowski i in., 2021) oraz element infrastruktury ekologicznej dla zapylaczy (Gradish i in., 2016; Hemberger i in., 2022) na terenach intensywnie użytkowanych rolniczo.

W doświadczeniu laboratoryjnym testowano wodne wyciągi z kwiatów, liści, łodyg i korzeni *P. tanacetifolia* w stężeniach 0, 10, 12,5 oraz 15%. Wpływ na proces kiełkowania siewek pszenżyta jarego mierzono następującymi parametrami: % skielkowanych ziarniaków po 7 dniach (GP), średni czas skielkowania (MGT), współczynnik szybkości kiełkowania (CVG), indeks kiełkowania (GI), czas potrzebny na skielkowanie 50% ziaren (T_{50}) oraz indeks niepewności procesu kiełkowania (U). Po siedmiu dniach dokonano oznaczeń: świeżej i suchej masy siewek (g), długości całej siewki i pochewki liściowej (cm) oraz wypływu elektrolitów (%). Szczegółowy opis metodyki oraz zastosowane metody analizy statystycznej znajdują się w sekcji *Material and Methods* Publikacji 4.

W odniesieniu do hipotezy 4 wyciągi wodne z liści i kwiatów *P. tanacetifolia* wykazały statystycznie istotny mocniejszy efekt inhibicyjny względem kiełkujących ziarniaków pszenżyta jarego (blisko 12.50% skielkowanych roślin po siedmiu dniach dla wyciągów wodnych z liści i kwiatów, średnio dla wszystkich stężeń ekstraktów, w stosunku do pozostałych organów, gdzie wartość ta wyniosła średnio nieco ponad 49%, przyjmując dla najniższego stężenia (10%) wartość ok. 68.31% skielkowanych ziarniaków pszenżyta). Najniższy efekt inhibicyjny względem długości poszczególnych części siewek pszenżyta został udowodniony dla ekstraktów wodnych z korzeni rośliny międzyplonowej. Udowodniono także stymulujący wpływ wyciągów wodnych z korzenia (niezależnie od stężenia) na długość pochewki liściowej

pszenżyta jarego (o 16.67% w stosunku do kontroli). Zarejestrowany mechanizm stymulowania wzrostu pochewki liściowej zboża przez wodny ekstrakt z korzenia międzyplonu może mieć logiczny i praktyczny wydźwięk w warunkach naturalnych, gdzie masa korzeniowa międzyplonu będąca donorem związków allelopatycznych do środowiska kiełkowania zboża ozimego, wpływałaby na zmniejszenie urazów mechanicznych liścieni w trakcie przebijania się na powierzchnię gleby w związku z obecnością dłuższej pochewki liściowej. Testowane ekstrakty wodne z poszczególnych części rośliny międzyplonowej spowodowały także nieciągłości w błonach komórkowych tkanek kiełkującego pszenżyta. Największy wpływ elektrolitów (EC, blisko 80%) oznaczono dla wyciągów wodnych z liści niezależnie od stężenia, sugerując tym samym możliwość występowania w liściach związku, który wpływa destruktywnie na strukturę błon komórkowych w siewce pszenżyta jarego. Źródła literaturowe zamieszczone w artykule wskazują na zwielokrotnioną obecność DOPAC, HA oraz R-ERI w liściach w stosunku do pozostałych organów *P. tanacetifolia*, co może być przypuszczalną przyczyną tak wyraźnej reakcji.

W pracy, oprócz zbadania pierwotnego potencjału allelopatycznego rośliny międzyplonowej jaką była facelia błękitna, dokonano także przeglądu literatury w zakresie ilościowych biochemicznych charakterystyk poszczególnych części rośliny.

8. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań oraz w odniesieniu do celów szczegółowych i hipotez badawczych stwierdzono:

1. Preferencje siedliskowe dżdżownic z grupy *endogeic*, obecnych na doświadczeniu polowym z uprawą pszenżyta jarego po sobie i wysiewem trzech różnych gatunków roślin międzyplonowych jako czynników regenerujących stanowisko glebowe, zaznaczyły się najbardziej pozytywnie względem *F. esculentum*. W ryzosferze tej rośliny odłowiono najwięcej osobników dorosłych (42%) oraz juvenilnych (47.2%).
2. Dżdżownica z grupy ekologicznej *anecic* (*L. terrestris* L.) pobierała najchętniej biomasę dwóch gatunków roślin międzyplonowych: *S. alba* (0.27) oraz *F. esculentum* (0.24) spośród czterech testowanych (*S. alba*, *F. esculentum*, *P. tanacetifolia* oraz *xTriticosecale*). Wartość została wyrażona w zaproponowanym nowym wskaźniku dekompozycji (F24/AWE), który wraz ze wzrostem wyraża większą smakowitość pokarmu dla testowanego organizmu.
3. Na terenach rolniczych, gdzie uprawa roślin prowadzona jest na stokach o nachyleniu 9% większa populacja dżdżownic i roślin towarzyszących występowała w systemie ekologicznym w porównaniu z systemem konwencjonalnym (większa o 12.43%). Na stanowiskach z uprawą roślin w systemie ekologicznym zarejestrowano także mniejszy spływ powierzchniowy (o 6.47%), większą infiltrację (o 13.6%). Największą biomasę dżdżownic (27.84 g·m⁻²) odłowiono w uprawie ekologicznej ziemniaka. Pomimo tego, że jest to roślina okopowa i sposób jej uprawy przyczynia się do erozji powierzchniowej, ilość jonów biogennych była ponad dwukrotnie mniejsza dla uprawy ekologicznej w porównaniu z uprawą konwencjonalną ziemniaka (11.42 kg·ha⁻¹ biogenów ogółem w systemie konwencjonalnym oraz 4.13 kg·ha⁻¹ w systemie ekologicznym według średniej z trzech lat prowadzenia uprawy).
4. Ekstrakty wodne z poszczególnych części *P. tanacetifolia* wykazują potencjał allelopatyczny względem początkowego wzrostu i rozwoju siewek pszenżyta jarego odm. Mamut. Największą koncentrację allelozwiązków zarejestrowano w liściach i kwiatach, co spowodowało zmniejszenie kiełkowania ziarniaków pszenżyta jarego (blisko 12.50% mniej skiełkowanych ziaren pszenżyta jarego po siedmiu dniach

- w stosunku do obiektu kontrolnego). Najmniejsze oddziaływanie inhibicyjne wykazywały korzenie, stymulując wzrost pochewki liściowej kielków pszenżyta jarego.
5. W kontekście poszukiwania mechanizmów agroekologicznych ujawniających się i dążących do regeneracji stanowiska w uprawie pszenżyta jarego po sobie na glebie lekkiej, zaproponowano następujący: roślina międzyplonowa *F. esculentum* przywabia organizmy pożyteczne (dżdżownice) w sferę części podziemnych. Organizmy z gatunków *endogeic* dżdżownic, namnażające się w ryzosferze tego gatunku, generują zmiany w społeczności mikroorganizmów glebowych. Na tej podstawie można przypuszczać, że są to zmiany kierunkowe, jednakże należałoby je potwierdzić dalszymi molekularnymi badaniami.
 6. Na terenach urzeźbionych gdzie prowadzona jest uprawa roślin dalsze badania nad populacjami dżdżownic występujących w górnej i środkowej części stoku należałoby prowadzić w kierunku taksonomicznego określenia występujących tam okazów z grupy ekologicznej *anecic* i ich regionalnych (górnich) biotypów. Szczególnie interesujące w kontekście zwiększania infiltracji wody na tych terenach byłyby badania powiązane z określeniem średnicy ciała osobników i tworzonych bioporów w glebie.

9. Pozycje literatury cytowane w autoreferacie

1. Aira Manuel, Niall P. McNamara, Trevor G. Pearce, i Jorge Domínguez. 2009. Microbial Communities of Lumbricus Terrestris L. Middens: Structure, Activity, i Changes through Time in Relation to Earthworm Presence. *Journal of Soils and Sediments* 9 (1): 54–61. <https://doi.org/10.1007/s11368-008-0055-8>.
2. Andrzejewska J. 1999. Międzyplony w zmianowaniach zbożowych. *Postępy Nauk Rolniczych*, no. 1: 19–31.
3. Baltzer R. 1956. Die Regenwürmer Westfalens: Eine Tiergeographische, Oekologische Und Sinnesphysiologische Untersuchung. *Zool. Jb.*, no. 84: 355–414.
4. Bonkowski, Michael, Bryan S. Griffiths, i Karl Ritz. 2000. 'Food Preferences of Earthworms for Soil Fungi'. *Pedobiologia* 44 (6): 666–76. [https://doi.org/10.1078/S0031-4056\(04\)70080-3](https://doi.org/10.1078/S0031-4056(04)70080-3).
5. Bottinelli, Nicolas, i Yvan Capowiez. 2021. 'Earthworm Ecological Categories Are Not Functional Groups'. *Biology and Fertility of Soils* 57 (2): 329–31. <https://doi.org/10.1007/s00374-020-01517-1>.
6. Bouché Marcel. 1977. Stratégies Lombriciennes. In *Soil Organisms as Components of Ecosystems*, 25:122–32. Ecology Bulletin. Stockholm.
7. Bouché Marcel B., i Fathel Al-Addan. 1997. Earthworms, Water Infiltration and Soil Stability: Some New Assessments. *Soil Biology and Biochemistry*, 5th International Symposium on Earthworm Ecology, 29 (3): 441–52. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(96\)00272-6](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(96)00272-6).
8. Buckerfield, John C. 1992. 'Earthworm Populations in Dryland Cropping Soils under Conservation-Tillage in South Australia'. *Soil Biology and Biochemistry* 24 (12): 1667–72. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(92\)90167-V](https://doi.org/10.1016/0038-0717(92)90167-V).
9. Capowiez Yvan, Stéphane Cadoux, Pierre Bouchant, Stéphane Ruy, Jean Roger-Estrade, Guy Richard, i Hubert Boizard. 2009. The Effect of Tillage Type and Cropping System on Earthworm Communities, Macroporosity and Water Infiltration. *Soil and Tillage Research* 105 (2): 209–16. <https://doi.org/10.1016/j.still.2009.09.002>.
10. Curry James P., Olaf Schmidt. 2007. The Feeding Ecology of Earthworms – A Review. *Pedobiologia* 50 (6): 463–77. <https://doi.org/10.1016/j.pedobi.2006.09.001>.
11. Daane L L, J Molina, M J Sadowsky. 1997. Plasmid Transfer between Spatially Separated Donor and Recipient Bacteria in Earthworm-Containing Soil Microcosms. *Applied and Environmental Microbiology* 63 (2): 679–86. <https://doi.org/10.1128/aem.63.2.679-686.1997>.
12. Dallinger Anja, i Marcus A. Horn. 2014. Agricultural Soil and Drilosphere as Reservoirs of New and Unusual Assimilators of 2,4-Dichlorophenol Carbon: CAP-SIP of 2,4-DCP Degraders in Soil and Drilosphere. *Environmental Microbiology* 16 (1): 84–100. <https://doi.org/10.1111/1462-2920.12209>.
13. Darwin C.R. 1881. *The Formation of Vegetable Mould, through the Action of Worms, with Observations on Their Habits*. London: John Murray. <http://darwin-online.org.uk/content/frameset?pageseq=11&itemID=F1357&view type=side>. (dostęp: 11.04.2023 r.)
14. Dogra D. 2010. *Biochemical Evaluation of Buckwheat (Fagopyrum esculentum Moench) Genotypes*. Palampur: CSK Himachal Pradesh Krishi Vishwavidyalaya.
15. Doube B.M., Schmidt O., Killham K, i Correll R. 1997. Influence of mineral soil on the palability of organic matter for lumbricid earthworms: A simple food preference study, *Soil Biology and Biochemistry* 29 (3-4): 569-575. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(96\)00032-6](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(96)00032-6)
16. DrilloBase, 2023a: Poland: dostęp: <http://taxo.drilobase.org/index.php?title=Poli> (25.05.2023 r.)
17. DrilloBase, 2023b: Lumbricidae: dostęp: http://taxo.drilobase.org/index.php?title=List_of_taxa/Lumbricidae (25.05.2023 r.)
18. Dziadek K., Kopeć A., Piątkowska E., Leszczyńska T., Pisulewska E., Witkowicz R., Bystrowska B. i Francik R. 2018. Identification of Polyphenolic Compounds and Determination of Antioxidant Activity in Extracts and Infusions of Buckwheat Leaves. *European Food Research and Technology* 244 (2): 333–43. <https://doi.org/10.1007/s00217-017-2959-2>.
19. Edwards Clive A. 2004. *Earthworm Ecology*. CRC Press.
20. Edwards Clive A., Arancon Norman Q. 2022. *Biology and Ecology of Earthworms*. New York, NY: Springer US. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-74943-3>.
21. Friederichs K. 1958. A Definition of Ecology and Some Thoughts About Basic Concepts. *Ecology* 39 (1): 154–59. <https://doi.org/10.2307/1929981>.
22. Furlong Michelle A., David R. Singleton, David C. Coleman, i William B. Whitman. 2002. Molecular and Culture-Based Analyses of Prokaryotic Communities from an Agricultural Soil and the Burrows and Casts

- of the Earthworm *Lumbricus Rubellus*'. *Applied and Environmental Microbiology* 68 (3): 1265–79. <https://doi.org/10.1128/AEM.68.3.1265-1279.2002>.
23. Ganugi Paola, Erika Martinelli, i Luigi Lucini. 2021. Microbial Biostimulants as a Sustainable Approach to Improve the Functional Quality in Plant-Based Foods: A Review. *Current Opinion in Food Science* 41 (October): 217–23. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2021.05.001>.
 24. Gao, Jinhua, Yu Bai, Haifeng Cui, i Yu Zhang. 2020. 'The Effect of Different Crops i Slopes on Runoff i Soil Erosion'. *Water Practice and Technology* 15 (3): 773–80. <https://doi.org/10.2166/wpt.2020.061>.
 25. Główny Urząd Statystyczny. 2022. Rocznik Statystyczny Rolnictwa, Warszawa,
 26. Gopal Murali, Shrikant S. Bhute, Alka Gupta, S. R. Prabhu, George V. Thomas, William B. Whitman, i Kamlesh Jangid. 2017. Changes in Structure and Function of Bacterial Communities during Coconut Leaf Vermicomposting. *Antonie Van Leeuwenhoek* 110 (10): 1339–55. <https://doi.org/10.1007/s10482-017-0894-7>.
 27. Gradish A.E., G. Christopher Cutler, Irew J. Frewin, i Cynthia D. Scott-Dupree. 2016. Comparison of Buckwheat, Red Clover, and Purple Tansy as Potential Surrogate Plants for Use in Semi-Field Pesticide Risk Assessments with *Bombus Impatiens*. *PeerJ* 4 (July): e2228. <https://doi.org/10.7717/peerj.2228>.
 28. Haeckel, Ernst. 1866. *Generelle Morphologie Der Organismen. Allgemeine Grundzüge Der Organischen Formen-Wissenschaft, Mechanisch Begründet Durch Die von Charles Darwin Reformirte Descendenztheorie*. Vol. 2. Berlin: G. Reimer. <https://www.biodiversitylibrary.org/item/52177>.
 29. Heine O., i O. Larink. 1993. Food and Cast Analyses as a Parameter of Turn-over of Materials by Earthworms (*Lumbricus terrestris* L.). *Pedobiologia* 37: 245-256.
 30. Hemberger Jeremy, Grant Witynski i Claudio Gratton. 2022. Floral Resource Continuity Boosts Bumble Bee Colony Performance Relative to Variable Floral Resources. *Ecological Entomology* 47 (4): 703–12. <https://doi.org/10.1111/een.13154>.
 31. Hillel D. 2012. Gleba w środowisku. Warszawa, PWN, 1-344.
 32. Horn Marcus A., Julian Ihssen, Carola Matthies, Ireas Schramm, Georg Acker, i Harold L. Drake. 2005. *Dechloromonas Denitrificans* Sp. Nov., *Flavobacterium Denitrificans* Sp. Nov., *Paenibacillus Anaericanus* Sp. Nov. and *Paenibacillus Terrae* Strain MH72, N₂O-Producing Bacteria Isolated from the Gut of the Earthworm *Aporrectodea Caliginosa*. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology* 55 (3): 1255–65. <https://doi.org/10.1099/ijs.0.63484-0>.
 33. Hudek Csilla, Cristinel Putinica, Wilfred Otten, i Sarah De Baets. 2022. Functional Root Trait-Based Classification of Cover Crops to Improve Soil Physical Properties. *European Journal of Soil Science* 73 (1): e13147. <https://doi.org/10.1111/ejss.13147>.
 34. Jian Jinshi, Xuan Du, i Ryan D. Stewart. 2020. Quantifying Cover Crop Effects on Soil Health and Productivity. *Data in Brief* 29 (April): 105376. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2020.105376>.
 35. Jurys Arnoldas, i Dalia Feizienė. 2021. The Effect of Specific Soil Microorganisms on Soil Quality Parameters and Organic Matter Content for Cereal Production. *Plants* 10 (10): 2000. <https://doi.org/10.3390/plants10102000>.
 36. Kabała C., Charzyński P., Chodorowski J., Drewnik M., Glina M., Greinert I., Hulisz P., i in. 2019. Polish Soil Classification, 6th Edition – Principles, Classification Scheme and Correlations. *Soil Science Annual* 70 (2): 71–97. <https://doi.org/10.2478/ssa-2019-0009>.
 37. Khan Rimsha, Aitazaz A. Farooque, Helen Carolyn Peach Brown, Qamar U. Zaman, Bishnu Acharya, Farhat Abbas, i Irew McKenzie-Gopsill. 2021. 'The Role of Cover Crop Types and Residue Incorporation in Improving Soil Chemical Properties'. *Agronomy* 11 (10): 2091. <https://doi.org/10.3390/agronomy11102091>.
 38. Klima K., Kliszcz A., Puła J., Lepiarczyk A. 2020. Yield and Profitability of Crop Production in Mountain Less Favoured Area'. *Agronomy* 10 (5): 1–10. <https://doi.org/10.3390/agronomy10050700>.
 39. Klima K., Puła J., Kliszcz A. 2022. Effect of Conventional and Organic Farming on Crop Yielding and Water Erosion Intensity on Sloping Farmland. *Agronomy Science* LXXVII (3): 41–52.
 40. Kliszcz A., Danel A., Puła J., Barabaszk-Krasny B., Możdżeń K. 2021. Fleeting Beauty—The World of Plant Fragrances and Their Application. *Molecules* 26 (9): 2473. <https://doi.org/10.3390/molecules26092473>.
 41. Kliszcz A., Puła J.. 2019. Assessment of Earthworms Activity Based on Eaten Biomass from Selected Catch Crops. *Annales Universitatis Paedagogicae Cracoviensis Studia Naturae*, no. 4: 81–90. <https://doi.org/10.24917/25438832.4.4>.
 42. Koudahe Komlan, Samuel C. Allen, i Koffi Djaman. 2022. 'Critical Review of the Impact of Cover Crops on Soil Properties. *International Soil and Water Conservation Research* 10 (3): 343–54. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2022.03.003>.

43. Koutika L.S., W.A.M. Didden, i J.C.Y. Marinissen. 2001. Soil Organic Matter Distribution as Influenced by Enchytraeid and Earthworm Activity. *Biology and Fertility of Soils* 33 (4): 294–300. <https://doi.org/10.1007/s003740000323>.
44. Kraska P. 2011. Konserwująca uprawa roli oraz międzyplony jako czynniki kształtujące plon ziarna pszenicy jarej odmiany Zebra uprawianej w monokulturze. *Annales Universitatis Mariae Curie-Skłodowska. Sectio E. Agricultura* 66 (1). <http://agro.icm.edu.pl/agro/element/bwmeta1.element.dl-catalog-bf9b4e86-01d3-4eae-832b-fc96a78b7b25>.
45. Kucharski J., Barabasz W., Bielińska E., Wyszowska J. 2015. Właściwości Biologiczne i Biochemiczne Gleby. In *Gleboznawstwo*, 1, 232–52. Warszawa: PWN.
46. Kutschera U., i J. M. Elliott. 2010. Charles Darwin’s Observations on the Behaviour of Earthworms and the Evolutionary History of a Giant Endemic Species from Germany, *Lumbricus badensis* (Oligochaeta: Lumbricidae). *Applied and Environmental Soil Science* 2010: 1–11. <https://doi.org/10.1155/2010/823047>.
47. Kuzyakov Y, J. K Friedel, i K Stahr. 2000. Review of Mechanisms and Quantification of Priming Effects. *Soil Biology and Biochemistry* 32 (11): 1485–98. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(00\)00084-5](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(00)00084-5).
48. Kwaśna H. 2014. *Mikrobiologia Rolnicza*. 2nd ed. Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu.
49. Kwiatkowski C., Harasim E., Haliniarz M., Gawęda D., Misztal-Majewska B., Chojnacka S. 2019. Chemical Composition of Stubble Crop Biomass Depending on a Crop Plant Species and Tillage System. *Journal of Elementology*, no. 4/2019 (August). <https://doi.org/10.5601/jelem.2019.24.2.1797>.
50. Kwiatkowski C., Harasim E., Pawłowski L. 2020. Can Catch Crops Be an Important Factor in Carbon Dioxide Sequestration? *International Journal of Conservation Science* 11 (4): 1005–18.
51. Lahive Elma, Richard Cross, Aafke I. Saarloos, Alice A. Horton, Claus Svendsen, Rudolf Hufenus, i Denise M. Mitrano. 2022. Earthworms Ingest Microplastic Fibres and Nanoplastics with Effects on Egestion Rate and Long-Term Retention. *Science of The Total Environment* 807 (February): 151022. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151022>.
52. Lopez Rosa, Elena Ibarra, Eduardo F., Chavez Navarrete, Jimmy T., Pico Rosado, Cristian R. Subia Garcia, i Irew J. Margenot. 2021. Soil Nitrogen Cycling under Contrasting Management Systems in Amazon Coffea Canephora Agroecosystems. *Soil Science Society of America Journal* 85 (5): 1634–48. <https://doi.org/10.1002/saj2.20255>.
53. Ma Bo, Gang Liu, Fan Ma, Zhanbin Li, i Faqi Wu. 2019. Effects of Crop-Slope Interaction on Slope Runoff and Erosion in the Loess Plateau. *Acta Agriculturae Sciinavica, Section B — Soil & Plant Science* 69 (1): 12–25. <https://doi.org/10.1080/09064710.2018.1488988>.
54. Łyszcz M., Gałązka A. 2016. Proces biologicznego wiązania azotu atmosferycznego. <https://doi.org/10.26114/SIR.IUNG.2016.49.05>.
55. Medina-Sauza, Regina M., Marycruz Álvarez-Jiménez, Alix Delhal, Frédérique Reverchon, Manuel Blouin, José A. Guerrero-Analco, Carlos R. Cerdán, Roger Guevara, Luc Villain, i Isabelle Barois. 2019. ‘Earthworms Building Up Soil Microbiota, a Review’. *Frontiers in Environmental Science* 7 (June): 81. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2019.00081>.
56. Mielniczuk E., Patkowska E., Jamiołkowska A. 2020. The Influence of Catch Crops on Fungal Diversity in the Soil and Health of Oat. *Plant, Soil i Environment* 66 (3): 99–104. <https://doi.org/10.17221/38/2020-PSE>.
57. MIIP - Małopolska Infrastruktura Informacji Przestrzennej- Geoportal Małopolski. dostęp: <https://miip.geomalopolska.pl/imap/#gpmmap=gp83> (24.03.2023 r.)
58. Milcu Alexiru, Stephan Partsch, Christoph Scherber, Wolfgang W. Weisser, i Stefan Scheu. 2008. Earthworms and Legumes Control Litter Decomposition in a Plant Diversity Gradient. *Ecology* 89 (7): 1872–82. <https://doi.org/10.1890/07-1377.1>.
59. Mishra C. S. K., Suryasikha Samal, i Rashmi Rekha Samal. 2022. Evaluating Earthworms as Candidates for Remediating Pesticide Contaminated Agricultural Soil: A Review. *Frontiers in Environmental Science* 10. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenvs.2022.924480>.
60. Mostowska M. 2020. Integrowana Ochrona Buraka Cukrowego. Stare Pole, PODR, 1-19.
61. Neilson R., Boag B. 2003. Feeding preferences of some earthworm species common to upland pastures in Scotland, *Pedobiologia* 47 (1): 1-8. [https://doi.org/10.1078/S0031-4056\(04\)70173-0](https://doi.org/10.1078/S0031-4056(04)70173-0)
62. Patkowska, E., M. Błazewicz-Woźniak, M. Konopiński, i D. Wach. 2016. ‘The Effect of Cover Crops on the Fungal and Bacterial Communities in the Soil under Carrot Cultivation’. *Plant, Soil and Environment* 62 (No. 5): 237–42. <https://doi.org/10.17221/117/2016-PSE>.
63. Platforma Sygnalizacji Agrofagów: dostęp: <https://www.agrofagi.com.pl/> (25.05.2023 r.)

64. Polskie Towarzystwo Gleboznawcze. 2008. Klasyfikacja uziarnienia gleb i utworów mineralnych. *Roczniki Gleboznawcze LX (2)*, Warszawa, 2009, 5-16.
65. Pużyńska K., Jop B., Gala-Czekaj D., Synowiec A., Bocianowski J. 2019. Effect of Allelopathic Seed Meals on the Weed Infestation and Yielding of Maize. *Acta Physiologiae Plantarum* 41 (12): 193. <https://doi.org/10.1007/s11738-019-2987-6>.
66. Pytlarz E., Gala-Czekaj D. 2022a. Possibilities of Using Seed Meals in Control of Herbicide-Susceptible and -Resistant Biotypes of Rye Brome (*Bromus secalinus* L.) in Winter Wheat. *Plants* 11 (3): 331. <https://doi.org/10.3390/plants11030331>.
67. Pytlarz E., Gala-Czekaj D. 2022b. Seed Meals from Allelopathic Crops as a Potential Bio-Based Herbicide on Herbicide-Susceptible and -Resistant Biotypes of Wild Oat (*Avena fatua* L.). *Agronomy* 12 (12): 3083. <https://doi.org/10.3390/agronomy12123083>.
68. Restovich Silvina Beatriz, Adrián Enrique Iriulo, Cecilia María Armas-Herrera, María José Beribe, i Silvina Isabel Portela. 2019. Combining Cover Crops and Low Nitrogen Fertilization Improves Soil Supporting Functions'. *Plant and Soil* 442 (1): 401–17. <https://doi.org/10.1007/s11104-019-04205-8>.
69. Sawicka B., Kotiuk E. 2007. Gorczyce jako rośliny wielofunkcyjne. *Acta Sci. Pol., Agricultura* 6(2), 17-27.
70. Schaik Loes van, Juliane Palm, Julian Klaus, Erwin Zehe, i Boris Schröder. 2014. Linking Spatial Earthworm Distribution to Macropore Numbers and Hydrological Effectiveness. *Ecohydrology* 7 (2): 401–8. <https://doi.org/10.1002/eco.1358>.
71. Seribekkyzy. 2022. Heavy Metal Effects on Earthworms in Different Ecosystems.
72. Shahbaz Muhammad, Amit Kumar, Yakov Kuzyakov, Gunnar Börjesson, i Evgenia Blagodatskaya. 2018. 'Priming Effects Induced by Glucose and Decaying Plant Residues on SOM Decomposition: A Three-Source ¹³C/¹⁴C Partitioning Study'. *Soil Biology and Biochemistry* 121 (June): 138–46. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.03.004>.
73. Sheikh Tahir, Zahoor Baba, Ali Mohd Yattoo, Basharat Hamid, Sadaf Iqbal, Fehim Wani, Sabah Fatima, Saleh Alfarraj, i Mohammad Javed Ansari. 2022. 'Deciphering Waste Bound Nitrogen by Employing Psychrophilic *Aporrectodea caliginosa* and Priming of Coprolites by Associated Heterotrophic Nitrifiers under High Altitude Himalayas. *Scientific Reports* 12 (1): 9556. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-12972-1>.
74. Shipitalo, M.J., i T Korucu. 2017. 'Structure and Earthworms. In *Encyclopedia of Soil Science*, 3rd ed., 2212–15. Boca Raton, FL: CRC Press, Taylor & Francis Group. doi: 10.1081/E-ESS3-120053787.
75. Sizmur Tom, Elodie Martin, Kevin Wagner, Emilie Parmentier, Chris Watts, i Irew P Whitmore. 2017. Milled Cereal Straw Accelerates Earthworm (*Lumbricus terrestris*) Growth More than Selected Organic Amendments. *Applied Soil Ecology* 113 (May): 166–77. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2016.12.006>.
76. Ścigalska B. Plonowanie pszenżyta jarego w zmianowaniu i monokulturze na glebie kompleksu żyniego dobrego. Zeszyty Naukowe Akademii Rolniczej im. H. Kołłątaja w Krakowie, Kraków 2001, 1-98.
77. Thakur Samrendra Singh, Azhar Rashid Lone, Kiran Singh, Siddhartha Shankar Bhattacharyya, Anisa Ratnasari, Ajar Nath Yadav, Subodh Kumar Jain, i Shweta Yadav. 2023. Polycyclic Aromatic Hydrocarbon (PAH)–Contaminated Soil Decontamination Through Vermiremediation. *Water, Air, & Soil Pollution* 234 (4): 247. <https://doi.org/10.1007/s11270-023-06253-4>.
78. Thapa Vesh R., Rajan Ghimire, Verónica Acosta-Martínez, Mark A. Marsalis, i Meagan E. Schipanski. 2021. Cover Crop Biomass and Species Composition Affect Soil Microbial Community Structure and Enzyme Activities in Semiarid Cropping Systems. *Applied Soil Ecology* 157 (January): 103735. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2020.103735>.
79. Turk-Kubo, Kendra A., Mary R. Gradoville, Shunyan Cheung, Francisco Cornejo-Castillo, Katie J. Harding, Michael Morio, Matthew Mills, i Jonathan P. Zehr. 2022. Non-Cyanobacterial Diazotrophs: Global Diversity, Distribution, Ecophysiology, and Activity in Marine Waters. *FEMS Microbiology Reviews*, November, fuac046. <https://doi.org/10.1093/femsre/fuac046>.
80. Ullah Maaz, Ihsanullah Daur, Bismillah Khan, Muhammad Mehran Anjum, Nawab Ali. 2023. Rock Phosphate i Phosphorus Solubilizing Bacteria Effect on Yield and Yield Components of Chickpea. *Gesunde Pflanzen*, April. <https://doi.org/10.1007/s10343-023-00866-9>.
81. Vargas-Herniez Marcela, Daniel A. Arriaga-Madrid, Alejira Cortez-Perez, Ana A. Feregrino-Perez, Maria G. Ortega-Salazar, Angel G. Alpuche-Solis, Irineo Torres-Pacheco, Francois Gautier, i Ramon G. Guevara-Gonzalez. 2023. White Mustard (*Sinapis alba* L.) Residues with Enhanced Potential as Soil Biofumigant by Using Controlled Elicitation during Cultivation. *European Journal of Plant Pathology*, February. <https://doi.org/10.1007/s10658-023-02655-6>.

82. Wang, Xi, Mengmeng Gu, Genhua Niu, i Paul A. Baumann. 2015. 'Herbicidal Activity of Mustard Seed Meal (*Sinapis Alba* "IdaGold" and *Brassica Juncea* "Pacific Gold") on Weed Emergence'. *Industrial Crops and Products* 77 (December): 1004–13. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.09.070>.
83. Wilczewski E., Skinder Z., Szczepanek M. 2008. Wpływ dawki azotu na cechy jakościowe zielonki z roślin niemotylikowatych uprawianych w międzyplonie ścierniskowym. *Acta Sci. Pol., Agricultura* 7(2), 133-141.
84. Wojciechowski W., Lehmann A. 2013. Wpływ międzyplonów ścierniskowych na zachwaszczenie roślin uprawnych'. *Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu. Rolnictwo* 107. <http://yadda.icm.edu.pl/yadda/element/bwmeta1.element.agro-57c1e658-fc1e-4bca-b85c-37f388044be1>.
85. WRB FAO. 2015. World reference base for soil resources 2014. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. Update 2015. World Soil Resources Report 106, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 1-190.
86. Zaniewicz-Bajkowska, A., R. Rosa, E. Kosterna, Franczuk J. 2013. Catch crops for green manure: biomass yield and macroelement content depending on the sowing date. *Acta Scientiarum Polonorum. Agricultura* 12 (1). <https://bibliotekanauki.pl/articles/46562>.
87. Zhang Chongzhe, Wenfeng Xue, Jingrong Xue, Jing Zhang, Lujie Qiu, Xiaoyun Chen, Feng Hu, Paul Kardol, i Manqiang Liu. 2022. Leveraging Functional Traits of Cover Crops to Coordinate Crop Productivity and Soil Health. *Journal of Applied Ecology* 59 (10): 2627–41. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.14264>.
88. Zhou Yang, Honghui Zhu, i Qing Yao. 2017. Improving Soil Fertility and Soil Functioning in Cover Cropped Agroecosystems with Symbiotic Microbes. In *Agro-Environmental Sustainability: Volume 1: Managing Crop Health*, edited by Jay Shankar Singh i Gamini Seneviratne, 149–71. Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-49724-2_8.
89. Zhou Zeming, i Huaiying Yao. 2020. Effects of Composting Different Types of Organic Fertilizer on the Microbial Community Structure and Antibiotic Resistance Genes. *Microorganisms* 8 (2): 268. <https://doi.org/10.3390/microorganisms8020268>.
90. Zhu Dong, Manuel Delgado-Baquerizo, Jian-Qiang Su, Jing Ding, Hu Li, Michael R. Gillings, Josep Penuelas, i Yong-Guan Zhu. 2021. Deciphering Potential Roles of Earthworms in Mitigation of Antibiotic Resistance in the Soils from Diverse Ecosystems. *Environmental Science & Technology* 55 (11): 7445–55. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c00811>.
91. Zhu Y-G, Y-Q He, S. E. Smith, i F. A. Smith. 2002. Buckwheat (*Fagopyrum esculentum* Moench.) Has High Capacity to Take up Phosphorus (P) from a Calcium (Ca)-Bound Source. *Plant and Soil* 239 (1): 1–8. <https://doi.org/10.1023/A:1014958029905>.

10. Dorobek naukowy

Staże naukowe i dydaktyczne

1. STSM (Short-Time Scientific Mission) nr 41918 w ramach KEYSOM COST Action ES1406 *Soil fauna – Key to soil organic matter dynamics and modelling* w Vigo w Hiszpanii (13.11-6.12.2018 r.)
2. Staż naukowy w Instytucie Podstaw Chemii Żywności na Wydziale Biotechnologii i Nauk o Żywności Politechniki Łódzkiej w Łodzi (13.03-15.03.2019 r.)
3. Staż naukowy w Laboratorium Mikrobiologii Molekularnej i Środowiskowej Zakładu Badań Systemu Gleba-Roślina Instytutu Agrofizyki PAN w Lublinie (25.03-5.04.2019 r.)
4. Wielokrotne krótkoterminowe pobyty naukowe w Katedrze Agronomii w Instytucie Rolnictwa Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie (18.03-22.03.2019 r., 9-13.12.2019 r., 10-18.02.2020, 29.11-9.12.2021 r.)
5. Staż dydaktyczny i praca w laboratorium w Instytucie Fizjologii Roślin PAN w Krakowie (1.03-30.06.2021 r.)

Konferencje naukowe

1. 6th International Conference on Young Researchers “Multidirectional Research in Agriculture, Forestry and Technology” (URK, Kraków, 24-25.04.2017 r.)
 - poster “The influence of biochar to yielding of pasture blend and Jerusalem artichoke in the field experiment.” A. Kliszcz, J. Puła, M. Mierzwa-Hersztek, K. Gondek
2. 7th International Conference for Young Researchers “Multidirectional research in Agriculture, Forestry and Technology” (URK, Kraków, 16-17.04.2018 r.)
 - poster “Allelopathic effect of hydrodistillate from aboveground parts of *Helianthus tuberosus* L. on germination of *Sinapis alba* L.” A. Kliszcz
3. 11th International Conference *Plant functioning under environmental stress* (IFR PAN, Kraków, 12-15.09.2018 r.)
 - poster “Effect of aqueous extracts from *Solidago canadensis* L. leaves on germination and early growth stages of three varieties of *Raphanus sativus* L. var. *radicula* Pers.” J. Puła, K. Mozdzeń, B. Barabasz-Krasny, P. Zandi, A. Lepiarczyk, A. Kliszcz
4. 12th International Conference on Agrophysics: *Soil, Plant & Climate* (IA PAN, Lublin, 17-19.09.2018 r.)
 - referat “Take a peek inside the earthworms behaviour in biochar-amended soil. A review.” Session VIII – SOIL&PLANT, 18.09.2018, A. Kliszcz

- poster „Responses of earthworms on compost from *Helianthus tuberosus* L. amended with biochar” A. Kliszcz
- 5. Zjazd Katedr Jednoimiennych połączony z konferencją naukową *Nowe trendy badawcze w zakresie ogólnej uprawy roli i roślin* (URK, Kraków-Zakopane, 24-26.06.2019 r.)
 - referat w języku polskim pt. „Ocena aktywności dżdżownic na podstawie pobrania biomasy z wybranych międzyplonów” A. Kliszcz, J. Puła
- 6. 58. Zjazd Polskiego Towarzystwa Botanicznego (PTB, Kraków, 1-7.07.2019 r.)
 - poster „Intensywność występowania chwastów z rodziny goździkowatych (Caryophyllaceae) w uprawie pszenżyta jarego z zastosowaniem oraz bez stosowania herbicydów i nawozów mineralnych” Sekcja Struktury i Rozwoju Roślin, A. Kliszcz, J. Puła
- 7. XXXIX Międzynarodowa Konferencja Agrometeorologów i Klimatologów *Klimat, Środowisko, Gospodarka, Społeczeństwo* (URK, Kraków, on-line, 28-29.09.2020 r.)
 - referat w języku angielskim pt. „Preliminary results of soil temperature and moisture monitoring in different triticale cultivation management types” A. Kliszcz, J. Puła
- 8. 59. Zjazd Polskiego Towarzystwa Botanicznego *Amor plantarum nos unit – łączy nas umiłowanie roślin* (PTB, Warszawa, 26.06-3.07.2022 r.)
 - poster pt. „Propozycja faz rozwojowych BBCH dla gatunku Słonecznik bulwiasty (*Helianthus tuberosus* L.) A. Kliszcz, J. Puła
- 9. VII Ogólnopolskie Sympozjum Mikrobiologiczne *Metagenomy Różnych Środowisk* (IA PAN-IUNG-KUL-UMCS-SGGW, Lublin, 20-21.06.2023 r.)
 - poster pt. „Bakteryjne endosymbionty kosmopolitycznego gatunku dżdżownicy *A. caliginosa* Sav.” A. Kliszcz, A. Kuźniar, A. Wolińska, S. Jurczyk, J. Puła
- 10. Zjazd Katedr Jednoimiennych połączony z konferencją naukową *Wpływ badań rolniczych na kształtowanie środowiska przyrodniczego* (UP Poznań, Dymaczewo Nowe, 21-23.06.2023 r.)
 - referat w języku polskim pt. „Regeneracja stanowisk poprzez aktywność agroekologicznych komponentów środowiska przyrodniczego” A. Kliszcz, J. Puła, K. Klima, A. Oleksy, A. Lepiarczyk

Publikacje naukowe

1. **Kluszcz** Angelika, Kuźniar Agnieszka, Wolińska Agnieszka, Jurczyk Sara, Kruczyńska Anna, Puła Joanna. Future frontiers of agroecosystem management: Shifts in microbial community after passage through the gut of endogeic earthworm reveals enhancing cereal endophytes abundance, *Ecological Indicators*, (obecnie po recenzjach, stan na dzień 29.06.2023 r.), 140 punktów, IF (6.263)
2. **Kluszcz** Angelika, Puła Joanna, Możdzeń Katarzyna, Tatoj Agnieszka, Zandi Peiman, Stachurska-Swakoń Alina, Barabasz-Krasny Beata. Wider Use of Honey Plants in Farming: Allelopathic Potential of *Phacelia tanacetifolia* Benth, *Sustainability*, MDPI, vol. 15, nr 4, 2023, s. 1-18, DOI:10.3390/su15043061, 100 punktów, IF (3,889)
3. Klima Kazimierz, Puła Joanna, **Kluszcz** Angelika. Wpływ rolnictwa konwencjonalnego i ekologicznego na plonowanie roślin uprawnych i intensywność erozji wodnej na terenach urzeźbionych, *Agronomy Science*, vol. 77, nr 3, 2022, s. 41-52, DOI:10.24326/as.2022.3.3, 70 punktów
4. **Kluszcz** Angelika, Danel Andrzej, Puła Joanna, Barabasz-Krasny Beata, Możdzeń Katarzyna. Fleeting Beauty—The World of Plant Fragrances and Their Application, *Molecules*, vol. 26, nr 9, 2021, Numer artykułu: 2473, s. 1-21, DOI:10.3390/molecules26092473, 140 punktów, IF (4,927)
5. **Kluszcz** Angelika. Phenological growth stages and BBCH-identification keys of Jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus* L.), *Annales Universitatis Paedagogicae Cracoviensis Studia Naturae*, Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu Pedagogicznego, nr 6, 2021, s. 1-23, DOI:10.24917/25438832.6.12, 20 punktów
6. Klima Kazimierz, Synowiec Agnieszka, Puła Joanna, Chowaniak Maciej, Pużyńska Katarzyna, Gala-Czekaj Dorota, **Kluszcz** Angelika, Galbas Patryk, Jop Beata, Dąbkowska Teresa, Lepiarczyk Andrzej. Long-Term Productive, Competitive, and Economic Aspects of Spring Cereal Mixtures in Integrated and Organic Crop Rotations, *Agriculture* (MDPI), vol. 10, nr 6, 2020, s. 1-14, DOI:10.3390/agriculture10060231, 100 punktów, IF (2,925)
7. Klima Kazimierz, **Kluszcz** Angelika, Puła Joanna, Lepiarczyk Andrzej. Yield and Profitability of Crop Production in Mountain Less Favoured Areas, *Agronomy* (MDPI), vol. 10, nr 5, 2020, nr artykułu: 700, s. 1-10, DOI:10.3390/agronomy10050700, 100 punktów, IF (3,417)
8. **Kluszcz** Angelika, Puła Joanna. The Change of pH Value and *Octolasion cyaneum* Savigny Earthworms' Activity under Stubble Crops after Spring Triticale Continuous Cultivation, *Soil Systems*, vol. 4, nr 3, 2020, s. 1-11, DOI:10.3390/soilsystems4030039, 20 punktów
9. Lipniak Katarzyna, **Kluszcz** Angelika. Allelopathic effect of goosefoot on germination and early stage growth of triticale and radish, *Annales Universitatis Paedagogicae Cracoviensis Studia Naturae*, Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu Pedagogicznego, nr 5, 2020, s. 110-128, DOI:10.24917/25438832.5.8, 20 punktów
10. Możdzeń Katarzyna, Barabasz-Krasny Beata, Zandi Peiman, **Kluszcz** Angelika, Puła Joanna. Effect of Aqueous Extracts from *Solidago Canadensis* L. Leaves on Germination

- and Early Growth Stages of Three Cultivars of *Raphanus Sativus* L. var. *Radicula* Pers, Plants (MDPI), vol. 9, nr 11, 2020, nr artykułu: 1549, s. 1-14, DOI:10.3390/plants9111549, 70 punktów, IF (3,935)
11. Zydrón Tymoteusz, Puła Joanna, **Kliszcz** Angelika, Gruchot Andrzej. Electrical resistance of soil on experimental plots of different cultivation type, W: EUREKA 2020: 8th Colloquium and Working Session within the frame of the International Program EUREKA, Project No.: E!7614 / Pařílková Jana (red.), Eureka, 2020, VUTIUM, Brno University of Technology, ISBN 978-80-214-5862-8, s. 10-13, 5 punktów
 12. Klima Kazimierz, Puła Joanna, Synowiec Agnieszka, **Kliszcz** Angelika, Lepiarczyk Andrzej. Biomass Yield and Calorific Value of Multiflora Rose (*Rosa multiflora* Thunb.) Irradiated with Laser Beams and Estimation of CO₂ Equivalent Emission During the Extensive Cultivation, Journal of Biobased Materials and Bioenergy, vol. 13, nr 3, 2019, s. 424-427, DOI:10.1166/jbmb.2019.1860, 70 punktów, IF (1,126)
 13. Klimek-Kopyra Agnieszka, **Kliszcz** Angelika, Ślizowska Anna, Kot Dominika. Application of biostimulants influences shoot and root characteristics of seedlings of winter pea (*Pisum sativum* L.), Acta Agrobotanica, vol. 72, nr 2, 2019, s. 1-8, DOI:10.5586/aa.1771, 40 punktów
 14. **Kliszcz** Angelika, Puła Joanna. Assessment of earthworms activity based on eaten biomass from selected catch crops, Annales Universitatis Paedagogicae Cracoviensis Studia Naturae, Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu Pedagogicznego, nr 4, 2019, s. 81-90, DOI:10.24917/25438832.4.4, 20 punktów
 15. Konieczna Iwona, Rut Grzegorz, **Kliszcz** Angelika. Effect of copper and vanadium salts on morphology of carrot (*Daucus carota* L. subsp. *sativus* (Hoffm.) Schübl. & G. Martens) and wheat (*Triticum aestivum* L.) plants, Annales Universitatis Paedagogicae Cracoviensis Studia Naturae, Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu Pedagogicznego, nr 3, 2018, s. 55-69, DOI:10.24917/25438832.3.4, 1 punkt
 16. Konieczna Iwona, Rut Grzegorz, **Kliszcz** Angelika. Photosynthetic activity of *Daucus carota* L. subsp. *sativus* (Hoffm.) Schübl. & G. Martens and *Triticum aestivum* L. in the presence of copper and vanadium salts, Annales Universitatis Paedagogicae Cracoviensis Studia Naturae, Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu Pedagogicznego, vol. 3, 2018, s. 70-79, DOI:10.24917/25438832.3.5, 1 punkt
 17. Puła Joanna, **Kliszcz** Angelika. XLI National Scientific Conference on "Zoning of arable weeds in Poland", Kraków, 3rd-4th July 2017, Annales Universitatis Paedagogicae Cracoviensis Studia Naturae, Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu Pedagogicznego, nr 2, 2017, s. 208-213, 1 punkt
 18. Puła Joanna, **Kliszcz** Angelika. The yield of Jerusalem artichoke plant *Helianthus tuberosus* L. grown in a various combination of fertilisation - preliminary research, Annales Universitatis Paedagogicae Cracoviensis Studia Naturae, Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu Pedagogicznego, nr 2, 2017, s. 97-103, DOI:10.24917/25438832.2.7, 1 punkt

Publikacje popularno-naukowe

1. Biowęgiel – uwarunkowania prawne oraz przykłady zastosowań w rolnictwie i ochronie środowiska (blog *Rolnikuj.pl*, 2018)
2. Martwy materiał w żywej glebie (blog *Rolnikuj.pl*, 2018)
3. Topinambur – roślina, którą warto poznać (blog *Rolnikuj.pl*, 2018)

Granty i projekty

1. Projekt *BioHerOd Strategia przeciwdziałania uodparniania się chwastów na herbicydy jako istotny czynnik zapewnienia zrównoważonego rozwoju agroekosystemu* (BIOSTRATEG3/347445/1/NCBR/2017) – wykonawca
2. BM nr 2119/2018 dotacja celowa *Badania Młodych* pt. Analiza molekularna i mikrobiologiczna materiału glebowego oraz aktywność dżdżownic w ryzosferze roślin międzyplonowych (*Phacelia tanacetifolia* Benth., *Sinapis alba* L., *Fagopyrum esculentum* Moench) jako sposób regeneracji stanowiska w uprawie pszenżyta jarego” – kierownik
3. Projekt *Innowacyjny Program Strategicznego Rozwoju Uczelni* (współfinansowany w ramach Unii Europejskiej z Europejskiego Funduszu Społecznego - POWR.03.05.00-00-Z020/18) - stypendysta
4. Projekt AGROSUS – HORYZONT EUROPA Grant Agreement no 101084084 *Agroecological strategies for sustainable weed management in key European crops* – wykonawca
5. BZ 2022 i Raport pt. Evaluation of the effectiveness of maize fertilization in field cultivation, using fertilizers from ICL EUROPE COOPERATIEF U.A., compared to standard fertilization - wykonawca

Kursy podyplomowe, praktyki, kursy on-line, webinaria, szkoły letnie i zimowe dla doktorantów, szkolenia, wykłady

1. Praktyka zawodowa w Laboratorium Stacji Chemiczno-Rolniczej, Oddział w Krakowie (1-30.06.2015 r.)
2. Seminarium *Bezpieczne i odpowiedzialne stosowanie środków ochrony roślin* (Polskie Stowarzyszenie Ochrony Roślin, Kraków, 22.11.2016 r.)
3. Szkolenia w ramach *Projekt Naukowiec. EURAXESS* m.in. pt. „Dwie strony medalu – naukowcy w biznesie”, „Jak zdobywać doświadczenie i umiejętności poprzez pracę w innych krajach i w różnych sektorach”, „Zarządzanie projektem badawczym” (Kraków, 10-12.10.2017 r.)
4. PhD Winter School of the Italian Society of Agricultural Chemistry (University of Palermo, 12-15.02.2018 r.)

- poster "The effect of various doses of mineral fertilisers and biochar on yield of Jerusalem artichoke *Helianthus tuberosus* L. on sandy soil." A. Kliszcz, J. Puła
- 5. Szkolenie z procesu przygotowywania publikacji Biblioteki Głównej URK (Kraków, 19.04.2018 r.)
- 6. Szkolenie ITN – *Innowacyjne Sieci Szkoleniowe w ramach programu Marie Skłodowska-Curie Actions* (Kraków, 6.11.2018 r.)
- 7. Uczestnictwo w szkoleniu na temat technik spektroskopii w bliskiej podczerwieni NIR (FOSS, Łódź, 7-8.11.2019 r.)
- 8. Ukończenie podyplomowego kursu w języku angielskim *Introduction to Statistics using R* (Spała, 13-16.01.2020 r.) na Uniwersytecie Łódzkim organizowanego we współpracy z Physalia Courses
- 9. Ukończenie podyplomowego kursu on-line w języku angielskim *Advances in intercropping: principles and implementation* (11-15.01.2021) w The Graduate School for Production Ecology&Resource Conservation, Wageningen University.
- 10. Uczestnictwo w webinarium w języku angielskim *An introduction to soil spectroscopy* (6.09.2021, GLOSOLAN-FAO)
- 11. Uczestnictwo w webinarium w języku angielskim *Soil spectroscopy for accurate measurements of soil physical and chemical soil properties* (16.09.2021, GLOSOLAN-FAO)
- 12. Uczestnictwo w webinarium w języku angielskim "The Brazilian soil spectra library experience from scientific to society services" (4.10.2021, GLOSOLAN-FAO)
- 13. Uczestnictwo w webinarium *Spektrometria mas wybranych jonów z reakcyjną komorą przepływową – technologia SIFT-MS* (Perlan, on-line, 5.11.2021)
- 14. Uczestnictwo w warsztatach analitycznych *Spektroskopia podczerwieni FTIR w skali mikro i makro* (31.05.2022, UJ-MS Spektrum, Kraków)
- 15. Uzyskanie certyfikatu z języka angielskiego TOEIC® Listening & Reading Test (7.12.2022)

Prowadzone sesje szkoleniowe, referaty

1. Sesja szkoleniowa pt. "Studies of soil properties under the long-term organic and conventional farming in the mountain conditions of southern Poland" w ramach *Workshops on long-term agricultural effects on soils, as the natural resources of sustainability*, Visegrad Grant no 21720051 (14-15.05.2018 r.)
2. Referat naukowy w ramach posiedzeń Krakowskiego Oddziału PTB pt. "Słonecznik bulwiasty (*Helianthus tuberosus* L.) jako roślina o potencjale allelopatycznym" (Kraków, 23.01.2020 r.)
3. Referat szkoleniowy pt. „Topinambur nadzieją polskiego rolnictwa – właściwości, zastosowanie i szerokie spektrum działania” w ramach szkolenia *Topinambur, zdrowie i piękno z natury sposobem na rozwój obszarów wiejskich* zorganizowanej przez Świętokrzyską Izbę Rolniczą w Kielcach, J. Puła, A. Kliszcz (Skarżysko-Kamienna, 14.10.2020 r.)

4. Referat naukowy pt. „Słonecznik bulwiasty (*Helianthus tuberosus* L.) – fazy rozwojowe rośliny oraz aspekty produkcyjne” w ramach seminarium IFR PAN (Kraków, 25.06.2021 r.)
5. Referat szkoleniowy pt. „Zastosowanie topinamburu w gospodarstwie rolnym domowym” w ramach szkolenia *Topinambur, zdrowie i piękno z natury sposobem na rozwój obszarów wiejskich* zorganizowanej przez Świętokrzyską Izbę Rolniczą w Kielcach, J. Puła, A. Kliszcz (Skarżysko-Kamienna, 13.09.2021)
6. Szkolenie *Elementy proekologiczne EFA. Rozpoznawanie poszczególnych gatunków roślin międzyplonów w fazie siewek. Rozpoznawanie upraw wiążących azot w fazie siewki* dla pracowników BKM Śląskiego Oddziału Regionalnego ARiMR (Kraków, 6.09.2021 r.)
7. Warsztaty dla młodzieży pt. „Dżdżownice pod lupą” w ramach Małopolskiej Chmury Edukacyjnej (Kraków, 1.04.2023 r.)

Działalność w Kołach Naukowych

- Koło Naukowe Makroekonomii i Gospodarki Światowej (Uniwersytet Ekonomiczny w Krakowie, 2012, przewodniczący)
- Koło Naukowe Rolników – Sekcja Produkcji Roślinnej (Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, 2017-2018, członek)
- Koło Naukowe Rolników – Sekcja Agroekologii (Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, od 2023, współopiekun)

Referaty wygłoszone w ramach Ogólnopolskiej Sesji Kół Naukowych 2017:

- Ekofizjologiczne aspekty kielkowania różnych populacji chwastnicy jednostronnej i owsa gładkiego, A.Kliszcz
- Ocena kielkowania barszczu Sosnowskiego po dłuższym okresie zalegania na dnie dwóch różnych cieków, N. Cygan, A.Kliszcz
- Wpływ stosowania regulatorów wzrostu na kielkowanie i rozwój nasion grochu ozimego *Pisum sativum* L, A. Ślizowska, D. Kot, A. Kliszcz, (wyróżnienie I i II miejsce)

Działalność organizacyjna

1. Udział w organizacji X Krakowskich Dni Integracji (7.04.2017 r.)
2. Udział w organizacji XLI Konferencji Naukowej „Rejonizacja chwastów segetalnych w Polsce” (Kraków, 3-4.07.2017 r.)

3. Udział w organizacji i prezentacji stoiska wydziałowego podczas Festiwalu Nauki i Sztuki w Krakowie w latach 2017 i 2018 (24-27.05.2017 r., 17-19.05.2018 r.)
4. Udział w organizacji i prezentacji stoiska wydziałowego podczas Dni Otwartych URK w latach 2017 i 2018 (21.03.2017 r., 21.03.2018 r.)
5. Udział w organizacji Małopolskiej Nocy Naukowców w latach 2017 i 2018 (29.09.2017 r., 28.09.2018 r.)
6. Udział w organizacji warsztatów międzynarodowych pt. "Studies of soil properties under the long-term organic and conventional farming in the mountain conditions of southern Poland" w ramach *Workshops on long-term agricultural effects on soils, as the natural resources of sustainability*, Visegrad Grant no 21720051 (14-15.05.2018 r.)
7. Doprowadzenie do podpisania porozumienia o współpracy (Sygn. C/103/2021/WRE) pomiędzy Uniwersytetem Rolniczym w Krakowie a Katolickim Uniwersytetem Lubelskim Jana Pawła II w Lublinie (24.05.2021). (Umowa dostępna w Centralnym Rejestrze Umów URK pod datą rejestracji 27.04.2021 r.)
8. Członek Komisji ds. Jakości Kształcenia na Wydziale Rolniczo-Ekonomicznym URK (od marca 2019)
9. Członek Międzynarodowej sieci GEO BON (od marca 2022)
10. Członek Rektorskiej Komisji ds. wdrożenia Europejskiej Karty Naukowca i Kodeksu Postępowania przy rekrutacji pracowników naukowych w Uniwersytecie Rolniczym im. Hugona Kołłątaja w Krakowie (od kwietnia 2023)

11. Publikacje wchodzące w skład rozprawy doktorskiej
i oświadczenia autorów

Publikacja 1

The change of pH value and *Octolasion cyaneum* Savigny earthworms' activity under stubble crops after spring triticale continuous cultivation

Kluszcz, A., and Puła, J. (2020). The Change of pH Value and *Octolasion cyaneum* Savigny Earthworms' Activity under Stubble Crops after Spring Triticale Continuous Cultivation. *Soil Systems* 4(3): 39.
<https://doi.org/10.3390/soilsystems4030039>

Oświadczenie współautora

Oświadczam, że w wymienionej publikacji mój wkład polegał na: opracowaniu metodologii, gromadzeniu danych i zasobów, recenzji i redakcji manuskryptu, nadzorze, pozyskaniu funduszy na publikację artykułu.

Udział – 20 %

Dr hab. Inż. Joanna Puła, Prof. URK



Oświadczenie doktorantki

Oświadczam, że w wymienionej publikacji mój wkład polegał na: konceptualizacji doświadczenia, walidacji, analizie formalnej, gromadzeniu i zarządzaniu danymi, napisaniu pierwotnego tekstu artykułu, a następnie recenzji i redakcji manuskryptu, tłumaczeniu tekstu i korekcie językowej manuskryptu po recenzjach, wizualizacji danych, nadzorze, pozyskaniu funduszy na przeprowadzenie badań, koordynacji administracyjnej przebiegu badań i publikowania.

Udział – 80 %

mgr inż. Angelika Kluszcz





Article

The Change of pH Value and *Octolasion cyaneum* Savigny Earthworms' Activity under Stubble Crops after Spring Triticale Continuous Cultivation

Angelika Kliszcz * and Joanna Puła

Department of Agroecology and Crop Production, University of Agriculture in Cracow Mickiewicz Ave. 21, 31-120 Cracow, Poland; rrpula@cyf-kr.edu.pl

* Correspondence: angelika.kliszcz@student.urk.edu.pl

Received: 1 June 2020; Accepted: 30 June 2020; Published: 4 July 2020



Abstract: The changes of pH value followed by various agricultural practices are crucial for biotic components of soil, along with other environmental factors, like temperature and moisture content. In this paper, the earthworms population in triticale continuous cultivation was monitored. Their presence associated with various agrotechnical methods (e.g., stubble crops maintained as mulch, mineral fertilization without pesticides) were assessed twice by the handsorting method, and their presence during the triticale vegetation season (occurrence of coprolites) were monitored too. The aim of the study was to analyse the distribution of earthworm populations in cereal continuous cultivation fields, and whether they prefer any of the stubble crop species (*Sinapis alba* L., *Phacelia tanacetifolia* Benth., *Fagopyrum esculentum* Moench.), which were sown after triticale harvest. The results reveal the most abundant earthworms occurrence in the *F. esculentum* objects (43.1% of all sampled earthworms, which consists of 42% and 47.2% of all sampled matured and juveniles individuals, respectively), and species homogeneity (dominate *Octolasion cyaneum* Savigny, 1826). The changes of pH varied through the triticale vegetation season, but didn't exhibit severe variation between sampling sites. Using earthworm services in cropping systems after having enticed them to the field through stubble crop has the potential to boost agricultural sustainability. Their ecological preferences, along with their trophic behaviour, have already been put in place to complete a case study of the autecology of the *O. cyaneum* Savigny 1826 species.

Keywords: *Octolasion cyaneum* Savigny; mustard; buckwheat; phacelia; triticale continuous crop; soil pH; earthworm abundance

1. Introduction

Earthworms are a key factor in supporting soil system services. They improve soil structural stability, modify soil organic matter and nutrient cycling or induce the production of hormone-like substances that improve plant growth [1,2]. According to Paoletti [3] and Curry et al. [4], earthworm populations in cultivated land are generally lower than those found in undisturbed habitats. The presence, activity and biodiversity of earthworms in the cultivated field may be limited by the intensification of cultivation treatments [5] or the use of herbicides [6,7]. However, the introduction of additional plant biomass into fields, e.g., in the form of stubble crops, serves as an additional food source and can contribute to an increase in the earthworm population in cereal cultivation after itself. This positive relation of additional biomass for earthworms was found by Riley et al. [8], Froseth et al. [9], Buck et al. [10] when earthworm abundance in lupine stands, grasses, and legumes was analysed.

During vegetation season, any agrotechnical treatments shaped the soil system in particular ways and influenced the value of soil parameters, like pH, moisture content, temperature. Tillage may

saturate soil, mix the layers of aerobic and anaerobic microorganisms, and destroy persistent vertical galleries of anecic earthworm species (as well as horizontal endogeic-derived biopores, but they could be restored faster during crop vegetation). Ploughing the aboveground biomass causes the immediate supplying, in soil, of living forms (mainly microorganisms and mesofauna) with proteins, sugars, fat-like substances, and ions, which also initiate POM (*particulate organic matter*) formation in the soil, the first form of SOM (*soil organic matter*).

Applying any substances (fertilizers, pesticides, soil and plant enhancers) influences the hot-spot mosaic in the soil. Kuzyakov and Blagodatskaya [11] defined hot-spots as a local clusters of microorganisms that cooperate in common area and shape it in particular way, varied from adjacent bulk soil. They are the crucial and basic organizational form of microbial activity in the macroscale (field) perspective. Their presence in the soil is sought by the earthworms, probably with strength proportional to the palatability of these microorganisms for earthworms. They can spread the microbial strains throughout the area they occupy, and that function seems to be one of the most prominent skills of earthworms sought in future agriculture. Moreover, the “fertilization only” variant is tested in agriculture along with agrotechnical methods (cover, stubble crops, intercrops and mulches) avoiding negative effects of pesticides. Many indicators of soil health also include the welfare level of earthworms’ field occurrence [3,12–14].

Stubble crop has many positive functions in the soil system, mainly through enhancing the soil C pool, accelerating microbial life, positively shaping soil structure. Fast growing species cover stand with pronounced biomass and prevent soil moisture from escaping. These features include white mustard (*Sinapis alba* L.), tansy phacelia (*Phacelia tanacetifolia* Benth.), and buckwheat (*Fagopyrum esculentum* Moench.). But even application of milled (<3mm) cereal straw may result in enhanced earthworm growth rates more than farmyard manure, due to their much higher calorific value [15].

The aim of the study was to assess earthworms’ activity in continuous cereal tillage cultivation as well as their preferences for tested stubble crops along with recorded environmental features.

2. Material and Methods

2.1. Description of Experimental Set Up

The background for earthworm samplings and soil analyses was a field experiment located in the Experimental Station of the University of Agriculture in Cracow conducted in 2018–2019 (50.085264 N, 19.833110 E). Before 2017, the field was maintained as an ecological system for 10 years (tillage occurred). The present experiment consists of three factors arranged as split-split-plot design, where the spring triticale (*xTriticosecale* Wittm. ex A. Camus var Mamut) was cultivated after itself for two years (2018–2019). The following stubble crop species: white mustard *Sinapis alba* L. var. Borowska, tansy phacelia *Phacelia tanacetifolia* Benth. var. Stala, buckwheat *Fagopyrum esculentum* Moench. var. Kora, were sown twice, in 2018 and 2019 (first factor), although earthworm sampling procedure was performed in 2019 only. The second factor of experimental design, stubble crop termination term, had two levels: autumn and spring (mulch). In addition, the cultivation of spring triticale was managed in three ways (third experimental factor): Natural-without fertilization and pesticides (NAT), mineral fertilization only (NPK 80:80:120) (MF), and mineral fertilization (NPK 80:80:120) with subsequent pesticides application (PEST). Graphical description of experimental design is presented in Figure S1 (Supplementary Material). The pesticides were applied twice during the vegetation season of triticale (in the tillering phase—BBCH 21–22: herbicide Puma 1 l·ha⁻¹ (a.i. *fenoxaprop-P-ethyl* 69 g·l⁻¹ (6.54%)) and Mustang 306 0.6 l·ha⁻¹ (a.i. *florasulam* 6.25 g·l⁻¹ and 2,4-D EHE 300 g·l⁻¹), and in the heading phase—BBCH 59: fungicide (a.i. *protiokonazol* 53 g·l⁻¹ (5,4 %), *spiroksamine* 224 g·l⁻¹ (22,9 %), *tebukonazol* 148 g·l⁻¹ (15,1 %)) and insecticide Dursban 480EC (a.i. *chloropiryfos* 44,86%). The P and K mineral fertilizers were applied before the sowing of triticale (along with the first, bigger part of N fertilization); the second N fertilization dose was applied in BBCH 33–37 of the triticale phases.

2.2. Soil Analysis

Measurement series of pH value (Figure 1) were collected in situ with the IJ44A IONODE pH electrode (ELMETRON, Australia) equipped with a CP 401 pH meter (ELMETRON), once a week (March 2019–July 2019) in the following phenological terms: 1—before spring tillage (mulch), 2—after tillage, 3—two weeks after tillage, 4—one day before sowing triticale, 5—sowing and mineral fertilization, 6—BBCH 5 (start of triticale germination), 7—BBCH 10 (development of leaves), 8—BBCH 11, 9—BBCH 12, 10—BBCH 13 and herbicide application, 11—BBCH 22, 12—BBCH 30–37 (stem elongation and flag leaf appearance) and second dose of N fertilization, 13—BBCH 41–43 (booting phase), 14—BBCH 59 (heading phase), 15—BBCH 71 (seed development), 16—BBCH 89–92 (triticale harvest). The time between terms was named in this article as subsequent ‘periods’ and the last measurement series (‘after triticale harvest’) was collected three weeks after the previous one. Chemical and physical features of soil are depicted in Table 1. Soil samples were taken from topsoil (to 0.3 m). C org (%), N tot (%) and S tot (%) were analysed using Vario Elementar and the averaged content of CaCO₃ (%) according to Scheibler’s method [16]. Granulometric fractions were assessed using Casagrande’s areometric method with modification by Prószyński [17].

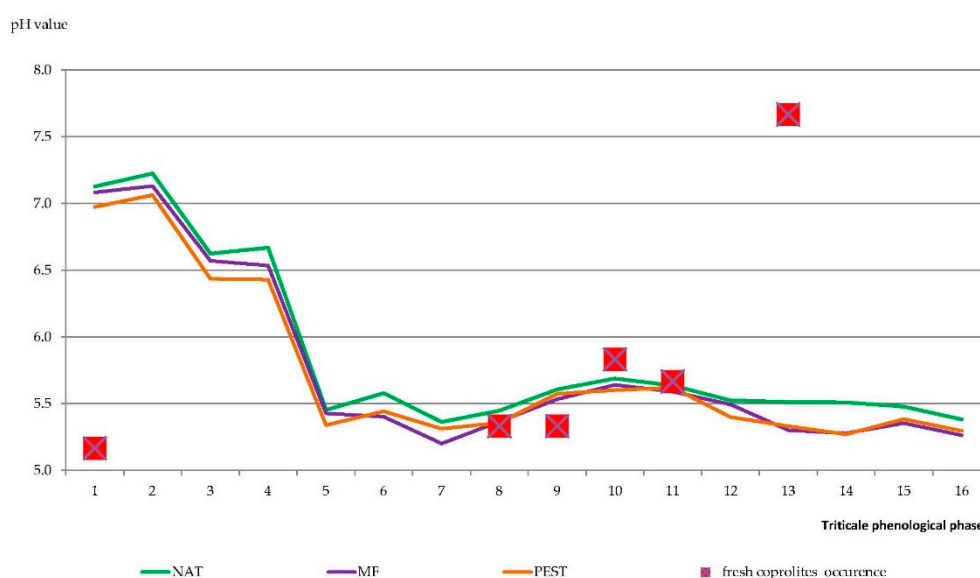


Figure 1. Continuous measurements of pH value in earthworm sampling sites (March 2019–July 2019) according to different triticale management methods. * The distance of red dots from the x-axis represents abundance of monitored sites where fresh coprolites were occurred in the particular terms; the lack of red dots means no fresh coprolites at the monitored sites.

Table 1. Soil characteristics description.

Parameter	Value
C org (%)	0.70
N tot (%)	0.63
S tot (%)	0.01
CaCO ₃ %	0.05
Granulometric fractions:	
Sand:Silt:Clay (%)	81.0:15.5:3.5

2.3. Earthworm Sampling and Identification

Activity of earthworms (presence of fresh coprolites) was monitored in the field every pH measurement series (three times within each plot, $n = 54 \times 3 = 162$), and showed as red dots in Figure 1. Then, after harvest of triticale (July 2019) the samplings from each plot (one per plot, assumed to be

three samplings per object) was conducted within a frame (0.5×0.5 m; 0.4 m in depth); the vegetation cover was excavated. The distance between sampling sites was several meters. The handsorting method was chosen only, due to dryness of soil (many individuals were in diapause) and problems with proper infiltration of mustard suspension. Moreover, in this field, abundance of anecic species are not expected due to tillage occurrence. So, the best sampling procedure in these conditions was handsorting. The sampled earthworms were kept in plastic boxes, transported to the laboratory, maintained for clearing the gut content in cold conditions, and then manipulated to obtain fresh biomass of all life stages groups according to their number (cocoons, hatchlings, juveniles, pre-matured individuals, and matured adult individuals with clitellum well developed). All results for 0.25 m^2 were adjusted for 1 m^2 area. Among all caught individuals, *O. cyaneum* Savigny, 1826 totally dominated (there were a few unrecognized endogeic or anecic ones and only one individual from the epigeic group). The species identification was performed according to Pilsko [18] and Kasprzak [19].

This whole procedure was performed twice, after harvest of triticale (before sowing of stubble crops) and during the vegetation of stubble crops (10 weeks after the previous sampling procedure). The second sampling site within the plot (12 m^2) was designed 5 m from the previous sampling site. There were three replications of earthworm sampling within the plot in each series. The whole experimental area was 2025 square meters.

2.4. Weather Conditions and Soil Moisture

Air temperature (T_a , °C) and precipitation (P , mm), as well as soil temperature (T_s , °C) and soil moisture (M_s , %) were monitored during vegetation season. Figure 2. shows environmental conditions for sampling sites of earthworm occurrence in the field. T_a and P were obtained from Kraków-Balice Meteorological Station, IMGW-PIB (no. 350190566, 4.7 km far from experimental area) and computed as periods average (T_a , °C) and periods sum (P , mm). Soil measurements were recorded in earthworm sampling sites precisely. They were taken in the triticale rhizosphere layer (5 cm in depth) with the SM150 Kit soil moisture sensor (Delta-T Devices), and CT2B-121 temperature sensor (ELMETRON) attached to a pH meter; recordings were taken once a week (except the last one, which was collected three weeks after the previous one). The additional soil moisture measurements were recorded at the bottom of soil monoliths handsorted in the second sampling time (in stubble crops), at the depth of 40 cm.

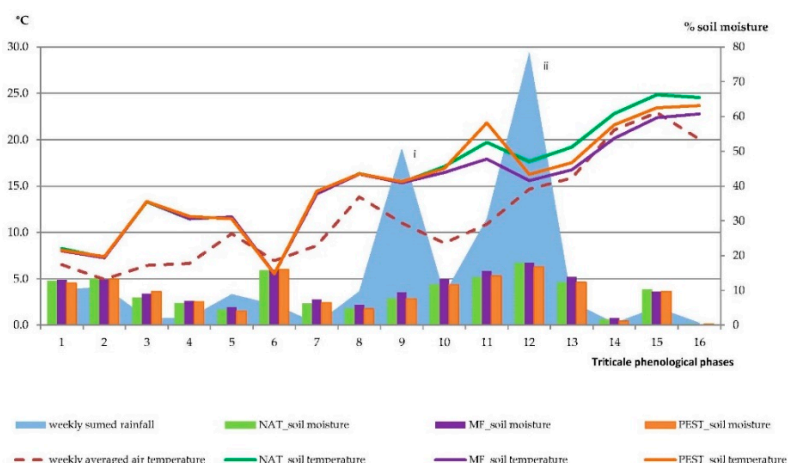


Figure 2. Above- and underground thermal-humidity conditions of sampling sites. ⁱ $P = 50.69$ mm, ⁱⁱ $P = 78.37$ mm.

2.5. Statistical Analyses

For earthworm biomass ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$) parameters and two sampling terms, a Wilcoxon matched-pairs test ($\alpha = 0.05$) was performed using Statistica PL ver. 13.1, StatSoft, Krakow, Poland. Coefficients of

variation were also computed to illustrate the degree of homogeneity of the results (Table 2.) All of the graphical outputs were performed with MS Excel Tools (including a radar chart).

Table 2. The changes in earthworm presence as a fresh biomass parameter ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$) within 10 weeks in various stands.

Stubble Crop Species ⁱⁱ	Tillage Term	Triticale Management ⁱ	Earthworm Biomass ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$) After Triticale Harvest ⁱⁱⁱ	Earthworm Biomass ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$) in Stubble Crops
White mustard	autumn	NAT	0.00 (0)	0.00 (0)
		MF	0.00 (0)	2.43 (173)
		PEST	0.00 (0)	1.87 (173)
	spring	NAT	0.56 (151)	4.72 (28)
		MF	4.15 (87)	9.96 (108)
		PEST	0.15 (173)	1.42 (173)
Buckwheat	autumn	NAT	0.03 (173)	0.13 (173)
		MF	1.24 (173)	9.45 (77)
		PEST	5.65 (172)	2.35 (162)
	spring	NAT	0.49 (173)	2.06 (173)
		MF	0.02 (173)	8.15 (87)
		PEST	0.75 (118)	5.97 (63)
Tansy phacelia	autumn	NAT	2.27 (161)	2.05 (151)
		MF	1.35 (173)	6.89 (119)
		PEST	1.34 (88)	3.66 (107)
	spring	NAT	0.00 (0)	2.29 (173)
		MF	3.25 (82)	2.59 (94)
		PEST	1.33 (167)	1.41 (173)

ⁱ NAT = natural; MF = Mineral fertilization; PEST = mineral fertilization + pesticide; n = 3, ⁱⁱ Wilcoxon matched-pairs test $\alpha = 0.05$, $p = 0.005618$, ⁱⁱⁱ coefficient of variation is presented in brackets, high values occurred when no t all replicates reported the earthworms' presence.

3. Results

As the results of samplings were obtained from the tillage system area, the output of earthworm individuals is relatively low, contrary to those acquired from pasture [20] or other permanent crops [9]. But even in agricultural lands, where ploughing treatments were employed, the presence of earthworms is visible. The ploughed continuous cereal stands belong to the poorest stands for soil organisms due to the necessity of plant protection treatments, soil fatigue, losses of nutrients. The fresh biomass of earthworms ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$) collected from triticale stands varied correspondingly to the management method of triticale (Table 2). Immediately after the terminating of triticale plants, the highest amount of this parameter occurred in MF objects (on average $1.67 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$). The lowest earthworm fresh biomass was obtained from NAT objects (on average $0.56 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$). The introduction of stubble crops on these stands enhanced the average biomass sampled within each square meter, although the tendency remained the same, i.e., the highest value occurred in MF objects $6.58 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$, and the lowest in the NAT objects, on average $1.87 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$. The earthworm preference of particular stubble crops species is presented in detail on the random chart (Figure 3).

The most preferred species was buckwheat (*Fagopyrum esculentum*) (Figure 3B) due to 43.1% of earthworms of all life stages being collected in plots covered by buckwheat. Tansy phacelia rhizosphere enticed 30.3% of all earthworms, and mustard plants only 26.6%. Cocoons were observed only in the first sampling term (after triticale harvest) (Figure 3A). The plots prepared for buckwheat contain 53.3% of all cocoons (Figure 3A), which gives, after 10 weeks, 42.0% of all juveniles in buckwheat stands as the hatchlings constituted a negligible part of the population in stubble crops' rhizosphere (eight individuals in total). The abundance of earthworm's life cycle structure reveal two main directions (increases and decreases of particular life stages). During 10 weeks, matured earthworms statistically significantly enhanced four times in all objects (Wilcoxon matched-pairs test $\alpha = 0.05$, $p = 0.005618$), of which the most grew in buckwheat stands (by 55%). Then, the juveniles increased almost two fold, giving again the most abundant group penetrating the buckwheat area (by 49%). The negative

changes were recorded in cocoons (as above), hatchlings, and pre-matured individuals. Taking into consideration the type of stand (stubble crop species), it could be stated that hatchlings dropped the most in tansy phacelia sites (by 58%), and pre-matured earthworms have developed into matured forms rather than escaped from buckwheat stands (57% decrease in this group in buckwheat stands compared to 55% increase in matured forms in buckwheat) (Figure 3A,B).

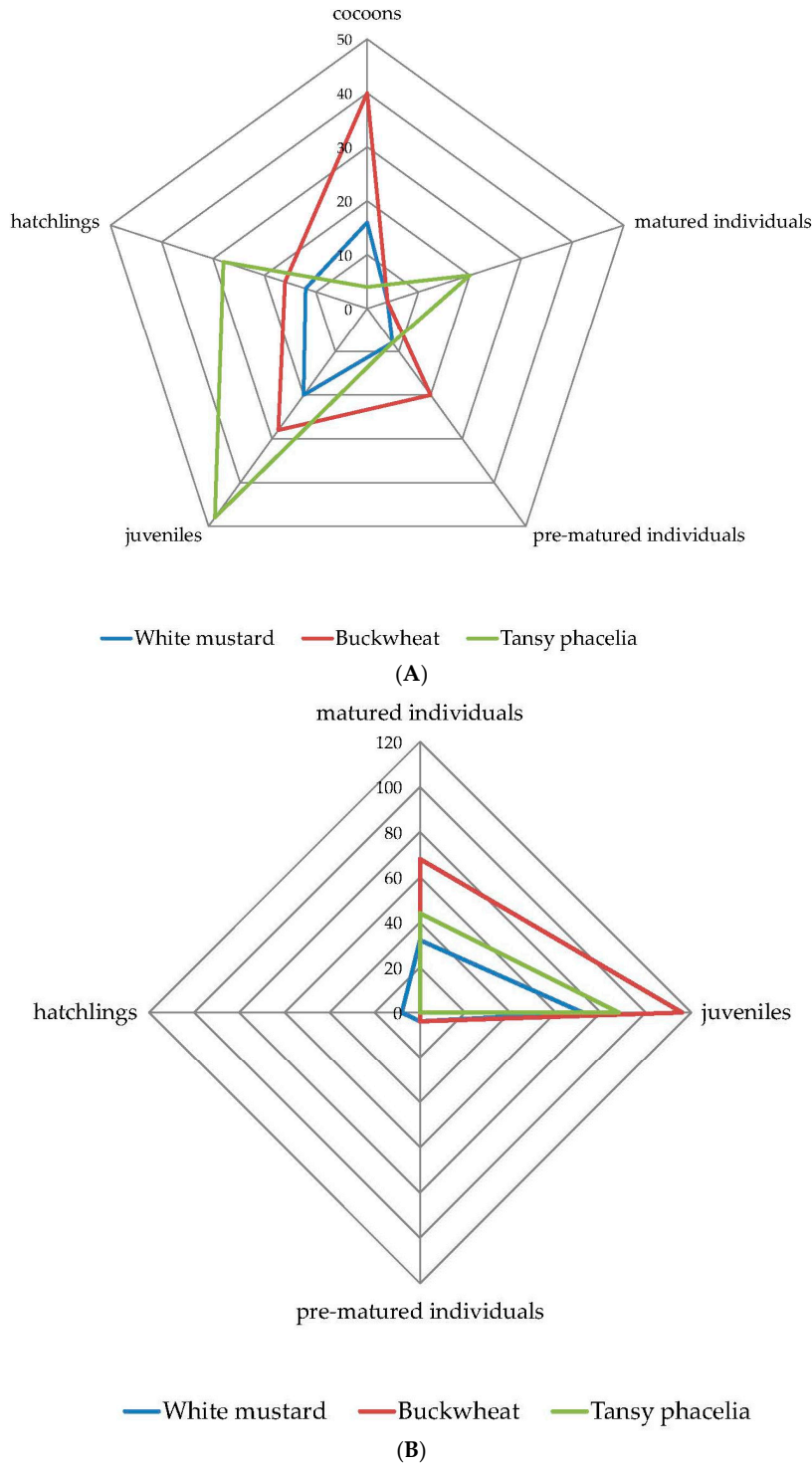


Figure 3. Earthworm’s life cycle abundance and their changes within 10 weeks, (A) after triticale harvest, (B) in stubble crops.

The changes of soil pH during the experiment is depicted in Figure 1. Stands without either fertilization or pesticides had a little higher pH value with no significant difference between objects. During the whole vegetation season (after sowing till harvest) pH values oscillated between 5.20 and 5.69 and seem to be a constant parameter for developing earthworm individuals. It is worth noting that values from a higher range have always been taken from objects' NAT. The median pH value for NAT, MF, and PEST objects were, respectively, 5.51, 5.39, and 5.37 (Figure 1).

During the whole vegetation season, the occurrence of fresh coprolites was monitored. Figure 1 contains the overall results of field inspection (the bigger the distance of red dots from the *x*-axis, the more frequent the occurrence of coprolites). The most frequent occurrence of coprolites during all seasons on buckwheat stands (51%) were recorded (unpublished data). The other two stubble crop species contained within their area 39% of the fresh coprolites (tansy phacelia) and 10% (white mustard). The peak of produced coprolites coincided with the booting phase of triticale (BBCH 41–43) (Figure 1) and bigger rainfalls before (Figure 2).

Comparing the values of soil moisture recorded in triticale (Figure 2) to those obtained in stubble crops (Table 3), the more preferable environment for earthworms in more dense cover (stubble crops) is highlighted (in the range between 10.53 and 15.10%; median equal to 12.84%). The 'bottom' moisture (see: '2.4 Weather conditions and soil moisture') range was between 14.10 and 16.57% (16.19% value of median) and those recordings suggest the earthworms were forced to choose between fresh organic matter in the plant rhizosphere and higher humidity in the deeper layers of the soil profile. The depth of arable layer in all sites was on average 34.2 cm (± 3.97).

Table 3. Soil moisture and depth of arable layer in sampling sites in the second sampling series (in stubble crop stands).

Stubble Crop Species	Tillage Term	Triticale Management	Moisture (%)		Depth of Arable Layer (cm)
			at the Top	in the Bottom	
of Sampled Soil Monoliths in Stubble Crops					
White mustard	autumn	NAT	11.97 \pm 0.404	14.10 \pm 0.361	28
		MF	12.03 \pm 2.303	14.27 \pm 2.203	35
		PEST	14.63 \pm 3.493	16.37 \pm 1.457	40
	spring	NAT	14.30 \pm 0.954	16.20 \pm 2.778	40
		MF	14.90 \pm 0.608	16.53 \pm 0.611	34
		PEST	15.10 \pm 0.458	15.83 \pm 1.002	34
Buckwheat	autumn	NAT	12.50 \pm 1.389	15.03 \pm 1.159	33
		MF	11.50 \pm 3.005	14.40 \pm 2.600	36
		PEST	12.97 \pm 3.386	15.60 \pm 0.400	39
	spring	NAT	12.70 \pm 1.015	16.03 \pm 1.210	28
		MF	13.23 \pm 2.470	16.27 \pm 1.206	29
		PEST	11.47 \pm 2.403	16.33 \pm 1.724	35
Tansy phacelia	autumn	NAT	12.80 \pm 2.718	16.17 \pm 1.739	31
		MF	12.87 \pm 1.890	16.37 \pm 1.582	31
		PEST	14.43 \pm 0.981	16.37 \pm 0.379	38
	spring	NAT	12.57 \pm 1.457	16.57 \pm 1.747	37
		MF	13.47 \pm 1.943	15.87 \pm 3.009	30
		PEST	10.53 \pm 2.483	16.20 \pm 0.529	37
average		13.00 \pm 1.283	15.81 \pm 0.802	34.2	

* n = 3, \pm standard deviation (*sd*); objects' descriptions as in Table 2.

4. Discussion

Determining ecological preferences of particular earthworm species, along with their trophic behaviour, is assumed as the complete earthworm autecology approach. In the field conditions, where tillage occurred, their abundance is minimalized along with agrotechnical intensifications and frequency of plant protection treatments [5,6,21]. Moreover, cereal monocultures do not promote considerable amounts of earthworms [15]. The results revealed low amounts of earthworm biomass

(average of all objects equals $1.25 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$) and strong domination of the *O. cyaneum* Savigny species (above 95% of all sampled earthworm individuals; unpublished data). However, anthropogenic factor may have also enhanced soil fertility, even in difficult stands, i.e., monoculture. The introduction of stubble crops is a common good practice, which supplies soil systems with additional portions of fresh organic material [22], mobilizes rhizospheric organisms through root exudates, interrupts soil fatigue (phytosanitary plants) and can limit agricultural pests through allelopathic substances. According to studied stubble crop species, all of them act as weed suppressors; additionally, buckwheat and white mustard limit development of *Elateridae* larvae (wireworm) and nematodes, respectively [23].

Among the tested stubble crops, buckwheat enticed earthworms (particularly *O. cyaneum* Savigny) the most (Figure 3B). With regard to Froseth et al. [9], earthworm density was increased when grass and *Trifolium pratense* were left in the field as a mulch. The authors demonstrated that the number of earthworms increased 1.4 to 2.6 times in the first year after mulching. The earthworm biomass increased 1.2 to 3.3 times relative to the control (without mulches). In the present study, the term of ploughed stubble crops (2nd factor) didn't differentiate the earthworm harvest in the first year of mulch occurrence. The obtained results didn't reveal considerable variations in moisture content (Table 3), which could be interpreted as a stable water consumption within the studied stubble crop species.

Agricultural environment shaped by various abiotic factors is the second crucial factor of earthworms' development. Sanchez et al. [24] tried to determine the autecology of 28 earthworm species along with 22 soil factors. The ecological profiles technique revealed a preference of *O. cyaneum* for high values of porosity and C content, as well as lower pH values, which could be partly in line with our results due to the sandy medium of experimental area (Table 1). Palm et al. [20] constructed boosted regression tree models (BRTs) for predicting the distribution of ecological groups of earthworms (i.e., anecic, endogeic, and epigeic *sensu* Bouché) and they assumed that management practices, soil conditions and biotic interactions with other earthworm groups are the most important predictors for spatial distribution patterns. They also found little positive relationship between ploughing and endogeic frequency.

On the other hand, various species of endogeic earthworms can prefer the areas of particular plant species. This mechanism is, however, not yet thoroughly understood. First of all, earthworms communicate with the surrounding environment through the skin, which serves mainly as a breathing medium for them and their neuroreceptor-embedded surface. The mechanism of how the earthworms decided to consume encountered particles remains unrecognized. With regard to this issue, a few studies were performed. The vast majority of studies were carried out in laboratory [25,26]. Kliszcz and Puła [26] studied the ratio of food intake per 24 h to the average weight of the *L. terrestris* L. individuals, and the results revealed white mustard and buckwheat were more preferable (0.24 and 0.27, respectively) plants than tansy phacelia (0.14).

Field experiments are not so common due to many technical constraints and environmental factors. Ernst et al. [27] found the strongest reduction (by 36%) in biomass of *Octolasion tyrtaeum* in the occurrence of winter rape biomass (*Brassicaceae* family). This corresponds to the obtained results; the lowest amount of sampled individuals (and lower biomass $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$) revealed white mustard stand (the same plant family). It could be explained by the fact that the *Brassicaceae* family contains thioglycosides of volatile mustard oils in their tissues, which after being subjected to mechanical grinding and under the influence of the enzyme myrosinase, may decompose in white mustard to the toxic and irritating soft tissues *p*-hydroxybenzyl isothiocyanate [28].

Beside the type and chemical content of plant-derived organic matter, earthworms can choose the substrate by microbial species presence [29]. The palatability of microorganisms was studied by Dominguez et al. [30], Doube et al. [31], Neilson and Boag [32], Bonkowski et al. [33]. Jayasinghe et al. [34] found that *O. tyrtaeum* Savigny preferred organic matter inoculated with actinomycetes (*Streptomyces* sp.) in comparison with control (without inoculation).

O. cyaneum Savigny, the species found in the studied area, is an European omnipresent endogeic earthworm [20], which means that plant rhizosphere and horizontal galleries are the main habitat area

in the soil. For sure, it encounter many plant species, but it always has to make a choice between plants covered in a particular area. During unfavourable conditions (e.g., drought), however, its maintenance depends on diapause and burrowing down ability. They feed on fresh organic matter, microorganisms and consume large quantities of soil and accompanied organic residues [32], as well as can produced 1.88 mg dry wt·g⁻¹·fresh body of *Octolasion lacteum* wt·d⁻¹ [35]. Bonkowski et al. [33] found that the presence of *Cladosporium cladosporioides* attracts *O. cyaneum* 3 fold more than other fungal species. The obtained results indicated that the population of *O. cyaneum* may not develop the next generation (the lack of cocoons in stubble crops) before winter, when its development was limited by the moisture content during the triticale vegetation season.

5. Conclusions

A key biological component of the soil, earthworms, could be enticed by fresh root exudates derived from additional biomass sources in the field, like stubble crops in cereals, and they will also afterward benefit from stubble crop residues. After the first year of stubble crops, the presented results are slightly varied, but the tendencies could be seen: (i) During the whole vegetation season of triticale, the MF objects contain (after the triticale harvest) the highest earthworm biomass, (ii) After 10 weeks of recovery, the whole population of earthworms increased two fold (juveniles) and four fold (matured earthworms); (iii) The buckwheat rhizosphere seems to be the best stand for *O. cyaneum* Savigny, which chose these stands the most frequently (55% of all matured earthworms and 49% of all juveniles).

Stubble crops can serve as an enticement for particular earthworm species in agricultural intensively-managed fields, as well as being scrutinized in terms of their phytosanitary and pollinator function thus far.

Supplementary Materials: The following are available online at <http://www.mdpi.com/2571-8789/4/3/39/s1>, Figure S1: Graphic scheme of experimental design.

Author Contributions: Conceptualization, A.K.; Methodology, A.K., and J.P.; Writing—Original Draft Preparation, A.K.; Writing—Review & Editing, A.K.; Supervision, A.K. and J.P.; Funding acquisition, J.P. and A.K. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: The research was financed by the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Poland.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. Mudrák, O.; Frouz, J. Earthworms increase plant biomass more in soil with no earthworm legacy than in earthworm-mediated soil, and favour late successional species in competition. *Func. Ecol.* **2018**, *32*, 626–635. [CrossRef]
2. Angst, G.; Mueller, C.W.; Prater, I.; Angst, Š.; Frouz, J.; Jílková, V.; Peterse, F.; Nierop, K.G.J. Earthworms act as biochemical reactors to convert labile plant compounds into stabilized soil microbial necromass. *Commun. Biol.* **2019**, *2*, 441. [CrossRef] [PubMed]
3. Paoletti, M.G. The role of earthworms for assessment of sustainability and as bioindicators. *Agric. Ecosyst. Environ.* **1999**, *74*, 137–155. [CrossRef]
4. Curry, J.; Byrne, D.; Schmidt, O. Intensive cultivation can drastically reduce earthworm populations in arable land. *Eur. J. Soil Biol.* **2002**, *38*, 127–130. [CrossRef]
5. Briones, M.J.I.; Schmidt, O. Conventional tillage decreases the abundance and biomass of earthworms and alters their community structure in a global meta-analysis. *Glob. Chang. Biol.* **2017**, *23*, 4396–4419. [CrossRef]
6. Pelosi, C.; Toutousa, L.; Chiron, F.; Dubs, F.; Hedde, M.; Muratet, A.; Ponge, J.-F.; Salmon, S.; Makowski, D. Reduction of pesticide use can increase earthworm populations in wheat crops in a European temperate region. *Agric. Ecosyst. Environ.* **2013**, *181*, 223–230. [CrossRef]
7. Pelosi, C.; Barot, S.; Capowiez, Y.; Hedde, M.; Vandenbulcke, F. Pesticides and earthworms. A review. *Agron. Sustain. Dev.* **2014**, *34*, 199–228. [CrossRef]

8. Riley, H.; Pommeresche, R.; Eltun, R.; Hansen, S.; Korsæth, A. Soil structure, organic matter and earthworm activity in a comparison of cropping systems with contrasting tillage, rotations, fertilizer levels and manure use. *Agric. Ecosyst. Environ.* **2008**, *124*, 275–284. [[CrossRef](#)]
9. Froseth, R.B.; Bakken, A.K.; Bleken, M.A.; Riley, H. Effects of green manure herbage management and its digestate from biogas production on barley yield, N recovery, soil structure and earthworm populations. *Euro J. Agron.* **2014**, *52*, 90–102. [[CrossRef](#)]
10. Buck, C.; Langmaack, M.; Schrader, S. Influence of mulch and soil compaction on earthworm cast properties. *Appl. Soil Ecol.* **2000**, *14*, 223–229. [[CrossRef](#)]
11. Kuzyakov, Y.; Blagodatskaya, E. Microbial hotspots and hot moments in soil: Concept & review. *Soil Biol. Biochem.* **2015**, *83*, 184–199.
12. Rochfort, S.J.; Ezernieks, V.; Yen, A.L. NMR-based metabolomics using earthworms as potential indicators for soil health. *Metabolomics* **2009**, *5*, 95–107. [[CrossRef](#)]
13. Fründ, H.C.; Graefe, U.; Tischer, S. Earthworms as Bioindicators of Soil Quality. In *Biology of Earthworms*; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2011; pp. 261–278.
14. De Lima, A.C.R.; Brussaard, L. Earthworms as soil quality indicators: Local and scientific knowledge in rice management systems. *Acta Zool. Mex.* **2010**, *2*, 109–116.
15. Sizmur, T.; Martin, E.; Wagner, K.; Parmentier, E.; Watts, C.; Whitmore, A.P. Milled cereal straw accelerates earthworm (*Lumbricus terrestris*) growth more than selected organic amendments. *Appl. Soil Ecol.* **2017**, *113*, 166–177. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
16. Bauer, H.P.; Beckett, P.H.T.; Bite, W. A rapid gravimetric method for estimating calcium carbonate in soils. *Plant. Soil* **1972**, *37*, 689. [[CrossRef](#)]
17. Warzyński, H.; Sosnowska, A.; Harasimiuk, A. Effect of variable content of organic matter and carbonates on results of determination of granulometric composition by means of Casagrande's areometric method in modification by Prószyński. *Soil Sci. Annu.* **2018**, *69*, 39–48. [[CrossRef](#)]
18. Pilsko, J.D. *Fauna Poloniae. Lumbricidae*; PWN Publisher: Warsaw, Poland, 1973; pp. 88–98.
19. Kasprzak, K. *Skąposzczety Glebowe III. Rodzina Dżdżownicy: Lumbricidae*; Polish Academy of Sciences-Institute of Zoology, PWN: Warsaw, Poland, 1986; pp. 97–100.
20. Palm, J.; Van Schaik, N.L.M.B.; Schroder, B. Modelling distribution patterns of anecic, epigeic, and endogeic earthworms at catchment-scale in agroecosystems. *Pedobiologia* **2013**, *56*, 23–31. [[CrossRef](#)]
21. Ivask, M.; Kuu, A.; Sizov, E. Abundant of earthworm species in Estonian arable soils. *Eur. J. Soil Biol.* **2007**, *43*, S39–S42. [[CrossRef](#)]
22. Schmidt, O.; Curry, J.P.; Hackett, R.A.; Purvis, G.; Clements, R.O. Earthworm communities in conventional wheat monocropping and low-input wheat-clover intercropping systems. *Ann. Appl. Biol.* **2001**, *138*, 377–388. [[CrossRef](#)]
23. Noronha, C. Crop rotation as a management tool for wireworms in potatoes. *IOBC/wprb Bull.* **2011**, *66*, 467–471.
24. Sanchez, E.G.; Munoz, B.; Garvin, M.H.; Briones, M.J.I.; Cosin, D.J.D. Ecological preferences of some earthworm species in southwest Spain. *Soil Biol. Biochem.* **1997**, *29*, 313–316. [[CrossRef](#)]
25. Lowe, C.N.; Butt, K.R. Influence of organic matter on earthworm production and behaviour: A laboratory-based approach with applications for soil restoration. *Eur. J. Soil Biol.* **2002**, *38*, 173–176. [[CrossRef](#)]
26. Kliszcz, A.; Puła, J. Assessment of earthworms activity based on eaten biomass from selected catch crops. *Anna. Univ. Paedagog. Crac. Stud. Nat.* **2019**, *4*, 81–90. [[CrossRef](#)]
27. Ernst, G.; Henseler, I.; Felten, D.; Emmerling, C. Decomposition and mineralization of energy crop residues governed by earthworms. *Soil Biol. Biochem.* **2009**, *41*, 1548–1554. [[CrossRef](#)]
28. Sawicka, B.; Kotiuk, E. Gorcezyce jako rośliny wielofunkcyjne. *Acta Sci. Pol. Agric.* **2007**, *6*, 17–27.
29. Zirbes, L.; Thonart, P.; Haubruge, E. Microscale interactions between earthworms and microorganisms: A review. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* **2012**, *16*, 125–131.
30. Dominguez, J.; Briones, M.J.I.; Mato, S. Effect of the diet on growth and reproduction of *Eisenia andrei* (*Oligochaeta, Lumbricidae*). *Pedobiologia* **1997**, *41*, 566–576.
31. Doube, B.M.; Schmidt, O.; Killham, K.; Correll, R. Influence of mineral soil on the palatability of organic matter for Lumbricid earthworms: A simple food preference study. *Soil Biol. Biochem.* **1997**, *29*, 569–575. [[CrossRef](#)]

32. Neilson, R.; Boag, B. Feeding preferences of some earthworm species common to upland pastures in Scotland. *Pedobiologia* **2003**, *47*, 1–8. [[CrossRef](#)]
33. Bonkowski, M.; Griffiths, B.S.; Ritz, K. Food preferences of earthworms for soil fungi. *Pedobiologia* **2000**, *44*, 666–676. [[CrossRef](#)]
34. Jayasinghe, B.A.T.D.; Parkinson, D. Earthworms as the vectors of actinomycetes antagonistic to litter decomposer fungi. *Appl. Soil Ecol.* **2009**, *43*, 1–10. [[CrossRef](#)]
35. Scheu, S. The role of substrate feeding earthworms (Lumbricidae) for bioturbation in a beechwood Soil. *Oecologia* **1987**, *72*, 192–196. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]



© 2020 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Publikacja 2

Assessment of earthworms activity based on eaten biomass from selected catch crops

Kliszcz , A., and Puła, J. (2019). Assessment of earthworms activity based on eaten biomass from selected catch crops. *Annales Universitatis Paedagogicae Cracoviensis Studia Naturae*, 4(1), 81–90.
<https://doi.org/10.24917/25438832.4.4>

Oświadczenie współautora

Oświadczam, że w wymienionej publikacji mój wkład polegał na: recenzji i redakcji manuskryptu, nadzorze.

Udział – 10 %

Dr hab. inż. Joanna Puła, Prof. URK



Oświadczenie doktorantki

Oświadczam, że w wymienionej publikacji mój wkład polegał na: konceptualizacji doświadczenia, opracowaniu metodologii, walidacji, analizie formalnej, gromadzeniu i zarządzaniu danymi, napisaniu pierwotnego tekstu artykułu, a następnie recenzji i redakcji manuskryptu, tłumaczeniu tekstu i korekcie językowej manuskryptu po recenzjach, wizualizacji danych, nadzorze, koordynacji administracyjnej przebiegu badań i publikowania.

Udział – 90 %

mgr inż. Angelika Kliszcz



Angelika Kliszcz^{*}, Joanna Puła

University of Agriculture in Krakow, Department of Agroecology and Plant Production,
Mickiewicza 21 Ave, 30-120 Kraków, Poland; ^{*}angelika.kliszcz@student.urk.edu.pl

Assessment of earthworms activity based on eaten biomass from selected catch crops

Introduction

In order to preserve the homeostasis of the soil environment and increase its fertility, the presence and activity of soil mesofauna, especially earthworms, is an essential factor (family Lumbricidae Rafinesque-Schmaltz, 1815). By feeding on plant and animal residues, as well as microorganisms, earthworms form resources of soil organic matter that are permanently associated with the soil's mineral phase (Wu et al., 2018). A network of corridors formed by individual ecological groups of earthworms contributes to the regulation of water-air relations in soil. According to Bouché (1972), three main ecological groups of earthworms can be distinguished in the soil profile: anecic, endogeic and epigeic. For agroecosystems, the first two play a key role. Anecic species (e.g. *Lumbricus terrestris* L.) live deep in the soil profile (up to several meters) and form corridors with a further to the vertical slope, which communicate earthworms with a substantial food source, i.e. with plant debris left on the ground (e.g. in the form of mulch). However, their basic component of the diet is the mineral part of the soil, which they eat while drilling corridors. Their activity contributes to better water infiltration and the creation of 'fertile' corridors on the walls of which reside bacteria in the organic matrix left by earthworms (coprolytes, body's excrement). They are also weed seed vectors, which enriches the soil seed bank located at deeper levels. Endogeic species from the second ecological group intensify their activity in the arable soil layer, near plant roots (up to 30 cm deep) and create galleries with a horizontal slope, contributing to the formation of proper humus reservoir in the plant rhizosphere. Also these species are vectors of microorganisms and seeds in the inhabited area (Clause et al., 2017). They are also species that prefer a large proportion of organic remains in addition to the mineral part of the soil.

The presence and activity of earthworms in the cultivated field can be limited by the intensification of cultivation treatments (Briones, Schmidt, 2017) and the use of herbicides (Kostecka, 1999; Pelosi et al., 2014). The introduction of plant biomass into the field, for example in the form of catch crops, is an additional source of food and can contribute to an increase in the earthworm population. The presence and activity of earthworms increases the fertility of the soil habitat, which creates favourable conditions for the growth and development of crop plants.

Each animal selects, *per se*, the most rich in content – optimal food that it needs. For earthworms these are: plant and animal debris, living and dead soil organisms (bacteria, fungi, protozoa, algae, nematodes, amoebas) (Curry, Schmidt, 2007), as well as excrements of various living organisms, minerals, ions in the free state in soil solution. Penetrating the soil profiles of almost every square meter of soil on the Earth's surface, earthworms, when drilling corridors and taking food, decide what and in what quantity will be collected and processed by them. However, this fascinating mechanism of food preferences in earthworms is not yet fully understood. The first work on the trophic behaviourism of earthworms appeared in ancient times (Li et al., 2010), and the deliberations were continued with considerable publicity by Charles Darwin, who devoted the last 30 years of his life to studying the life and functions of earthworms in the process of forming soil organic matter. When food is consumed by the earthworm, a decisive role is played by a part of the neural ganglion, which is stimulated by chemical receptors located in the prostomium (above-mouth lobe) and from receptors on the entire body surface of the earthworm. These receptors provide the earthworm with information about the environment in which it is currently located. Generally, the trophic mechanism in the earthworm consists in collecting through the mouth, then swallowed pieces pass through pharynx, the esophagus and enter the crop, in which they are temporarily kept and mixed with a concentrated suspension of calcium carbonate produced by calciferous gland's secretory cells localised at the end of the esophagus. Next, the food goes to a heavily muscled stomach (gizzard), then passes into the intestine, from where it is excreted in the form of casts through the anus. Despite the absorption of nutrients by the body of the earthworm, droppings are a valuable and rich component of soil matrix and remain compact for a long time. It is interesting that despite high concentrations of phenolic compounds in plant material and their adverse effect on the precipitation of proteins in living organisms, plant biomass remains the main substrate for earthworms. The research of Liebeke et al. (2015) shows that drillodefensins (surface active lipophilic ions 259.1013 Da, which m/z are consistent with a molecular formula of $C_{12}H_{19}O_4S$) are produced in the earthworm body, which are produced in the foregut section of earthworms and help them digest phenolic-rich residues plant.

One way to assess the trophic activity of earthworms is to quantify their ability to eat food per unit of time. The aim of the study was to evaluate the possibility of processing food (mixed with soil catch crop residues from white mustard (*Sinapis alba* L.), buckwheat (*Fagopyrum esculentum* Moench) and tansy phacelia (*Phacelia tanacetifolia* Benth.) and crop biomass which was spring triticale (\times *Triticosecale* Wittm. ex A. Camus) by earthworms of the species *Lumbricus terrestris* L. regard to control object (soil from the field). An interesting further question concerned examining whether any of the plants can be preferred (more willingly taken) by earthworms, thus may supposedly contribute to an increase in their numbers in the field.

Material and methods

Study material

The model organism in the experiment were individuals of *Lumbricus terrestris*, a species from the anecic group, which are known for drawing plant organic matter from the soil surface into their corridors reaching 2 meters deep into the soil (Bogdanowicz et al., 2004), and that while burrowing corridors, they also pass a significant amount of the mineral part of the soil through the gastrointestinal tract (Rouse, 2016).

Assessment of food intake by earthworms

The assessment of food intake by earthworms was performed in laboratory conditions in experiment with Petri dishes. Earthworms were purchased from a commercial supplier (Ekagro) and kept for 4 hours in the dark (15°C) in a container with wet tissue paper to empty their digestive tract. Then 1 *L. terrestris* individual (average weight 4.99 g) was placed in one Petri dish (\emptyset 11 cm), in seven replications, and was incubated in a vegetation chamber (darkness, 18°C) in a completely randomised system. The food material (20 g per Petri dish) was air-dried fragmented plant biomass (7% w/w) sieved through a \emptyset 1 mm sieve and mixed with soil sterilised at 105°C which was sieved through a \emptyset 2 mm sieve and brought to field humidity (approx. 35%). The amount of food eaten by each individual was assessed after 12 h, 24 h and 63 h with an accuracy of 0.0001 g.

Before measuring each dish with food (7 replicates), the earthworm and wet paper were removed, then excrements and coprolites left on the Petri dish during the animal's activity were wiped with paper, and then the together with food was weighed (later subtract the weight of each dish). All results were corrected for values resulting from natural weight loss of food recorded simultaneously for objects without earthworms.

Statistical analysis

The results regarding the food intake of earthworms were analysed based on ANOVA with repeatable measurements and a grouping factor (food material) or one-way ANOVA (C and N content; ratio of food intake) and subjected to the Tukey HSD test at $\alpha = 0.05$.

Results and discussion

The dynamics and amount of food intake at 12-hour intervals (Fig. 1 A–B) indicates that this geophages species prefer soil as food. However, among the plant biomass supplements, earthworms most often took white mustard (*Sinapis alba* L.) (0.80 g after the first 12 hours). These food tendencies of earthworms remained until the end of the experiment, and this is all the more surprising because plants of the *Brassicaceae* Burnett family have thioglycosides of volatile mustard oils in their tissues, which after being subjected to mechanical grinding and under the influence of the enzyme myrosinase, may decompose in white mustard to toxic and irritating soft tissues p-hydroxybenzyl isothiocyanate (Sawicka, Kotiuk, 2007).

Tab. 1. Nitrogen (N) and carbon (C) content in the biomass of analysed plants and in soil

Object	N [%]	C [%]	C/N ratio
<i>Phacelia tanacetifolia</i> Benth.	1.81 ±0.018 b	40.04 ±0.004 c	22.1
<i>Sinapis alba</i> L.	1.94 ±0.032 a	42.18 ±0.170 a	21.8
<i>Fagopyrum esculentum</i> Moench	1.57 ±0.040 c	40.27 ±0.083 c	25.7
× <i>Triticosecale</i> Wittm. ex A.Camus (spring)	1.83 ±0.021 b	41.68 ±0.077 b	22.8
soil (control)	0.08 ±0.003 d	0.64 ±0.023 d	8.54

mean values ±SD, n = 3; different letters next to values indicate different homogenous group, HSD Tukey test, $\alpha = 0.05$

The third measurement, after more than 3-times a further exposure (63rd hour of the experiment), revealed even greater discrepancies in soil uptake (15.13 g) and soil with the addition of plant biomass (1.37 g on average). At 63rd hour of the study, there was a disruption in the metabolism of earthworms in the form of a secreted white substance in a facility with tansy phacelia (*Phacelia tanacetifolia* Benth.), which resulted in a lower uptake of eaten food than assessed after 24 hours and this also became the basis for the termination of the experiment.

The dynamics of food intake showed acceleration of consumption for some objects and exposure times, and sometimes earthworms took food constantly (Fig. 1). For example, tansy phacelia are characterised by increased intake dynam-

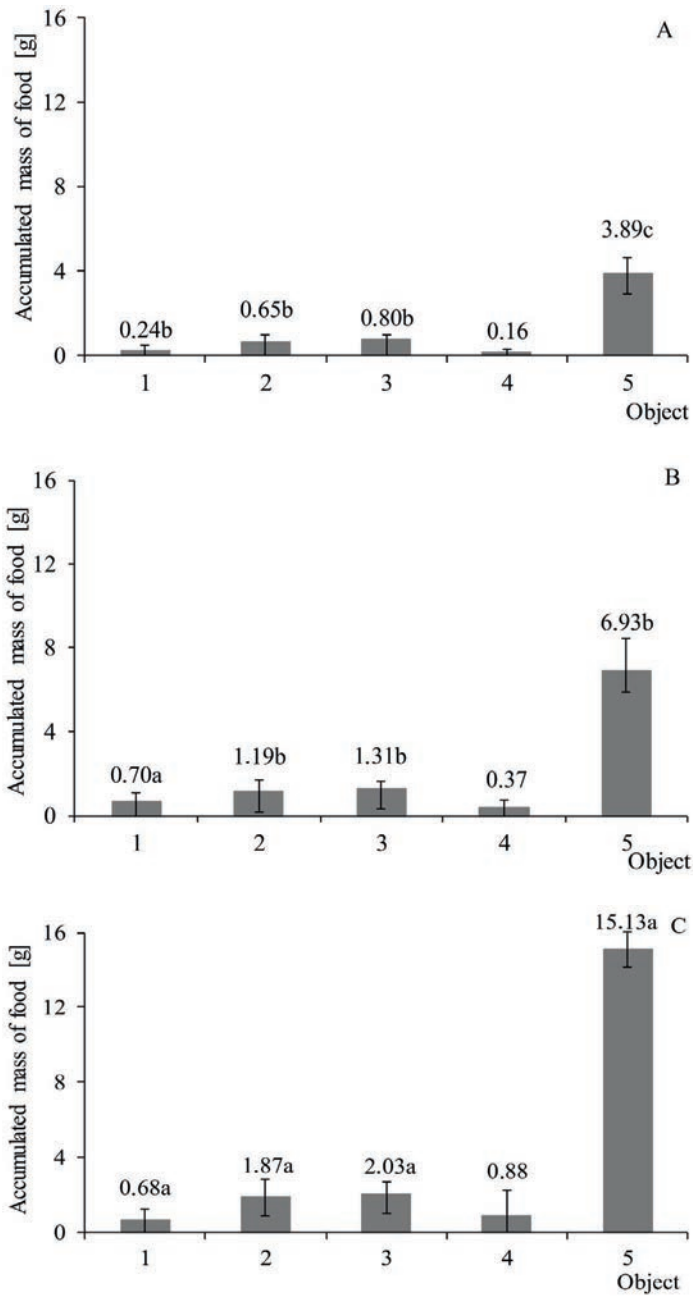


Fig. 1. Accumulated mass of food eaten by earthworms *Lumbricus terrestris* L. (A) after 12 hours, (B) after 24 hours, (C) after 63 hours, (n = 7); different letters next to values indicate different homogeneous group inside the one object with a time, HSD Tukey test, $\alpha = 0.05$; ** for \times Triticosecale p-value = 0.360579; object: 1 - *Phacelia tanacetifolia* Benth., 2 - *Fagopyrum esculentum* Moench, 3 - *Sinapis alba* L., 4 - \times Triticosecale Wittm. ex A.Camus, 5 - soil (control)

ics between 12 and 24 hours of exposure (190%), just as triticale between 12 and 24 hours (131%) and 24–63 hours (138%). White mustard and buckwheat were taken changeless at both time intervals, with more dynamic (though less quantitatively) uptake of buckwheat (83 and 57%, respectively) and balanced uptake dynamics for white mustard (57 and 55%, respectively).

Earthworms, as a biological component that increases soil fertility, are particularly valuable in soil and plant cultivation systems, in which it is not possible to increase this fertility by introducing fertilisers and soil conditioners into the system. This is the case in the organic farming system. Non-use of plant protection products and a larger amount of organic matter going back to the field mean that this system has a greater biodiversity, quantity and biomass of earthworms, although the plough tillage is a decisive factor (Bilalis et al., 2009; Munro et al., 2002). In this context, the conducted research may allow the identification of species-specific trophic behaviour of earthworms (food processing capability, intake dynamics) and estimation of the impact of the earthworm population and their trophic behaviourism on the positive (or negative) effect on the growth and development of plants in organic crops.

It should be noted, that the practice of leaving plant residues in the form of mulch on the soil surface has been known in agriculture for a long time and it is used now, especially in organic farming. Although, according to Jodaugiene et al. (2010) the largest amount and biomass of earthworms is concentrated under grass mulches (av. 185 number per m⁻² and 42.5 g×m² respectively), the selection of plants was not accidental in this experiment, because tansy phacelia, white mustard and buckwheat belongs to the plants widely used in organic farming, at least because of their phytosanitary properties in relation to commercial crops (Majchrzak et al., 2005).

Plants used in the food material used in the experiment were subjected to biochemical analysis for nitrogen and carbon content (Tab. 1). The data show that white mustard, which the earthworms took the most, also had the highest C/N ratio (25.7), while in spring triticale, whose intake was the most dynamic during the whole experiment, this ratio was at the level of 22.8.

A good estimator of the quantitative and qualitative food intake by earthworms is the ratio of the weight of food taken (per day) to the average body weight of the earthworm – F24/AWE (Tab. 2). Based on the obtained results, it was observed that the activity of earthworms increased more than threefold in objects with an addition of catch crop biomass in relation to spring triticale.

Tab. 2. Comparison of the ratio of food intake from various plant species during the 24 hours to the average body weight of the earthworm (*Lumbricus terrestris* L.); AWE – average weight of the earthworm, AWFT – average weight of food taken in total after 24 hours, F24/AWE – ratio of food intake per 24 hours to the average weight of the earthworm

Plant species	AWE [g]	AWFT [g]	F24/AWE
<i>Phacelia tanacetifolia</i> Benth.	5.00 ±1.022	0.70 ±0.365	0.14 b
<i>Fagopyrum esculentum</i> Moench	4.93 ±1.555	1.19 ±0.545	0.24 b
<i>Sinapis alba</i> L.	4.86 ±1.614	1.31 ±0.348	0.27 b
× <i>Triticosecale</i> Wittm. ex A.Camus (spring)	5.21 ±1.197	0.37 ±0.340	0.07 b
soil (control)	4.93 ±0.965	6.93 ±1.982	1.41 a
mean value for plants	5.00 ±1.375	0.89 ±0.557	0.18

average means ±SD, n = 7; different letters next to values indicate different homogenous group, HSD Tukey test, $\alpha = 0.05$

It is estimated that in maize cultivation in temperate climate, 100 individuals of *L. terrestris* species per 1 m² process on average 840 kg of litter per year (Bohlen et al., 1997). In this experiment, a new indicator, the decomposition rate, was used, which tells how many kilograms of food used (mixture of soil and plant biomass) pass through the digestive tract of 100 individuals per year, in this case *L. terrestris* (Fig. 2). It can be useful in estimating the contribution of individual soil fauna species to the transformation processes of the organic substance of the agroecosystem in a time interval. Estimation through this indicator gives the opportunity to assess the impact of a particular species, taking into account its synecology (population ecology), living in a given ecosystem and the ability to compare the effectiveness of organisms (including earthworms) in various crops. However, it is advisable to collect the organisms before calculating the decomposition index in order to estimate their real number in the studied area.

The most effective crops in terms of processing of plant biomass by earthworms of the species *L. terrestris* (assessment based on the calculated decomposition rate) would be white mustard and buckwheat (the highest values in figure 2). On the other hand, in quantitative terms, the biomass of cereal plants represented by spring triticale was almost three times less processed compared to other tested plants.

To correctly assess the impact of the earthworm population on the plant biomass cycle in the agroecosystem, it should be taken into account that earthworms as burrowers require more space for their activities, so that the spatial stress factor does not inhibit them from activity. Therefore, field experiments in the mesocosm system are the most commonly used in this type of research. On the other hand, laboratory experiments are short and reflect the food preferences of individuals quite well.

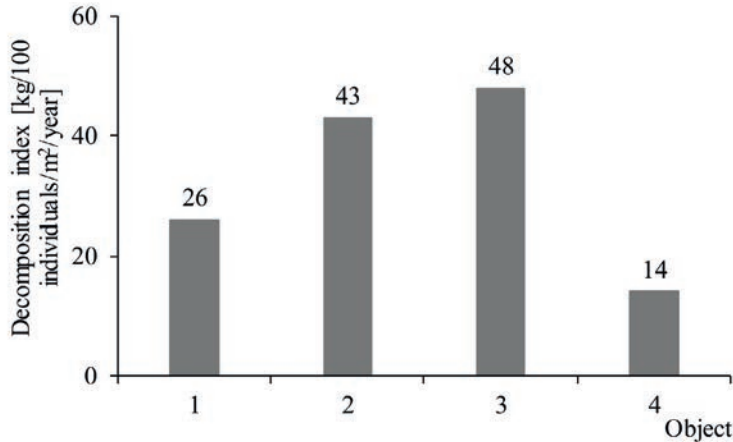


Fig. 2. Estimated average mass of food eaten by 100 individuals (*Lumbricus terrestris* L.) based on the results of a laboratory experiment; 1 – *Phacelia tanacetifolia* Benth., 2 – *Fagopyrum esculentum* Moench, 3 – *Sinapis alba* L., 4 – *×Triticosecale* Wittm. ex A. Camus

Conclusion

The conducted analyses show that *Lumbricus terrestris* shows food preferences in relation to crop biomass, as the eurybiont of many habitats in temperate climate. During the 63 hour experiment, soil (15.1 g) constituted the most food material collected by earthworms, and among the plant components – the one with the addition of *Sinapis alba* (2.03 g). However, the object with the addition of *×Triticosecale* spring was characterised by the highest consumption dynamics (the average of 135%). Food material with the addition of tansy phacelia was taken up the fastest in the first 24 hours (190%), but later it fell sharply until changes in animal metabolism were recorded.

The ratio of food intake per day to the average body weight of one earthworm exceeded the unity threshold (1.41) only in the case of the soil object. In other cases (non-cereal plants) it oscillated around 0.22 and only in triticale reached three times lower (0.07). The most favorable decomposition rate was recorded for white mustard, whose estimated amount of food eaten by earthworms (with a local population of 100 individuals) would be approximately 48 kg/m²/year in the field. The assessment of the possibility of food processing by earthworms, as well as the determination of their population in the field, can be very helpful in the organic farming system, where the biological component plays a key role in increasing soil fertility.

Acknowledgment

The research was financed from the funds of the Ministry of Science and Higher Education as a part of a subsidy (BM No. 2119).

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest related to this article.

References

- Bilalis, D., Sidiras, N., Vavoulidou, E., Konstantas, A. (2009). Earthworm populations as affected by crop practices on clay loam soil in a Mediterranean climate. *Acta Agriculturae Scandinavica Section B – Soil and Plant Science*, 59(5), 440–446. DOI: 10.1080/09064710802342327
- Bogdanowicz, W., Chudzicka, E., Pilipiuk, I., Skibińska, E. (2004). *Fauna Polski. Charakterystyka i wykaz gatunków. Tom 1. Annelida*. Warszawa: Wydawnictwo Instytutu i Muzeum Zoologii PAN, p. 1–11. [In Polish]
- Bohlen, P.J., Parmelee, R.W., McCartney, D.A., Edwards, C.A. (1997). Earthworm effects on carbon and nitrogen dynamics of surface litter in corn agroecosystems. *Ecological Application*, 7, 1341–1349.
- Bouché, M.B. (1972). *Lombriciens de France*. Paris: Ecologie et Systématique, Institut National de la Recherche Agronomique. [In French]
- Briones, M.J.I., Ostle, N.J., Pearce, T.G. (2008). Stable isotopes reveal that the calciferous gland of earthworms is a CO₂-fixing organ. *Soil Biology & Biochemistry*, 40, 554–557. DOI:10.1016/j.soilbio.2007.09.012
- Briones, M.J.I., Schmidt, O. (2017). Conventional tillage decreases the abundance and biomass of earthworms and alters their community structure in a global meta-analysis. *Global Change Biology*, 23, 4396–4419. DOI: 10.1111/gcb.13744.
- Clause, J., Forey, E., Eisenhauer, N., Seal, C.E., Soudey, A., Colville, L., Barot, S. (2017). Seed selection by earthworms: chemical seed properties matter more than morphological traits. *Plant Soil*, 413, 97–110. DOI: 10.1007/s11104-016-3085-9
- Curry, J.P., Schmidt, O. (2007). The feeding ecology of earthworms. *Pedobiologia*, 50, 463–477. DOI: 10.1016/j.pedobi.2006.09.001
- Jodaugiene, D., Pupaliene, R., Sinkeviciene, A., Marcinkeviciene, A., Zebrauskaite, K., Baltaduonyte, M., Cepulienė, R. (2010). The influence of organic mulches on soil biological properties. *Zemdirbyste*, 97(2), 33–40.
- Kostecka, J. (1999). Wpływ wybranych insektycydów na dżdżownicę. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych*, 467, 603–607. [In Polish]
- Li, K., Li, P., Li, H. (2010) Earthworms helping economy, improving ecology and protecting health. *International Journal of Global Environmental Issues*, 10(3), 354–365. DOI: 10.1504/IJGENVI.2010.037276
- Liebeke, M., Strittmatter, N., Fearn, S., Morgan, A.J., Kille, P., Fuchser, J., Wallis, D., Palchikov, V., Robertson, J., Lahive, E., Spurgeon, D.J., McPhail, D., Takáts, Z., Bundy, J.G. (2015). Unique metabolites protect earthworms against plant polyphenols. *Nature Communications*, 6, 7869. DOI: 10.1038/ncomms8869.
- Majchrzak, B., Waleryś, Z., Ciska, E. (2005). Phytosanitary value of cruciferous plants as pre-crops of cereals I. Glucosinolate content in stems and roots of mature plants of *Brassicaceae* family. *Oilseed Crops*, 26, 199–209. [In Polish]
- Munro, T.L., Cook, H.F., Lee, H.C. (2002). Sustainability indicators used to compare properties of organic and conventionally managed topsoils. *Biological Agriculture & Horticulture*, 20(3), 201–214. DOI: 10.1080/01448765.2002.9754965
- Pelosi, C., Barot, S., Capowiez, Y., Hedde, M., Vandenbulcke, F. (2014). Pesticides and earthworms. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 34, 199–228. DOI: 10.1007/s13593-013-0151-z
- Rouse, G.W. (2016). Phylum Annelida: the segmented (and some unsegmented) worms. In: Brusca, R.C., Moore, W., Schuster, S. (eds.), *Invertebrates*, Third Edition. Sunderland: Sinauer Associates, p. 540–569.
- Sawicka, B., Kotiuk, E. (2007). Gorcezyce jako rośliny wielofunkcyjne. *Acta Scientiarum Polonorum seria Agricultura*, 6(2), 17–27. [In Polish]

Wu, Y., Shaaban, M., Peng, Q., Zhou, A., Hu, R. (2018). Impacts of earthworm activity on the fate of straw carbon in soil: a microcosm experiment. *Environmental Science and Pollution Research*, 25, 11054–11062. DOI: 10.1007/s11356-018-1397-4

Abstract

The trophic activity of soil mesofauna, especially earthworms (the Lumbricidae family), is a key element in increasing the fertility of agroecosystems. The food strategies that earthworms use as part of the trophic networks in soil, and especially their food preferences, are still unknown. Much is known about what is the food substrate of earthworms, but the food preferences of individual species, as well as the possibilities and dynamics of food processing are not fully understood. The aim of the experiment was to observe the amount and dynamics of food uptake by the earthworms of the species *Lumbricus terrestris* L., which is a common species of soil *Oligochaeta* in agricultural areas, as well as to propose a new decomposition rate measuring the strength of the earthworm population and its contribution to the mechanism of processing plant organic matter.

Key words: agroecosystem, Lumbricidae, cover crops

Received: [2019.05.07]

Accepted: [2019.10.11]

Ocena aktywności dżdżownic na podstawie pobrania biomasy z wybranych międzyplonów

Streszczenie

Aktywność troficzna mezofauny glebowej, zwłaszcza dżdżownic (rodzina Lumbricidae), stanowi kluczowy element w podnoszeniu żyzności agroekosystemów. Strategie pokarmowe jakie stosują dżdżownice będące częścią sieci troficznych w glebie, a zwłaszcza ich preferencje pokarmowe są wciąż nieznane. Wiele wiadomo na temat tego co jest substratem pokarmowym dżdżownic, to jednak nie do końca poznano preferencje pokarmowe poszczególnych gatunków, a także możliwości i dynamikę przerobienia pokarmu. Celem eksperymentu było zaobserwowanie ilości oraz dynamiki poboru pokarmu przez dżdżownice z gatunku *Lumbricus terrestris* L., będącej powszechnie występującym gatunkiem skąposzczetów glebowych na obszarach użytkowanych rolniczo, a także zaproponowanie nowego wskaźnika dekompozycji, mierzącego siłę i wkład populacji dżdżownic w proces przerabiania roślinnej materii organicznej.

Słowa kluczowe: agroecosystem, Lumbricidae, międzyplony

Information on the authors

Angelika Kliszczyk <https://orcid.org/0000-0002-1270-4414>

She is focusing on enhancing the understanding of the influence of different factors on soil structure and fertility. Particularly, she is investigating the interaction of plants with the physical, chemical, and biological properties of the soil. She is also interested in earthworm ecology and mesofauna function in agroecosystems.

Joanna Puła <https://orcid.org/0000-0002-3672-5690>

Her research is connected with agrotechnology in plant cultivation and plant ecology. Presently, she is interested in the use of the biomass of plants and other organic fertiliser like biochar in agriculture.

Publikacja 3

Effect of organic farming on crop yielding and water erosion intensity on sloping farmland

Klima, K., Puła, J., **Kliszcz**, A. (2022). Wpływ rolnictwa konwencjonalnego i ekologicznego na plonowanie roślin uprawnych i intensywność erozji wodnej na terenach urzeźbionych. *Agronomy Science*, 77(3), 41–52. <https://doi.org/10.24326/as.2022.3.3>

Oświadczenie współautorów

Oświadczam, że w wymienionej publikacji mój wkład polegał na: opracowaniu koncepcji i założeń doświadczenia, opracowaniu metodologii, przeprowadzeniu badań oraz opracowaniu wyników i redakcji pierwotnej treści manuskryptu.

Udział - 50 %

Prof. dr hab. inż. Kazimierz Klima



Oświadczam, że w wymienionej publikacji mój wkład polegał na: opracowaniu koncepcji i założeń doświadczenia, opracowaniu metodologii, redakcji i korekcie manuskryptu.

Udział – 20 %

Dr hab. inż. Joanna Puła, Prof. URK




Oświadczenie doktorantki

Oświadczam, że w wymienionej publikacji mój wkład polegał na: opracowaniu metodologii i wyników prowadzonego doświadczenia oraz redakcji i korekcie manuskryptu, tłumaczeniu części tekstu i korekcie językowej manuskryptu po recenzjach, koordynacji administracyjnej przebiegu publikowania.

Udział – 30 %

mgr inż. Angelika Kliszcz





Department of Agroecology and Plant Production, Faculty of Agriculture and Economics,
University of Agriculture in Kraków, Mickiewicz Ave 21, 31-120 Kraków, Poland

*e-mail: angelika.kluszcz@urk.edu.pl

KAZIMIERZ KLIMA , JOANNA PUŁA ,
ANGELIKA KLISZCZ *

Effect of conventional and organic farming on crop yielding and water erosion intensity on sloping farmland

Wpływ rolnictwa konwencjonalnego i ekologicznego na plonowanie
roślin uprawnych i intensywność erozji wodnej na terenach urzeźbionych

Summary. The pro-health and pro-environmental assets of organic farming are a reason why this system is now promoted in agriculture. The objective of the research was to determine the effect of conventional and organic crop production (potato, oat, and spring vetch) on the yield, water erosion, losses of NPK nutrients, LAI, infiltration, and fresh mass of earthworms. From 2019 to 2021, a two-factor field experiment was carried out at the Mountain Experimental Station located in Czysta (Southern Poland). The first factor included farming systems: conventional and organic. The second factor consisted of 3 crops grown with the use of crop rotation: 1. potato with manure; 2. oat; 3. spring vetch. Based on the experiment performed, it was found that the yield of the organically grown crops was on average 18.8% lower compared to that grown conventionally. Under the organic farming system, the mass of sheet wash was on average 6.47% smaller than that under the conventional farming system. As regards the NPK nutrients emitted into the environment, their losses was about 50% lower than that under the conventional system of farming, where there were applied artificially synthesized fertilizers and pesticides.

Key words: conventional and organic farming system, eutrophication potential of agriculture, earthworms, weeds, losses of NPK nutrients

INTRODUCTION

In the EU, the organic farming system is now promoted, *inter alia*, under the European Green Deal [Ziętara and Mirkowska 2021]. In the literature, there are papers dealing with the pro-health advantages of the products achieved under the organic farming system. However, the organic farming is less effective in the terms of economic issues [Klima et al. 2019], the reference research confirmed a direct association to exist between the consumption of organic products and the lower frequency of occurrence of oncologic diseases

and obesity [Barański et al. 2021]. On the other side, the effect of organic farming on the environment from the point of view of the quality of water (eutrophication potential), soil (pesticides contaminant, structure), and air (emissions of GHG) is better than conventional farming, especially in the water catchment areas [Pulleman et al. 2003, Gomiero et al. 2011, Lorenz and Lal 2016]. Organic agriculture promotes abundance of microorganisms, earthworms and weeds, sustaining biodiversity in the field, as well as infiltration and immobilization of biogenic molecules in the soil. These processes occur with more intensity in environments when microorganisms and earthworms are abundant (organic farming), because of bigger burrows gallery construct in the arable (or deeper) layers, which enables entering the more soil solution into the soil profile and then partially immobilize them. These processes were described e.g. by Le Bayon and Binet [2001] (Fig. 1).

Only a few papers addressed the impact of organic farming system on water erosion and following environmental consequences. This fact has become an incentive to undertake field research on eutrophication potential of conventional cultivation compared to organic one.

Hypothetically, abundance of earthworms (bigger burrow galleries) and covering the soil surface by weeds in organic agriculture performing on fields with slope will decrease the rates of infiltration and therefore the amount of NPK nutrients emitted into the environment.

The objective of the research was to determine the effect of conventional and organic farming on yielding, intensity water erosion and losses of NPK nutrients in the cultivation of potato, oat, and spring vetch.

MATERIAL AND METHODS

The research subject constituted a two factor field experiment conducted at an Experimental Station, from 2019 to 2021. The Experimental Station in Czarna is maintained by the University of Agriculture in Kraków (N 49°25'; E 20°58', on altitude 545 m a.s.l.). The grain-size composition of mineral particles of the soil was as follow: 28% of sand, 29% of silt, and 43% of clay particles; therefore, this type of soil was classified according to WRB as a Endoeutric Stagnosol (Siltic, Endoskeletal) [WRB FAO 2015, Kabała et al. 2019]. The field experiment was designed with the use of a split-block method. The first factor of the experiment included two farming systems: conventional and organic. The second factor consisted of 3 crops that were grown in the crop rotation system: 1. potato with cattle manure (33 t·ha⁻¹); 2. oat; 3. spring vetch. Under the conventional farming system, artificial mineral fertilizers were applied in accordance with the needs of crops. The following doses of fertilisers (kg·ha⁻¹) were applied: for the potatoes: 47.2 of P (phosphorus), 104.0 of K (potassium), 115.0 of N (nitrogen); for the oat: 34.0 of P, 55.6 of K, 72.0 of N; for the spring vetch: 43.6 of P, 83.0 of K, 21.0 of N. Under the conventional farming system, the following active substances of various herbicides were used to control weeds within the crops grown: as for the potato crops: *metribuzin* contained in Sencor 600 SC, in a dose of 1.0 dm³·ha⁻¹; as for the oat crops: *tribenuron methyl (sulphonylurea)* contained in Granstar, in a dose of 24.0 g·ha⁻¹; and as for the spring vetch crops: *bentazone* in Basagran 480 SL, in a dose of 2.0 dm³·ha⁻¹. Neither mineral fertilisers nor other crop protection products were applied under the organic farming system. To control weeds within the oat crops cultivated organically, the field with oat sown in the spring was harrowed. The field with spring vetch sown in the spring was not harrowed to protect seedlings from getting damaged. Mechanical weed removing techniques were twice applied to the potato crops grown under the organic as well as conventional farming system. Under the organic system,

the potato beetle larvae were fought using a SpinTor insecticide ($0.20 \text{ dm}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$, *spinosyn A* and *spinosyn D*) authorised for use in organic agriculture. The weed infestation was analysed twice each year. Two weeks after applying herbicides, the first spring sample was performed on 0.25 m^2 surfaces using frame method ($n = 4$). Based on it, the abundance of weeds was determined. Prior to harvesting oat and spring vetch, the second series was performed with the use of an phytosociological method ($n = 4$), and this enables to express the overall degree of surface coverage by weeds. During that period, the potatoes were in a 79–81 (BBCH) phase [Hack et al. 1992].

The annually performed experiment was carried out on the small, $22 \times 2 \text{ m}$ plots ($n = 4$) lying on a 9% slope [Wischmeier and Smith 1978, Bogunovic et al. 2018]. For each of the crop cultivated, a period to measure the surface runoff began on the day of harvesting forecrop and lasted until the harvest of the follow-up. The surface runoff were measured by Słupik catchers [Smolska 2002]. The catchers were emptied after every rainfall or after a thawing (snow-melt) season to generate surface runoff. The volume of surface runoff was measured, and 1 litre of surface runoff was randomly collected from the suspended load for the purpose of detailed analysis. The mass of sheet wash was determined as soon as 1 litre of surface runoff completely infiltrated through a medium hard filter. The sediment including the filter was dried at 105°C . The filters with the sediment were cooled in a desiccator and weighed on an electronic balance with readability down to 0.0001 g . During the liquid phase of runoffs, the following was determined using colorimetric methods: the content of N-NO_3 using phenoldisulphonic acid and the content of N-NH_4 using a Nessler agent in a Beckman UV/VIS PU 6400 spectrophotometer [Elbanowska et al. 1999]. The contents of phosphorus and potassium were determined as soon as the sample was ten times compressed by an ICP-EAS method in a JY 238 ULTRACE Jobin Yvon Emission apparatus.

The total area of the above-ground parts of crops (Leaf Area Index – LAI, $\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$) was measured every year during the dough stage of oat (BBCH 70–71). During that period, the spring vetch was at a stage of pods maturing (BBCH 81–83), and the potato at a stage of forming berries (BBCH 71–75). LAI was measured using a Sun Scan Canopy Analysis System device (Delta-T Great Britain 2014). The fresh mass of earthworms (after removing the content from their guts) was determined in the third decade of August after the oat and spring vetch harvest completed; here, a method of hand sorting was applied [Kliszcz and Puła 2020]. For the purpose of analysis, soil samples were collected from a 0.25 m^2 surface, where the thickness of topsoil was 18 cm. The results obtained (endogeic and anecic specimens) were converted to 1 m^2 . The infiltration was determined in the third decade of August, after the oat and spring vetch harvest; it was determined using a field infiltrometer manufactured by Eijkelkamp ($n = 4$). The infiltrometer had two cylinders: a small one of a 30 cm diameter and a bigger one of a 54 cm diameter. The bigger cylinder served as a protection; it formed a water ring around the inner cylinder. The cylinders were inserted into the soil to a depth of 15 cm. The two cylinders were filled with water the amount of which equalled a precipitation total of 50 mm. Next, there was measured the time of water penetration in the inner cylinder. All results were depicted as an average on the basis of 3 year research.

During the growing season in 2021, the distribution of precipitation turned out to be most favourable for crop yielding. During the growing season in 2020, in April were water shortages (the temperature line is above the top end of the column representing precipitation; evapotranspiration exceed infiltration), whereas the growing season in 2019 was similar to that in 2020, except that water shortages occurred in June, and May was far above average in terms of the amount of rainfall. However, apart from the weather event

on May 23, these rainfalls did not occur at the intensity that could cause increased water erosion. The weather conditions during winters did not cause the freeze-thaw erosion to intensify. The intensity of water erosion usually increased in the spring; it was mainly because the then precipitation was above 20 mm per weather event or snowmelt. The water coming with the precipitation up to 20 mm almost entirely infiltrated deeply into the soil profile (data unpublished).

Statistical analyses

FR-ANALWAR – 4.3 software was utilised to statistically analyse the results through the procedure of ANOVA. The significance of mean differences was tested among the objects using a multiple comparison procedure and a LSD Tuckey test at $\alpha = 0.05$ was applied.

The climate at the site of experiment is of a continental type with a mean annual temperature ranging from 6 to 8°C. During the crop growing season, the sum of monthly precipitations varied and therefore the evapotranspiration varied on this site (Fig. 2). Coefficient α (1°C = 2 mm) was taken from Gaussen [1954].

RESULTS AND DISCUSSION

Plants (potato, oat and spring vetch) have been selected for this area in terms of poor soils, which are often existed in a sloping agricultural landscape. Their cultivation, although sometimes necessary, may carry an environmental risk, especially with regard to the quality of the water catchments formed in this area and then used as a reservoir of drinking water. The results presented below reveal pros and cons for conventional and organic farming in sloped agricultural areas.

Table 1. Yielding of crops cultivated under conventional and organic farming systems

Object	Farming system		
	conventional	organic	\bar{x}
Yield units (t·ha ⁻¹)			
Potato	27.83	22.34	25.08
<i>LSD</i> _{0.05}	0.563		
Oat	3.94	3.28	3.61
<i>LSD</i> _{0.05}	0.157		
Spring vetch	0.613	0.579	0.596
<i>LSD</i> _{0.05}	0.031		
Yield in cereal units (dt·ha ⁻¹)*			
Potato	183.68	147.46	165.57
Oat	30.72	25.56	28.14
Spring vetch	8.95	8.45	8.70
\bar{x}	74.44	60.49	67.47
<i>LSD</i> _{0.05}	0.949		1.530

* Conversion factors to be used for converting the yield units to cereal units: potato: 0.66; oat: 0.78; spring vetch: 1.46 [Rozporządzenie Ministra... 2019].

Compared to the organic farming, the three crops yielded higher under the conventional system, namely: the yield of potatoes was 24.6% higher, of oat: 20.1% more, and of spring vetch: 5.9% more (Tab. 1). An average, in cereal units expressed yield was 23.1% higher under the conventional farming than that under the organic farming system (Tab. 1). In previous research, Klima et al. [2019] reported a similar result (+18%) as regards the yield of cereal crops under conventional system. That higher yielding potential of crops grown in crop rotation was a result mainly, of the application of mineral fertilisation and pesticides in the conventional farming system.

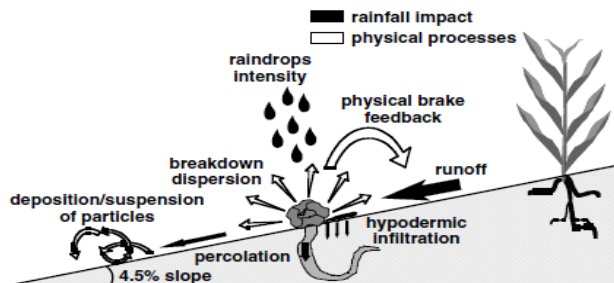


FIGURE 10.1 Interrelationships between earthworm surface casting activity, rainfall, surface runoff, infiltration, and soil erosion. (From Le Bayon, R.C. and F. Binet, 2001, *Pedobiologia*, 45:430–442.)

Fig. 1. The soil erosion process in the occurrence of earthworms and weeds
[Le Bayon and Binet 2001]

Although, the synthetically derived substances could restrict the two important agroecosystem actors, i.e. weeds and earthworms, which are responsible largely for reduction of the water erosion intensity on arable lands. Weeds with their high soil surface covering potential (LAI) protect the soil surface against surface splash, and on the other hand, air tunnels made by earthworms in the soil improve water infiltration directly in the soil profile, prevent surface runoff (Fig. 1). The data in Table 2 show, that, under the two farming systems studied, the difference between the LAI averages is not statistically significant. Thereby, the weeds in organic farming have the compensation effect, because they cover soil surface when the crops are smaller. Based on the performed analyses of weed infestation, it was noticed that weeds were 2.2-times more abundant in the organic system than in the conventional one, especially in oat (3.2-times greater) – Table 3, and the weed coverage on the surface was 81% greater (Tab. 4), respectively. The larger surface coverage by weeds as reported under the organic system could reduce the splash that sets off the erosion process [Zambon et al. 2021]. Splash occurs where rain drops fall on and hit exposed or bare soil. Among all tested plants the spring vetch was the one with the greatest potential in covering soil surface (statistically significant; Tabs 2–4).

Potatoes were the least infested due to their cultivation in wide rows and the possibility of mechanical treatments in interrows during the growing season. In this research, conventionally cultivated potato had 2.39-times less number of weeds comparing to organic system. Kołodziejczyk et al. [2017] was noted 3.93-times less weeds in mechanical-chemical treatment compared to mechanical only. The cited authors indicate also that neighbouring

plants in potato cultivation can uptake macroelements with their biomass (respectively, 21.0 kg·ha⁻¹ N, 4.0 kg·ha⁻¹ P, 29.0 kg·ha⁻¹ K, for mechanical treatment only), and their results indicate that the mechanical-chemical treatment did not enhanced loss the nutrient to the environment (the rise of accumulated NPK nutrients in potato in the presence of pesticides compared to mechanical treatment only was 49.0 kg·ha⁻¹, and for weeds their absence generated free 33.0 kg NPK·ha⁻¹). These results were showed that potato can effectively exploit the added NPK resources, although the residues of pesticides remaining in the environment emerged nowadays an urgent issue.

Table 2. Effect of farming system on LAI (m²·m⁻²)

Specification	Farming system		
	conventional	organic	\bar{x}
Potato	1.91	1.84	1.87
Oat	2.26	2.24	2.25
Spring vetch	2.57	2.50	2.53
\bar{x}	2.24	2.19	2.21
$LSD_{0.05}$	n.s.*		0.146

* not significant

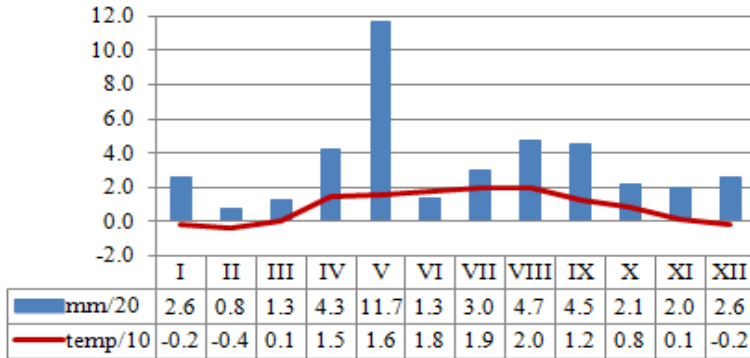
Table 3. Effect of farming system on reported total number of weeds (plants·m⁻²) within crops grown during spring seasons

Specification	Farming system		
	conventional	organic	\bar{x}
Potato	21.9	52.3	37.1
Oat	26.6	85.9	56.3
Spring vetch	74.5	134.4	104.4
\bar{x}	41.0	90.9	65.9
$LSD_{0.05}$	2.63		3.35

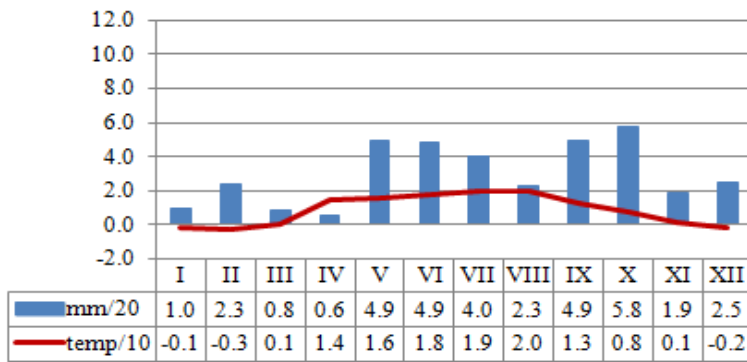
Table 4. Coverage by weeds surface (%) as reported during oat and spring vetch harvesting period

Specification	Farming system		
	conventional	organic	\bar{x}
Potato	13.1	28.8	20.9
Oat	20.0	37.6	28.8
Spring vetch	29.7	48.1	38.9
\bar{x}	21.0	38.1	29.5
$LSD_{0.05}$	0.01		1.29

2019



2020



2021

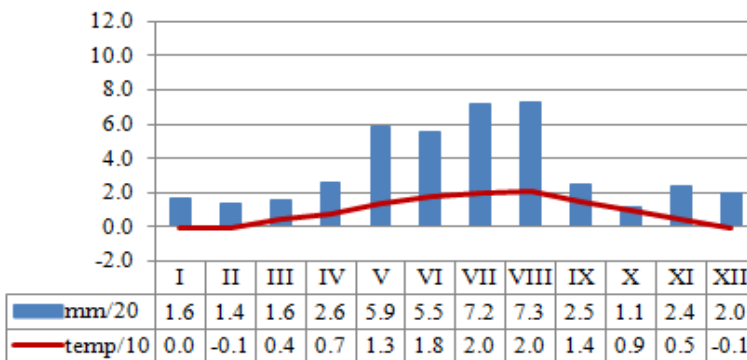


Fig. 2. Gausson-Walter climatograms for experimental area (2019–2021)

Infiltration has a major effect on reducing water erosion in soils. The research by Wainwright [1996] showed that the higher the infiltration rate, the lower the water erosion intensity, thereby amounts of sheet wash. The data in Table 5 demonstrate that the infiltration under the organic system was 13.6% higher than that under the conventional one.

Table 5. Effect of farming system on infiltration rate ($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$)

Specification	Farming system		
	conventional	organic	\bar{x}
Potato	6.91	7.34	7.12
Oat	8.48	9.36	8.92
Spring vetch	9.10	10.94	10.02
\bar{x}	8.17	9.21	8.69
$LSD_{0.05}$	0.567		0.673

Table 6. Effect of farming system on fresh mass of earthworms ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$)

Specification	Farming system		
	conventional	organic	\bar{x}
Potato	24.45	27.84	26.14
Oat	20.15	22.32	21.24
Spring vetch	23.69	26.62	25.15
\bar{x}	22.76	25.59	24.18
$LSD_{0.05}$	0.239		0.884

Table 7. Effect of farming system on mass ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$) of sheet wash

Specification	Farming system		
	conventional	organic	\bar{x}
Potato	4007.7	3775.1	3891.4
Oat	196.9	187.7	192.3
Spring vetch	199.4	173.6	186.5
\bar{x}	1468.0	1378.8	1423.4
$LSD_{0.05}$	74.76		64.36

The second important factor of a higher infiltration under the organic farming, in addition to a greater amount of weeds there, was the increase in the mass of earthworms (12.4% more; Tab. 6). The endogeic group of earthworms (present in the tilled agroecosystems) make the horizontal-oriented burrows gallery, which also can enhance the infiltration rate with the strongest effect being for biopores with diameter >6 mm [Capowicz

et al. 2009]. The results of air tunnels dug in the soil by earthworms on infiltration rates has been seldom addressed in the literature regarding sloping areas. But it is accepted that higher soil porosity (more earthworm burrow gallery) fosters higher infiltration. The results provided by Bouche and Al-Addan [1997] showed that the infiltration rate was positively correlated to earthworm biomass ($r = 0.975$), length, surface and volume of burrows ($r = 0.99$), but not linked with diameter of burrows, tortuosity or with earthworm number (probably due to present of juveniles with small size, which does not contribute significantly to the increase in infiltration). Their results indicate that the mean rate of infiltrated water on studied area was $150 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ per $100 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ of earthworms.

Table 8. Average annual amounts of NPK nutrients ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$) carried off by surface runoff

Specification	Farming system	Nutrients				
		N-NO ₃	N-NH ₄	P	K	Total
Potato	C	10.137	0.239	0.079	0.964	11.419
	O	3.720	0.093	0.034	0.285	4.132
	\bar{x}	6.928	0.166	0.056	0.624	7.775
Oat	C	6.512	0.152	0.054	0.541	7.259
	O	3.604	0.089	0.032	0.274	3.999
	\bar{x}	5.058	0.120	0.043	0.407	5.629
Spring vetch	C	3.803	0.107	0.068	0.712	4.690
	O	3.136	0.073	0.027	0.241	3.477
	\bar{x}	3.469	0.090	0.047	0.476	4.083
On average	C	6.817	0.166	0.070	0.739	7.792
	O	3.486	0.085	0.031	0.266	3.868
	\bar{x}	5.151	0.125	0.050	0.502	5.829
<i>LSD</i> _{0.05}						
For farming systems		0.448	0.012	0.0045	0.012	0.445
For crops		0.403	0.008	0.0038	0.022	0.420

C – conventional system, O – organic system

The average mass of earthworms was 18.8% higher in the fields where potatoes were grown than that in the fields where oat were grown (regardless the farming system) – Table 6. The reason thereof could be attributed to manure applied. Also, Sharpley et al. [2011] found that the fertilisation with manure enhanced the occurrence of earthworms in the soil with 2.70-times more than mineral fertilisation. Crittenden et al. [2014] informed that the conventional farming versus organic farming caused decreasing particular group of oligochaetes in ploughed soil, e.g. the abundance of common endogeic earthworm *A. caliginosa* decreased on average 1.65-times (for all samplings after plough), and total biomass of earthworms ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$) in conventional managed plots was half (51.93%) than that in organically cultivated fields. Compared to the conventional system, a higher (12.4%) fresh mass of earthworms was achieved under the organic farming (Tab. 6), and this could be connected to manure applied and a larger number of root systems including those of

the weeds, which can attract the soil mesofauna due to diversity of microbial hotspots accelerated in their rhizosphere (Tab. 3). On the basis of this data, could be marked that the higher plant biodiversity in organic agriculture fosters higher rates of soil organisms. The research results by Riley et al. [2008] pointed out the advantageous impact of the grass-legume mixture implemented into the organic cereal rotation (in the terms of number and activity of earthworms), even though one year of implementation (mown several times and ploughed down at frequent intervals). Also, there was statistically significant more biomass of earthworm (av. by $3.91 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$) in spring vetch cultivation than in oat, regardless the system (Tab. 6).

The mass of sheet wash was 6.47% higher under the conventional than that under the organic farming system (Tab. 7). In the terms of particular crops, among plants with negligible sheet wash amounts in comparison to potato (oat, spring vetch; over 20-times less sheet wash, on average), the legume generated less sheet wash (by 7.51%) than oat in organic system (n.s.). To reduce such high surface erosion on slopes in potato cultivation, Tiessen et al. [2007] proposed several tillage implements with high anti-erosion effectiveness of potato crops cultivated on sloping fields (reduce depth of tillage, contour tillage using a mouldboard plough with the furrow turned upslope rather than chisel plough).

The mineral fertilisers applied under the conventional system and a larger mass of sheet wash caused the average annual mass of NPK components in fertilisers (carried off by surface runoff) to double in this systems compared to the organic system (Tab. 8). The lower infiltration level in conventionally cultivated fields (Tab. 5) could be a major reason thereof. However, interestingly for potato, amounts of N-NO_3 ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) caught in surface runoff in organic system was close to the values for oat and spring vetch in this system (3.720, 3.604, and 3.136, respectively; Tab. 8). Additionally, Cambardella et al. [2015] confirmed in their research that – as for the regions where maize was organically grown – the content of nitrates (N-NO_3) in the ground water was half the amount of that in the regions where maize was conventionally cultivated.

The obtained results of the three-year research highlights the pro-environmental aspects of organic farming, which diminished the amounts of NPK nutrients emitted into the environment on average $3.868 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ comparing to conventional cropping, on average $7.792 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ (Tab. 8). The positive effect of organically grown crops on water quality might be used to promote organic agriculture, in particular, catchment areas of rivers, which are a source of drinking water for urban inhabitants.

CONCLUSIONS

1. The yield of organically grown crops was 18.8% lower than that of conventionally cultivated plants.

2. Regard the organic farming system, oat was the most accompanied by weeds in comparison to conventionally cultivated one (3.2-times more); other plants were weeded the organic fields as follows: potato 2.39-times more and spring vetch 1.80-times more, in comparison to pesticide-present cultivation.

3. Compared to the conventional farming, the fresh mass of earthworms was 12.43% larger under the organic farming of potatoes, oat, and spring vetch.

4. Under the organic farming, the mass of sheet wash was 6.47% lower than that under the conventional farming.

5. The amount of NPK nutrients emitted into the environment from organically grown crops was half the amount of those emitted from the conventionally cultivated plants, where artificially synthesized fertilisers and pesticides were applied. This effect was most evident in the organic cultivation of potatoes, where the surface runoff of nitrates was comparable to the values for the other plants ($3.72 \text{ kg N-NO}_3 \cdot \text{ha}^{-1}$, on average $3.37 \text{ kg N-NO}_3 \cdot \text{ha}^{-1}$, respectively).

6. The differences in soil surface coverage (LAI) were statistically insignificant between organic and conventional farming systems, due the increased presence of weeds in the organically cultivated crops.

REFERENCES

- Barański M., Średnicka-Tober D., Rempel L., Rembiałkowska E., 2021. Feed composition differences resulting from organic and conventional farming practices affect physiological parameters in Wistar rats – results from a factorial, two-generation dietary intervention trial. *Nutrients* 13(2), 1–34. <https://doi.org/10.3390/nu13020377>
- Bogunovic I., Pereira P., Kisic I., Sajko K., Srakac M., 2018. Tillage management impacts on soil compaction, erosion and crop yield in Stagnosols (Croatia). *Catena* 160, 376–384. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.10.009>
- Bouche M., Al-Addan F., 1997. Earthworms, water infiltration and soil stability, some new assessments. *Soil Biol. Biochem.* 29(3–4), 441–452. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(96\)00272-6](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(96)00272-6)
- Cambardella C.A., Delate K., Jaynes D.B., 2015. Water quality in organic systems. *Sustain. Agric. Res.* 4, 60–69. <http://dx.doi.org/10.5539/sar.v4n3p60>
- Capowiez Y., Cadoux S., Bouchant P., Ruy S., Roger-Estrade J., Richard G., Boizard H., 2009. The effect of tillage type and cropping system on earthworm communities, macroporosity and water infiltration. *Soil Tillage Res.* 105, 209–216. <https://doi.org/10.1016/j.still.2009.09.002>
- Crittenden S.J., Eswaramurthy T., de Goede R.G.M., Brussaard L., Pulleman M.M., 2014. Effect of tillage on earthworms over short- and medium-term in conventional and organic farming. *Appl. Soil Ecol.* 83, 140–148. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsoil.2014.03.001>
- Elbanowska H., Zerbe J., Siepak J., 1999. Fizyczno-chemiczne badania wód [Physico-chemical research of waters]. *Wyd. Nauk. UAM, Poznań*, pp. 232 [in Polish].
- Gaussen H., 1954. Théorie et classification des climats et microclimats [Theory and classification of climates and microclimates]. *C.R. VIII ème Congres International de Botanique.* 7, 125–130 [in French].
- Gomiero T., Pimentel D., Paoletti M.G., 2011. Environmental impact of different agricultural management practices: conventional vs. organic agriculture. *Crit. Rev. Plant Sci.* 30, 95–124. <https://doi.org/10.1080/07352689.2011.554355>
- Hack H., Bleiholder H., Buhr L., Meier U., Schnock-Fricke U., Weber E., Witzemberger A., 1992. Einheitliche Codierung der phänologischen Entwicklungsstadien mono- und dikotyler Pflanzen – Erweiterte BBCH – Skala, Allgemein-Nachrichtenbl [Uniform coding of the phenological development stages of monocotyledonous and dicotyledonous plants – extended BBCH – scale, general news sheet]. *Deut. Pflanzenschutzd.* 44, 265–270 [in German].
- Kabała C., Charzyński P., Chodorowski J., Drewniak M., Głina B., Greinert A., Hulisz P., Jankowski M., Jonczak J., Łabaz B., Łachacz A., Marzec M., Mendyk Ł., Musiał P., Musielok Ł., Smreczak B., Sowiński P., Świtoniak M., Uzarowicz Ł., Waroszewski J., 2019. Polish Soil Classification, 6th edition – principles, classification scheme and correlations. *Soil Sci. Annu.* 70(2), 71–97. <https://doi.org/10.2478/ssa-2019-0009>

- Klima K., Lepiarczyk A., Chowaniak M., Boligłowa E., 2019. Soil protective efficiency of organic cultivation of cereals. *J. Elem.* 24(1), 357–368. <https://doi.org/10.5601/jelem.2018.23.2.1610>
- Kliszcz A., Puła J., 2020. The change of pH value and *Octolasion cyaneum* saving earthworms activity under stubble crops after spring triticale continuous cultivation. *Soil Syst.* 4(3), 39. <https://doi.org/10.3390/soilsystems4030039>
- Kołodziejczyk M., Antonkiewicz J., Kulig B., 2017. Effect of living mulches and conventional methods of weed control on weed occurrence and nutrient uptake in potato. *Int. J. Plant Prod.* 11(2), 275–283.
- Lorenz K., Lal R., 2016. Environmental impact of organic agriculture. *Adv. Agron.* 139, 99–152.
- Le Bayon R.-C., Binet F., 2001. Earthworm surface casts affect soil erosion by runoff water and phosphorous transfer in a temperate maize crop. *Pedobiologia* 45(5), 430–442. <https://doi.org/10.1078/0031-4056-00097>
- Pulleman M., Jonghman A., Marinissen J., Bouma J., 2003. Effects of organic versus conventional arable on soil structure and organic matter dynamics in a marine loam in the Netherlands. *Soil Use Manage* 19, 157–165.
- Riley H., Pommeresche R., Eltun R., Hansen S., Korsæth A., 2008. Soil structure, organic matter and earthworm activity in a comparison of cropping systems with contrasting tillage, rotations, fertilizer levels and manure use. *Agric. Ecosyst. Environ.* 124, 275–284.
- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 16 kwietnia 2019 w sprawie szczegółowych warunków szacowania szkód w uprawach i płodach rolnych [Regulation of the Minister of the Environment of April 16, 2019 on detailed conditions for estimating damage to crops and agricultural produce], *Dz.U. z 2019 r., poz. 776* [in Polish].
- Sharpley A., McDowell R., Moyer B., Littlejohn R., 2011. Land application of manure can influence earthworm activity and soil phosphorus distribution. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 42(2), 194–207. <https://doi.org/10.1080/00103624.2011.535070>
- Smolska E., 2002. The intensity of soil erosion in agricultural areas in north-eastern Poland. *Landform Anal.* 3, 25–33.
- Tiessen K., Lobb D., Mehuys G., 2007. The canon of potato science: 30. Tillage erosion within potato production – soil tillage, earthing up and planting. *Potato Res.* 50(3–4), 327–330. <https://doi.org/10.1007/s11540-008-9055-8>
- Wainwright J., 1996. Infiltration, runoff and erosion characteristics of agricultural land in extreme storm events, SE France. *Catena* 26(1–2), 27–47. [https://doi.org/10.1016/0341-8162\(95\)00033-X](https://doi.org/10.1016/0341-8162(95)00033-X)
- Wischmeier W.H., Smith D.D., 1978. Predicting rainfall erosion losses. *Agriculture Handbook* 537, Science and Education Administration United States Department of Agriculture in cooperation with Purdue Agricultural Experiment Station, Washington D.C., pp. 58.
- WRB FAO, 2015. World reference base for soil resources 2014. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. Update 2015. *World Soil Resources Report* 106, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, pp. 190.
- Zambon N., Johannsen L., Strauss P., Dostal T., Zümmer D., Cochrane T., Klik A., 2021. Splash erosion affected by initial soil moisture and surface conditions under simulated rainfall. *Catena* 196, 104827. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104827>
- Ziętara W., Mirkowska Z., 2021. The green deal: towards organic farming or greening of agriculture?. *Probl. Agric. Econ.* 3(368), 29–54. <https://doi.org/10.30858/zer/135520>

The source of funding: This work is financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Poland.

Received: 27.05.2022

Accepted: 26.08.2022

Publikacja nr 4

Wider use of honey plants in farming: Allelopathic potential of *Phacelia tanacetifolia* Benth.

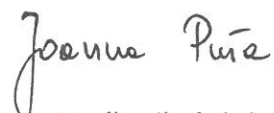
Klischcz, A., Puła J., Możdżeń K., Tatoj A., Zandi P., Stachurska-Swakoń A., Barabasz-Krasny B. (2023). Wider Use of Honey Plants in Farming: Allelopathic Potential of *Phacelia tanacetifolia* Benth. *Sustainability* 15(4): 3061. <https://doi.org/10.3390/su15043061>

Oświadczenia współautorów

Oświadczam, że w wymienionej publikacji mój wkład polegał na: konceptualizacji doświadczenia, przygotowaniu materiału roślinnego, przechowywaniu danych, recenzji i redakcji manuskryptu, nadzorze nad badaniami.

Udział – 10 %

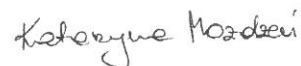
Dr hab. inż. Joanna Puła, Prof. URK



Oświadczam, że w wymienionej publikacji mój wkład polegał na: konceptualizacji doświadczenia, opracowaniu metodologii, walidacji wyników, przeprowadzeniu eksperymentu, przygotowaniu ekstraktów wodnych z materiału roślinnego, opracowanie i zarchiwizowanie surowych wyników, nadzorze i koordynacji procesu badawczego.

Udział – 20 %

Dr inż. Katarzyna Możdżeń



Oświadczam, że w wymienionej publikacji mój wkład polegał na: konceptualizacji doświadczenia, opracowaniu metodologii, posługiwaniu się oprogramowaniem do obróbki danych surowych, analizie formalnej wyników, przygotowaniu wstępnej wersji artykułu, recenzji i redakcji manuskryptu, wizualizacji danych, koordynacji administracyjnej procesu przygotowywania publikacji, pozyskaniu finansowania publikacji.

Udział – 10 %

Mgr inż. Agnieszka Tatoj

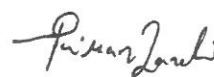


Oświadczam, że w wymienionej publikacji mój wkład polegał na: opracowaniu metodologii, software i analizie formalnej.

I declare that my contribution to this publication consisted in: development of methodology, software and formal analysis.

Udział (*share*) – 2 %

Peiman Zandi, PhD Assoc. Professor



Oświadczam, że w wymienionej publikacji mój wkład polegał na: walidacji wyników, archiwizacji i wizualizacji danych, recenzji i redakcji artykułu.

Udział – 3 %

Dr hab. Alina Stachurska-Swakoń

Alina Stachurska-Swakoń

Oświadczam, że w wymienionej publikacji mój wkład polegał na: konceptualizacji doświadczenia, walidacji wyników i zasobów, przygotowaniu wstępnej wersji artykułu, wizualizacji wyników, nadzoru nad przebiegiem badań i koordynacją administracyjną procesu przygotowywania publikacji oraz pozyskaniu finansowania publikacji.

Udział – 20 %

Dr hab. Beata Barabasz-Krasny, Prof. UP

Beata Barabasz-Krasny

Oświadczenie doktorantki

Oświadczam, że w wymienionej publikacji mój wkład polegał na: konceptualizacji doświadczenia, opracowaniu metodologii, przeprowadzeniu eksperymentu, walidacji wyników, analizie formalnej wyników, posługiwaniu się oprogramowaniem do obróbki i archiwizacji danych surowych, recenzji i redakcji manuskryptu, wizualizacji danych, nadzoru nad przebiegiem badań i koordynacją procesu przygotowania publikacji oraz jako autor korespondencyjny również procedowania procesu opublikowania pracy.

Udział – 35 %

Mgr inż. Angelika Kliszczyk

Angelika Kliszczyk

Article

Wider Use of Honey Plants in Farming: Allelopathic Potential of *Phacelia tanacetifolia* Benth.

Angelika Kliszcz^{1,*}, Joanna Puła¹, Katarzyna Możdżeń², Agnieszka Tatoj³, Peiman Zandi⁴, Alina Stachurska-Swakoń⁵ and Beata Barabasz-Krasny³

¹ Department of Agroecology and Plant Production, Faculty of Agriculture and Economics, University of Agriculture in Kraków, Mickiewicz Av. 21, 31-120 Kraków, Poland

² Independent Researcher, 30-084 Kraków, Poland

³ Department of Botany, Institute of Biology and Earth Science, Pedagogical University of Krakow, Podchorążych 2 St., 30-084 Kraków, Poland

⁴ International Faculty of Applied Technology, Yibin University, Yibin 644000, China

⁵ Institute of Botany, Jagiellonian University, Gronostajowa 3 St., 30-387 Kraków, Poland

* Correspondence: angelika.kliszcz@urk.edu.pl

Abstract: *Phacelia tanacetifolia* Benth. is a melliferous, phytosanitary fodder plant. An important factor in understanding the biology of this plant is to investigate its allelopathic potential. In the experiment conducted here, ×*Triticosecale* Wittm. cv. Mamut was treated with water extracts from the roots, stems, leaves, and flowers of phacelia at concentrations of 10%, 12.5%, 15%, and control with 0% of extract. After 7 days of exposure, the germination of grains was assessed by analysing, seedling growth, mass parameters, water content, and electrolytes leakage. Aqueous extracts from the stalks, leaves, and flowers of phacelia significantly inhibited kernel germination at a 10% concentration, and from roots at a 12.5% concentration. The elongation growth of triticale seedlings was significantly inhibited by each of the extracts. Extracts from the leaves and flowers caused a significant reduction in fresh mass at a 10% concentration and extracts from the stalks at a 12.5% concentration. A significant reduction in water content was also found in seedlings watered with extracts of 10% from roots, stalks, and leaves and 12.5% from flowers. Extracts from phacelia roots at a 12.5% concentration and extracts from stalks, leaves, and flowers at a 10% concentration significantly increased the leakage of electrolytes. In general, phacelia exhibits allelopathic potential at higher concentrations of extracts.

Keywords: allelopathy; lacy phacelia; stress factors; stubble crop; sustainable agriculture



Citation: Kliszcz, A.; Puła, J.; Możdżeń, K.; Tatoj, A.; Zandi, P.; Stachurska-Swakoń, A.; Barabasz-Krasny, B. Wider Use of Honey Plants in Farming: Allelopathic Potential of *Phacelia tanacetifolia* Benth.. *Sustainability* **2023**, *15*, 3061. <https://doi.org/10.3390/su15043061>

Academic Editors: Giulia Caneva and Imre J. Holb

Received: 12 December 2022

Revised: 30 January 2023

Accepted: 4 February 2023

Published: 8 February 2023



Copyright: © 2023 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

Allelopathy is considered one of the natural phenomena that affects the functioning of ecosystems at a significant level [1,2]. It includes different type of chemical interactions between organisms, realised by the synthesis and release of metabolites with inhibiting or facilitating properties for other organisms in the immediate vicinity. This term is mainly used in relation to plants. The knowledge of this phenomenon has a long history [3], however in recent decades studies on allelopathy have grown in respect to sustainable agriculture and forestry [4,5].

The knowledge of the positive or negative allelopathic effects of plants should be used in the selection of species for mixed crops and crop rotation [6–9]. Proper selection of plants can potentially reduce the negative allelopathic effects of crops (these effects in the long term can significantly reduce yields). The solution to these undesirable phenomena is the use of catch crops that interrupt unfavourable interactions between different or the same successive crop species and also contribute to the improvement of habitat conditions. Good agricultural practice proposes the use of catch crops to improve the physico-chemical and biological properties of the soil, thereby accelerating the decomposition of biomass by soil engineers, reducing weed growth, preventing soil erosion, and enriching the soil

with organic matter [10,11]. Proper crop selection should also consider plant interactions such as pest repelling and disease resistance; such considerations result in less chemical interference in crop protection, which is essential in sustainable agriculture [12,13]. Plant allelochemicals may be a substitute for synthetic pesticides, although their effectiveness and specificity are limited [14]. However, this mechanism may prove to be very important for management practices in organic farming.

One of the plants that is now increasingly used in stubble crops is *Phacelia tanacetifolia* Benth. Lacy phacelia (other common names: blue tansy, purple tansy) is a herbaceous annual plant that originates from the semi-deserts of California (North America), Once included in the borage family (Boraginaceae Juss.), it is now in a separate family waterleaf (Hydrophyllaceae R. Br. in Ker. Gawl.). It is one of the melliferous species popular among beekeepers [15]. It secretes nectar regardless of the weather and is eagerly visited by bees, even after dark [16]. It is also cultivated as a fodder plant in mixtures for direct feeding or silage [17,18]. For optimal development, it needs sufficiently moist, fertile, and warm soil [19]. As pointed out by Schappert et al. [20] phacelia more effectively covers the soil when grown in monoculture rather than in mixtures, which has a large impact on reducing surface erosion. In addition, it suppresses weeds [21] and improves the soil structure [16,22]. Tursun et al. [23] proved that phacelia as a cover crop in apricot orchards eliminates weeds by almost 75%. Live phacelia is less effective than, for example, glyphosate or mechanical weed control, but after mowing or ploughing it is more effective than these treatments. Some authors indicate [24] that the site after phacelia, compared to *Sinapis alba* L., is characterised by a greater number and biodiversity of accompanying plants, e.g., in organic oat cultivation. Based on the study of drought stress in plants in a greenhouse experiment, it was found that *P. tanacetifolia* has a much higher tolerance to water reduction compared to *Sinapis alba* and *Avena strigosa* Schreb. [19]. Furthermore, Handlířová et al. [25] found that, in an agroecosystem with a high average annual temperature and low rainfall totals, phacelia achieves higher and more stable yields compared to *Fagopyrum esculentum* Moench. In a Petri dish experiment designed to measure the palatability of organic matter of various stubble plants for earthworms *Lumbricus terrestris* L., Kliszcz, Puła [26] proved that during the first 24 h of breeding the soil-phacelia mixture the substrate uptake rate was the fastest by earthworms. In addition, on the phacelia plots, the population of endogenous earthworms increased compared to the plots with white mustard, indicating better trophic conditions for earthworms on the substrate with phacelia [27].

So far, few studies on the allelopathic potential of phacelia have been conducted to weeds [13,28], and in particular to crop plants with which this species occurs in crop rotation as a catch crop [24]. Therefore, the main aim of this laboratory experiment was to investigate the direct allelopathic effects (positive or negative) of organs of *Phacelia tanacetifolia* (flowers, stems, leaves, and roots) on the germination process, growth, and physiology (dry and fresh mass, water content, and electrolytes leakage) of cereals seedlings—*Triticosecale* Wittm. cv. Mamut.

2. Short Characteristic of Study Plant

Phacelia tanacetifolia could grow up to 100 cm high with branches in the upper part. The whole plant is rough-hairy. It has single or double even-divided leaves, with strongly notched sections (Figure 1A). The flowers are quintuple, bell-shaped, and violet-blue in colour (e.g., caused by facelianin—[29]), with a discoid nectary located on the flower base that is protected by throat scales. They are clustered in inflorescences of the helicoid cyme and scorpioid types (Figure 1A,B). The fruit here is a capsule [30]. *P. tanacetifolia* is also considered an ornamental plant; it is a summer flower that can be sowed directly into the ground (it does not like replanting). In chemical terms, it is a relatively well-known species, and the main groups of compounds found in its organs are characterised in Table 1.



Figure 1. The cultivation of *Phacelia tanacetifolia* Benth.: (A)—specimens in blooming, (B)—flowers in detail; arrows indicate features of inflorescence and leaf (Photos. A. Stachurska-Swakoń and B. Barabasz-Krasny).

Table 1. The contents of chemicals in different parts of *Phacelia tanacetifolia* Benth., according to Bajkacz et al. [31]—(B), Kruk et al. [32]—(K), and Puig et al. [28]—(P).

Chemical Compound	Concentration [ng·g ⁻¹]				[μL·ml ⁻¹]
	Roots	Stalk	Leaf	Flower	Whole Plant
Aliphatic acid:					
3-HBA (3-Hydroxybutyric acid)	2.47 (B)	0.27 (B)	0.34 (B)	21.60 (B)	-
Aromatic acids:					
3,4-DHBA (3,4-Dihydroxybenzoic acid)	211.90 (B)	212.90 (B)	230.20 (B)	347.50 (B)	-
3-HPA (3-Hydroxypicolinic acid)	0.22 (B)	0.20 (B)	1.37 (B)	7.90 (B)	-
3,4-HPPA (4-Hydroxyphenylpyruvic acid)	237.20 (B)	141.40 (B)	161.50 (B)	77.90 (B)	-
BA (Benzoic acid)	197.30 (B)	170.90 (B)	360.90 (B)	648.50 (B)	-
CA (Caffeic acid)	1444.00 (B)	873.00 (B)	811.90 (B)	404.10 (B)	98.31 (P)
DOPAC (3,4-Dihydroxyphenylacetic acid)	380.60 (B)	1199.00 (B)	1956.00 (B)	868.90 (B)	-
FA (Ferulic acid)	823.80 (B)	608.10 (B)	610.10 (B)	385.60 (B)	-
HA (Hippurid acid)	0.73 (B)	0.76 (B)	27.10 (B)	0.80 (B)	-
HVA (4-hydroxy-3-methoxyphenylacetic acid)	43.50 (B)	25.00 (B)	13.00 (B)	24.10 (B)	-
p-CA (<i>para</i> -Caffeic acid)	324.80 (B)	11,778.00 (B)	297.90 (B)	173.40 (B)	-
p-HBA (<i>p</i> -Hydroxybenzoic acid)	-	-	-	-	28.29 (P)
Ester:					
4-HBA (4-Hydroxybutyl Acrylate)	4049.00 (B)	3809.00 (B)	3915.00 (B)	4784.00 (B)	-

Table 1. Cont.

Chemical Compound	Concentration [ng·g ⁻¹]				[μL·ml ⁻¹]
	Roots	Stalk	Leaf	Flower	Whole Plant
Polyphenols:					
Ellagitannin '1'	-	-	-	-	231.59 (P)
Ellagitannin '2'	-	-	-	-	7.49 (P)
ERC (Eriocitrin)			3.09 (B)	3.09 (B)	-
ERI (Eriodictyol)	0.19(a B)	2.50 (B)	25.80 (B)	21.30 (B)	12.51 (P)
FIS (Fisetin)	-	-	-	14.70 (B)	-
HSD (Hesperidin)	0.97 (B)	57.60 (B)	66.50 (B)	93.10 (B)	-
HST (Hesperetin)	0.42 (B)		0.67 (B)	0.16 (B)	-
Luteolin derivative '4'	-	-	-	-	1.82 (P)
NAR (Naringenin)	1.00 (B)	0.99 (B)	1.88 (B)	1.60 (B)	-
NARG (Naringin)	-	0.31 (B)	-	0.78 (B)	-
NHSD (Neohesperidin)	0.52 (B)	34.10 (B)	22.20 (B)	62.10 (B)	-
NRI (Narirutin)	4.75 (B)	7.60 (B)	3.60 (B)	7.80 (B)	-
PIN (Pinocembrin)	-	-	0.33 (B)	0.24 (B)	-
QUE (Quercetin)	0.27 (B)	74.30 (B)	58.10 (B)	20.60 (B)	-
R-ERI (R-enantiomer of Eriodictyol)	-	365.00 (K)	2574.00 (K)	1502.00 (K)	-
R-NAR (R-enantiomer of Naringenin)	-	141.00 (K)	230.00 (K)	311.00 (K)	-
RUT (Rutin)	2336.00 (B)	1129.00 (B)	10,296.00 (B)	13,922.00 (B)	-
S-ERI (S-enantiomer of Eriodictyol)	-	460.00 (K)	4752.00 (K)	4461.00 (K)	-
S-HST (S-enantiomer of Hesperetin)	-	210.00 (K)	380.00 (K)	244.00 (K)	-
S-NAR (S-enantiomer of Naringenin)	-	724.00 (K)	1298.00 (K)	1656.00 (K)	-
TAX (Taxifolin)	4.00 (B)	1.59 (B)	5.90 (B)	0.79 (B)	-

Its seeds are resistant to fire and do not contain the sucrose ester 6-O-linoleyl- α -D-glucopyranosyl-b-D-fructofuranoside that is present in the closely related fire-dependent *P. minor* (Harvey) Thell., *P. brachyloba* (Benth.) A. Gray and *P. grandiflora* (Benth.) A. Gray. The seeds of these species break the dormancy period after a fire. Egerton-Warburton and Ghisalberti [33] indicate that this compound has an inhibitory effect on fire-independent species (*P. tanacetifolia* and *P. campanularia* A. Gray.).

3. Materials and Methods

3.1. Plants Material

P. tanacetifolia specimens used in the experiment conducted here were collected from the cultivation field of the Experimental Station of the University of Agriculture in Krakow—Mydlniki (Southern Poland: 50°05'02.4" N 19°51'13.8" E) in favourable conditions for the plant's growth. Divided into parts, the plants (roots, stalks, leaves, and flowers) were dried in laboratory conditions: in the dark, at room temperature, with an average air humidity of 60–70%. The dried plant material was stored in paper bags in the dark at room temperature for the duration of the experiment.

Spring triticale grains (*Triticosecale* cv. Mamut), as a testing plant in this experiment, were purchased from Małopolska Hodowla Plant Sp. z o.o., Poland.

3.2. Preparation of Extracts

Dried parts of *P. tanacetifolia* (roots, stalks, leaves, and flowers) were each separately ground into a mortar and water extracts were prepared with the following concentrations: 10%, 12.5%, 15%, and control (only distilled water). To extract chemical substances, the plant material was flooded with water and stored for 24 h in the dark and at room temperature 23 ± 2 °C (the sample was sealed with cellophane). After this time, the aqueous extracts were filtered through gauze and stored in a refrigerator at 8 ± 2 °C for the duration of the experiment.

3.3. Preparation of Cereal Grains and Conditions of Their Germination

Grains of *Triticosecale* cv. Mamut was sterilised in a 1% acetone solution for 1 min and then rinsed 3 times with distilled water. Twenty-five grains were placed in each sterile Petri dish (Ø 9 cm) with three layers of paper moistened with a suitable extract of *P. tanacetifolia*. The control group consisted of grains moistened only with distilled water. The Petri dishes were placed in the dark at room temperature (23 ± 2 °C) and 60–70% humidity.

The duration of the experiment was 7 days, as this was deemed sufficient time for the germination of triticale grains [34]. During this time, the number of germinated grains was checked every 24 h. Germinated seeds were considered those whose germinal root was equal to half the size of the grains. The experiment was carried out in 3 repetitions (each $n = 25$) for each concentration and type of phacelia extract and for the control group. On this basis, the germination parameters were determined as listed in Table 2.

Table 2. The germination coefficients formulas used in the statistical analyses.

No	Name of Parameter	Formula	According to Authors
1.	GP—Germination Percentage [%]	$GP = \frac{\sum_{i=1}^k n_i}{N} \times 100$ where: n_i : number of seeds newly germinating on day i ; N : total number of seeds tested, and k : last day of germination	Khan et al. [35]
2.	MGT—Mean Germination Time [day]	$MGT (day) = \frac{\sum_{i=1}^k n_i t_i}{\sum_{i=1}^k n_i}$ where: k —last day of germination, n_i —number of seeds newly germinating on day i , t_i —number of days from sowing	Możdżeń et al. [9]
3.	CVG—Coefficient of Velocity Germination [%]	$CVG (\%) = \frac{\sum_{i=1}^k n_i}{\sum_{i=1}^k n_i t_i} \times 100$ where: k —last day of germination, n_i —number of seeds newly germinating on day i , t_i —number of days from sowing	Bewley, Black [36], Jones, Sanders [37], Chiapusio et al. [38]
4.	GI—Germination Index [unit less]	$GI = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{t_i}$ where: k —last day of germination, n_i —number of seeds newly germinating on day i , t_i —number of days from sowing	AOSA [39]
5.	T ₅₀ —Time required for 50% germination [day]	$T_{50} = t_i + \frac{(\frac{N}{2} - n_i)(t_j - t_i)}{(n_j - n_i)}$ where: N —final number of germination, n_i, n_j —cumulative numbers of seeds germinated by adjacent counts at times t_i and t_j where $n_i < \frac{N}{2} < n_j$	Coolbear et al. [40], Farooq et al. [41]
6.	U—Uncertainty of germination process [bit]	$U (\text{bit}) = - \sum_{i=1}^k f_i \log_2 f_i$ where: U —Uncertainty of germination process, f_i is the relative frequency of germination (estimated as $f_i = \frac{n_i}{\sum_{i=1}^k n_i}$), k —last day of germination, n_i —number of seeds newly germinating on day i , t_i —number of days from sowing	Ranal, Santana [42]

3.4. Seedling Elongation Growth

Based on the measurement of seedling length *Triticosecale* cv. Mamut, watered with phacelia extracts (after 7 days of experiment), the growth inhibition index [%] of this species was determined according to the formula:

$$IP = [1 - (L_E/L_C)] \times 100, \quad (1)$$

where LE is the length of plants (mm) watered with a given emitter and LC is the length of plants (mm) from the control [43]. Seedling length measurements were made in 10 repetitions using the caliper (Topex 31C615, Warszawa, Poland) with an accuracy of 1 mm.

3.5. Plant Biomass and Water Content

Fresh mass (FM) of seedlings \times *Triticosecale* cv. Mamut was weighed on a laboratory balance (Radwag, WPS-120, Radom, Poland). They were then dried at 105 °C (Wamed SUP-100, Zabrze, Poland) to obtain dry matter (DM). The calculations of the percentage water content were made according to the following formula:

$$\text{H}_2\text{O} (\%) = 100 - [(\text{DM} \times 100)/\text{FM}] \quad (2)$$

H₂O—water, DM—dry mass, FM—fresh mass [44].

3.6. Electrolytes Leakage

Seedlings of \times *Triticosecale* cv. Mamut were placed in polypropylene falcons tubes with 30 mL of distilled water, with a conductivity of 0.05 μ S. Each falcon tube was shaken for 3 h on a shaker (Labnet, Rocker, NJ, USA) to determine electrolytes leakage from live leaves (L1). Then, the seedlings in distilled water were frozen at -75 °C for 24 h to macerate the material. The next day, the samples were thawed and subjected to the same procedures as described above, and the amount of electrolytes leakage from the dead seedlings (L2) was determined. Analyses of the degree of cell membrane destabilisation were measured using a conductivity meter (CX-701, Elmetron, Zabrze, Poland), with an electrode with constant $K = 1.02$ (Elmetron, Zabrze, Poland). Calculations were made according to the following formula:

$$\text{EL} = (\text{L1}/\text{L2}) \times 100 \quad (3)$$

EL—a percentage of electrolytes leakage, L1—electrolytes leakage in living cells, L2—a percentage of electrolytes leakage from dead cells [45]. An electrolytes leakage was measured on the seventh day of grains germination on 10 specimens for every experiment probe.

3.7. Statistical Analyses

The data sets were tested for normality using the W. Shapiro-Wilk normality test. Levene's test was used to test the homogeneity of variances. To test for differences in the experimental objects, one-way analyses of variance (ANOVA) was used as well as the post-hoc Duncan test for independent samples (Statistica 13.0 software).

4. Results

4.1. GP Germination Percentage [%]

The process of germination of grains \times *Triticosecale* cv. Mamut in the presence of extracts from the roots and stem of *Phacelia tanacetifolia* was quite homogeneous (Figure 2). Compared to the control, all types of phacelia extracts had an inhibitory effect on the germination of triticale; in the case of the root, the greatest inhibition was observed at 12.5%, and in the case of the stalk, the greatest inhibition was observed at 15% of the extract concentration (Figure 2). When using leaf extracts, strong inhibition of grain germination was observed at 12.5% and even 10% concentrations, and in the case of flowers at 12.5% and 15% concentrations of the extracts.

4.2. Other Germination Coefficients

The highest values of the MGT coefficient were recorded for grains of \times *Triticosecale* cv. Mamut that were watered with 15% extract of flowers and roots of *P. tanacetifolia*. However, they did not differ statistically significantly compared to the control. The lowest values of this parameter were found for grains watered with 10% and 12.5% phacelia leaf extract.

Only these extracts statistically significantly reduced the mean germination time of grains concerning the control (Table 3).

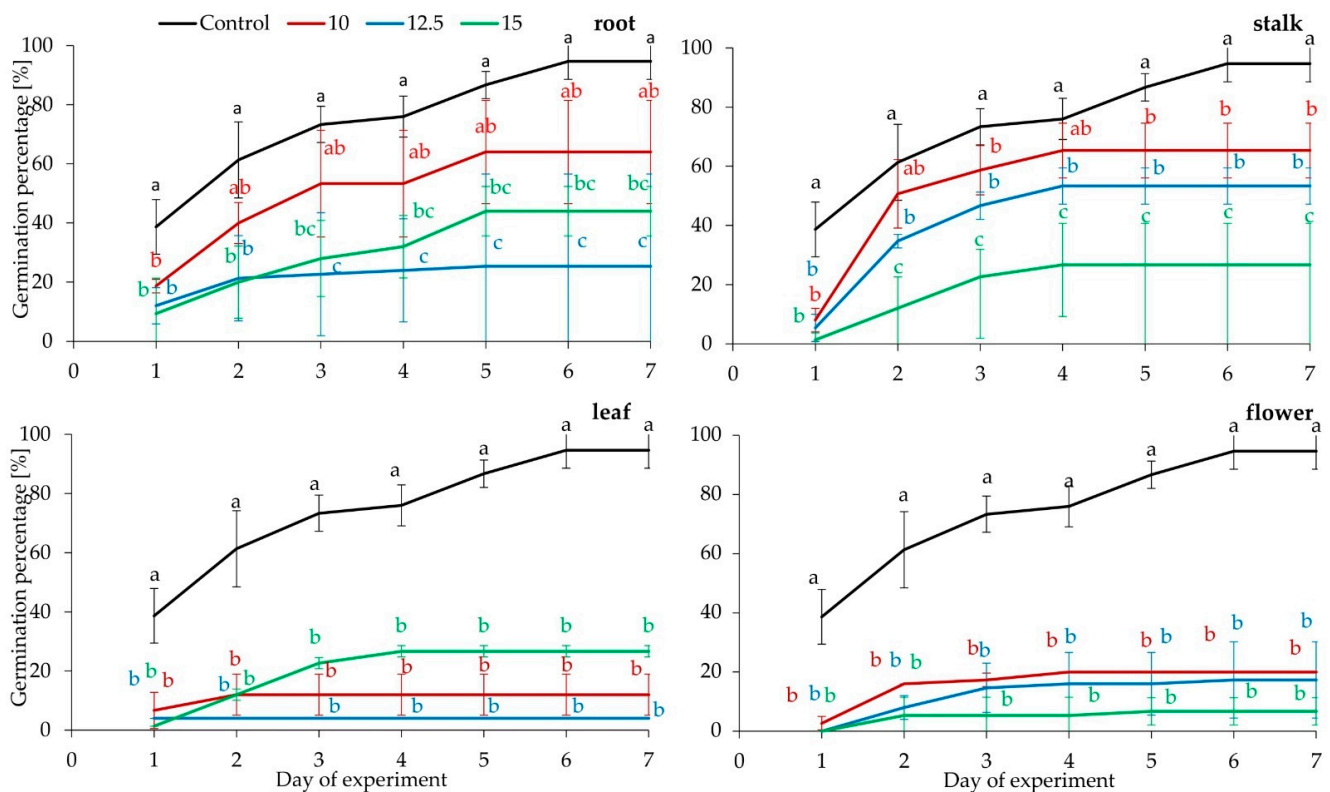


Figure 2. The cumulative germination percentage of *Triticosecale* cv. Mamut grains watered with *Phacelia tanacetifolia* Benth. organs extracts (root, stem, leaf, flower), with concentrations of 10%, 12.5%, 15%, and control (distilled water); in each sampling, means (\pm SD) marked with the same letters do not differ significantly according to Duncan's test, at $p \leq 0.05$.

The highest coefficient CVG value concerned triticale grains watered with 12.5% phacelia leaf extract, and the lowest concerned grains watered with 15% root extract (Table 3). The CVG coefficient was statistically significantly different from the control only for grains treated with 10 and 12.5% leaf extracts. This means that with a 12.5% concentration of phacelia leaf extract, triticale grains germinated quickly, but their further development was inhibited, while in the presence of 15% phacelia root extract, the germination process itself was already inhibited.

All noticed GI values were statistically significantly lower compared to controls. The highest GI values were found for triticale grains watered with 10% phacelia root extract, and the lowest with 12.5% leaf extract. In the case of the T_{50} coefficient, the highest values of this parameter concerned grains watered with 15% phacelia flower extract, and the lowest with 12.5% phacelia leaf extract. The U coefficient values turned out to be lower than the control in all extracts used here. The highest values of this coefficient were recorded for triticale grains watered with 10% root extract, and the lowest with 15% phacelia flower extract (Table 3).

4.3. Seedling Organ Length [cm]

The tested extracts inhibited the growth and development of individual organs *Triticosecale* cv. Mamut, but the effect was not uniform (Figures 3 and 4A,B). The stimulating effect of extracts was observed only in the case of the leaf sheath among seedlings watered with all concentrations of roots extracts (av. 5.18 cm compared to the control equal to 4.4 cm), 10% and 12.5% extracts of stalks (av. 5.05 cm), and 10% extracts of phacelia flowers (Figure 4B). In the case of root extracts, the stimulating effect on the leaf sheath

intensified with the increase in the concentration of the extract, and the differences were statistically significant. However, 15% phacelia stalks extract strongly inhibited the growth of this organ in the analysed seedlings (av. 1.86 cm).

Table 3. The comparison of the MGT, CVG, GI, T₅₀, and U coefficients was determined for grains of *×Triticosecale* Wittm cv. Mamut [%], which germinated on extracts from various parts of *Phacelia tanacetifolia* Benth. (root, stem, leaf, flower), with concentrations of 10%, 12.5%, 15%, and control (distilled water); means (\pm SD) marked with the same letters do not differ significantly according to Duncan's test at $p \leq 0.05$.

Extract Type [%]	MGT [Day]	CVG [%]	GI [Unit Less]	T ₅₀ [Day]	U [Bit] *
Root					
Control	2.45a \pm 0.34	41.41a \pm 6.01	14.53a \pm 1.85	1.48a \pm 0.32	2.07a \pm 0.16
10	2.41a \pm 0.17	41.65a \pm 3.08	8.98b \pm 1.84	1.59a \pm 0.21	1.78a \pm 0.19
12.5	2.07a \pm 1.05	56.37a \pm 24.67	4.43b \pm 2.80	1.61a \pm 1.23	1.25b \pm 0.38
15	2.90a \pm 0.35	34.87a \pm 4.47	5.18b \pm 3.51	2.22a \pm 0.54	1.79a \pm 0.29
Stalk					
Control	2.45ab \pm 0.34	41.41ab \pm 6.01	14.53a \pm 1.85	1.48b \pm 0.32	2.07a \pm 0.16
10	2.20b \pm 0.07	45.41a \pm 1.39	8.42b \pm 0.85	1.58b \pm 0.03	1.45ab \pm 0.34
12.5	2.37ab \pm 0.06	42.13ab \pm 1.06	6.42b \pm 1.06	1.73ab \pm 0.07	1.57ab \pm 0.33
15	2.66a \pm 0.06	37.60b \pm 0.81	2.81c \pm 1.71	2.12a \pm 0.28	1.16b \pm 0.46
Leaf					
Control	2.45a \pm 0.34	41.41c \pm 6.01	14.53a \pm 1.85	1.48ab \pm 0.32	2.07a \pm 0.16
10	1.47b \pm 0.50	73.81b \pm 25.08	2.33b \pm 1.53	0.94bc \pm 0.51	0.32b \pm 0.56
12.5	1.00b \pm 0.00	100.00a \pm 0.0	1.00b \pm 0.00	0.50c \pm 0.00	0.00b \pm 0.00
15	2.11a \pm 0.19	47.62c \pm 4.12	1.28b \pm 0.25	1.58a \pm 0.12	0.31b \pm 0.53
Flower					
Control	2.45a \pm 0.34	41.41a \pm 6.01	14.53a \pm 1.85	1.48a \pm 0.32	2.07a \pm 0.16
10	2.20a \pm 0.00	45.45a \pm 0.00	2.61b \pm 0.24	1.54a \pm 0.07	1.15b \pm 0.37
12.5	2.65a \pm 0.42	38.29a \pm 5.63	1.69b \pm 1.09	2.03a \pm 0.29	1.24b \pm 0.49
15	3.00a \pm 1.73	40.00a \pm 17.32	0.73b \pm 0.68	2.50a \pm 1.73	0.00c \pm 0.00

* MGT—Mean germination time; CVG—Coefficient of velocity germination; GI—Germination index; T₅₀—Time required for 50% germination, U—Uncertainty of germination process.

The highest inhibitory effect, after using extracts from phacelia leaves, was visible in the case of triticale roots, which showed nearly 30 times lower values for the average length of roots of seedlings watered with extracts compared to the control (Figure 4A). Length parameters closest to the control values were found in the aboveground parts of triticale seedlings watered with 10% phacelia root extracts; lower values were recorded only at 12.5% and 15% concentrations of extracts, but the 15% extracts inhibited the growth of this part of seedlings to a lesser extent than the 12.5% (av. 7.8 cm and 13.0, respectively). Extracts from phacelia leaves and flowers in almost every percentage contributed to a strong inhibition of leaf sheath growth, but the effect of leaf extracts most strongly inhibited the growth of this organ (Figure 4B).

4.4. Fresh and Dry Mass [g] and Water Content in Seedlings [%]

The 12.5% phacelia root extract caused a significant decrease in the fresh mass of triticale seedlings compared to the control (Table 4). At other concentrations of extracts, the fresh weight was higher, but these differences are statistically insignificant. All extracts from the stalks, leaves, and flowers of phacelia significantly decreased the fresh mass of triticale seedlings compared to the control.

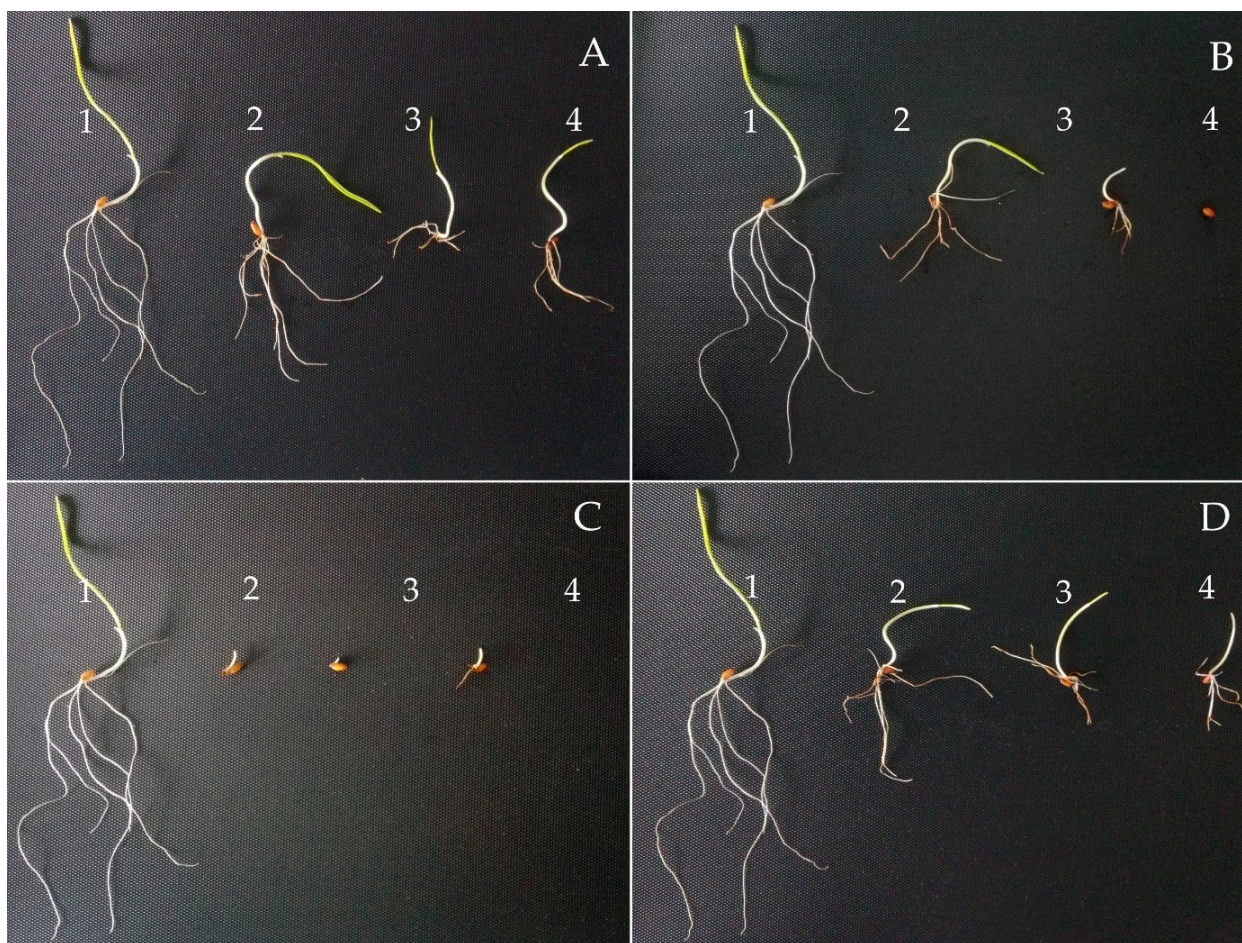


Figure 3. The seedlings of *×Triticosecale* Wittm cv. Mamut after watering with extracts from *Phacelia tanacetifolia* Benth. organs (extracts from (A)—roots, (B)—flowers, (C)—leaves, (D)—stems), with different concentrations (1—control: distilled water, 2—10%, 3—12.5%, 4—15%), on the 7th day of experiment (Photo: A. Kliszcz).

Higher dry mass values of spring triticale seedlings were noted after the use of all types of extracts and their concentrations, with statistically significant relationships noted only for the comparison of the control with the concentrations used. Between concentrations, the results were statistically insignificant. For seedlings watered with extracts from phacelia flowers in all concentrations used, the dry mass values obtained did not differ statistically significantly from the control (Table 4).

The percentage of water content was lower in seedlings watered with extracts from phacelia organs in different concentrations, compared to the control (Table 4). The lowest values of this parameter were recorded for triticale seedlings watered with 12.5% phacelia leaf extract; the results for seedlings watered with 10% flower extract were statistically insignificant.

4.5. Electrolytes Leakage from Seedlings

All concentrations of extracts from phacelia organs used here caused a statistically significant, concerning the control, leakage of electrolytes from the cells of triticale seedlings (Figure 5). The highest electrolytes leakage was observed for all concentrations of leaf extracts (especially 10%), and these leakages were comparable regardless of the concentration. The smallest values of leakages were recorded for extracts from phacelia roots (also 10%).

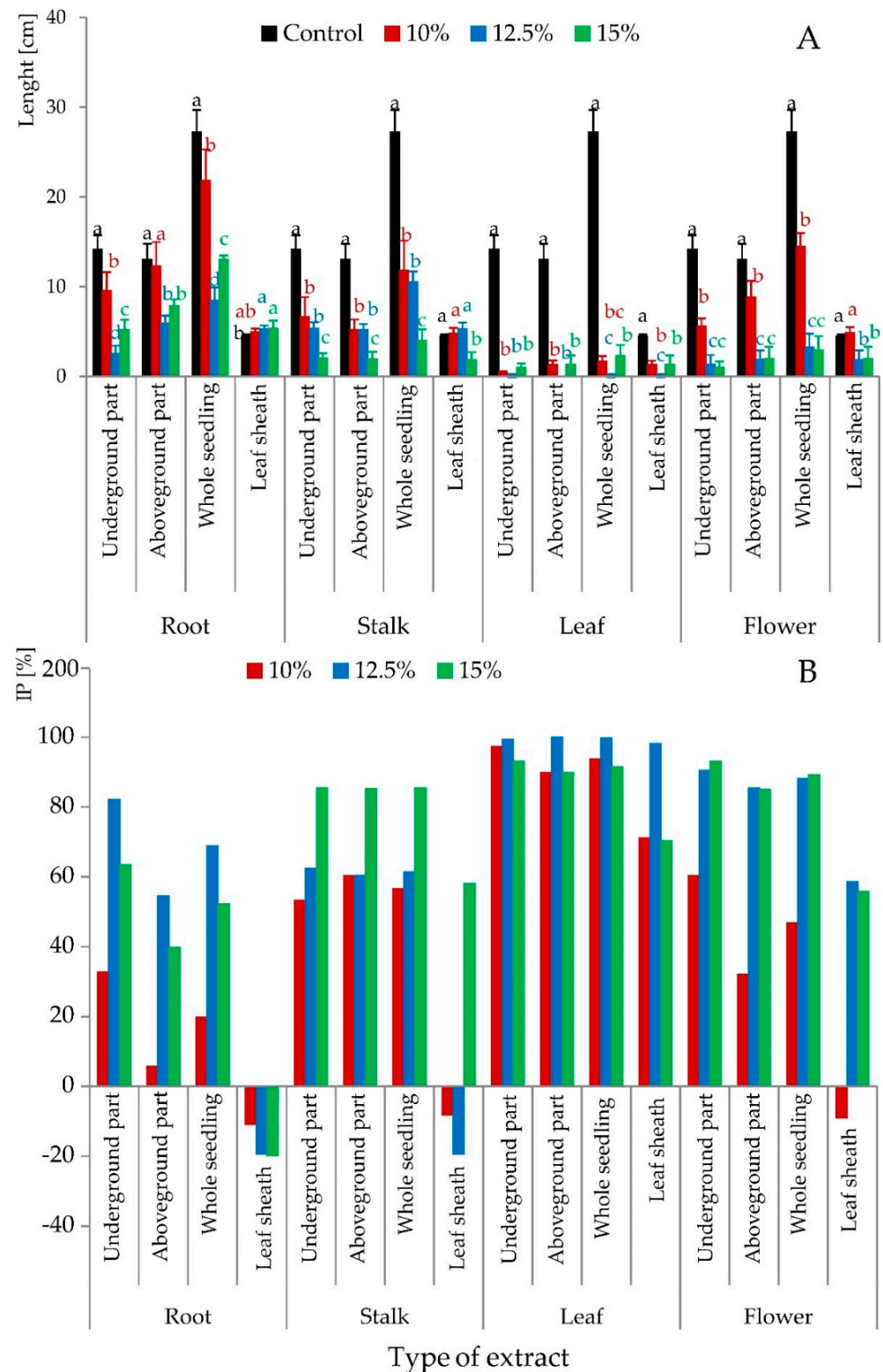


Figure 4. The comparison of organ length [cm]—(A) and growth inhibition index IP [%]—(B) of *Triticosecale* Wittm. cv. Mamut seedlings, watered with extracts from the roots, stalks, leaves, and flowers of *Phacelia tanacetifolia* Benth., in various concentrations; means (\pm SD) marked with the same letters do not differ significantly according to Duncan’s test at $p \leq 0.05$.

Table 4. The comparison of fresh and dry mass [g] and water content [%] in *×Triticosecale* Wittm cv. Mamut seedlings, which have grown in the presence of extracts from various parts of *Phacelia tanacetifolia* Benth. with concentrations of 10%, 12.5%, 15%, and control (distilled water); means (\pm SD) marked with the same letters do not differ significantly according to Duncan's test at $p \leq 0.05$.

Extract Type [%]	Fresh Mass [g]	Dry Mass [g]	Dry Mass/Fresh Mass	Total Water Content [%]
Root				
Control	0.2703a \pm 0.0632	0.0205b \pm 0.0052	0.0754d \pm 0.0038	92.46a \pm 0.38
10	0.3005a \pm 0.0317	0.0266ab \pm 0.0017	0.0890c \pm 0.0070	91.10b \pm 0.70
12.5	0.2048b \pm 0.0477	0.0316a \pm 0.0086	0.1541a \pm 0.0124	84.59d \pm 0.94
15	0.2726a \pm 0.0220	0.0329a \pm 0.0050	0.1204b \pm 0.0123	87.96c \pm 1.23
Stalk				
Control	0.2703a \pm 0.0632	0.0205b \pm 0.0052	0.0754c \pm 0.0038	92.46a \pm 0.38
10	0.2224ab \pm 0.0294	0.0348a \pm 0.0032	0.1598b \pm 0.0368	84.02b \pm 3.68
12.5	0.1925b \pm 0.0170	0.0338a \pm 0.0024	0.1761b \pm 0.0108	82.39b \pm 1.08
15	0.1200c \pm 0.0206	0.0334a \pm 0.0059	0.2795a \pm 0.0346	72.05c \pm 3.46
Leaf				
Control	0.2703a \pm 0.0632	0.0205b \pm 0.0052	0.0754c \pm 0.0038	92.46a \pm 0.38
10	0.0958b \pm 0.0234	0.0322a \pm 0.0098	0.3332b \pm 0.0472	66.68b \pm 4.72
12.5	0.0751b \pm 0.0079	0.0321a \pm 0.0024	0.4312a \pm 0.0610	56.88c \pm 6.10
15	0.0915b \pm 0.0216	0.0301a \pm 0.0051	0.3431b \pm 0.0832	65.69b \pm 8.32
Flower				
Control	0.2703a \pm 0.0632	0.0205a \pm 0.0052	0.0754b \pm 0.0038	92.46a \pm 0.38
10	0.1910b \pm 0.0221	0.0250a \pm 0.0044	0.1329b \pm 0.0342	86.71a \pm 3.42
12.5	0.0924c \pm 0.0287	0.0268a \pm 0.0079	0.2934a \pm 0.0321	70.66b \pm 3.21
15	0.0923c \pm 0.0274	0.0262a \pm 0.0085	0.2896a \pm 0.0929	71.04b \pm 9.29

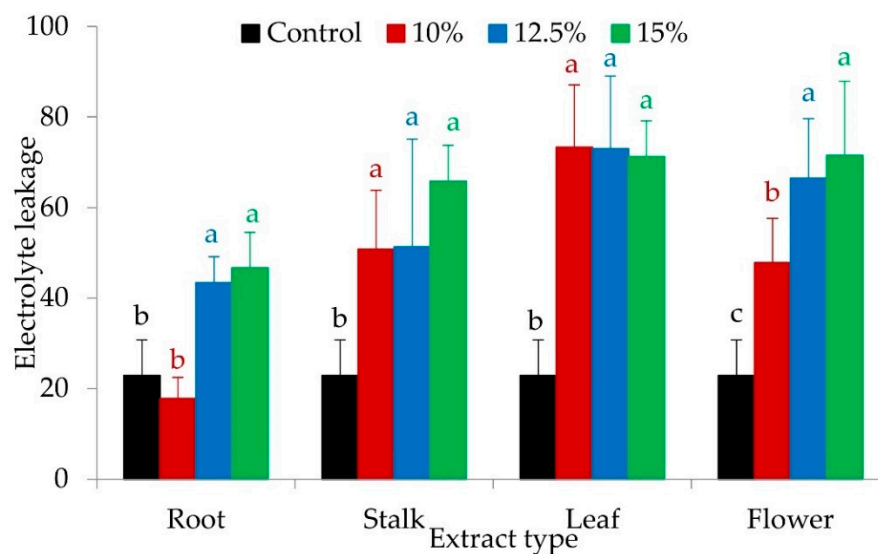


Figure 5. The electrolytes leakage [%] in seedling cells of *×Triticosecale* Wittm cv. Mamut, watered with extracts from root, stalk, leaf, and flower of *Phacelia tanacetifolia* Benth. at concentrations of 10%, 12.5%, 15%, and control (distilled water); means (\pm SD) marked with the same letters do not differ significantly according to Duncan's test at $p \leq 0.05$.

5. Discussion

In laboratory conditions, the interactions between plants are direct and primary, while in field conditions, the direction and strength of these interactions are modified by the components of the soil agroecosystem and climatic conditions. As previous studies have shown, crop plants can also have high allelopathic potential [46–50]. Higher concentrations of allelopathic substances can have a negative effect on seed swelling, inhibit

hormones and enzymes, damage seed coats and the aleurone layer, and inhibit cell elongation. As a result, these anatomical and morphological distortions significantly delay seed germination [51,52]. However, at lower concentrations, allelopathic compounds may exhibit stimulating properties [8,53]. In an experiment carried out here with *Phacelia tanacetifolia* extracts, all types of extracts inhibited the germination of \times *Triticosecale* cv. Mamut, compared to the control. This is clearly illustrated by the lower values of the GP and GI coefficients obtained here (Figure 2; Table 3). The extracts from the leaves and flowers of phacelia were probably characterised by a higher content of allelochemicals because they inhibited the germination of triticale more significantly than extracts from the roots or stalks of this plant. Bajkacz et al. [31], Kruk et al. [32], and Puig et al. [28], analysed aqueous extracts from various parts of *P. tanacetifolia* (flowers, stalks, leaves, and roots) and deciphered a cocktail of secondary metabolites within these parts (Table 1). However, it is not known exactly which of these compounds plays the most important role in the allelopathic potential of the analysed species. There are probably numerous phenolic compounds and flavonoids.

Allelopathic compounds inhibit the elongation of the germinal root, leading to its death, which was most evident in the case of phacelia leaf extracts (Figure 4A). During the contact of the root with allelochemicals, cell and tissue dysfunction occurred, which resulted in, among other things, the lack of root hairs formation, lateral roots (horizontal growth of the roots), and an increase in the chromosome aberration index of the root cells [54]. In many previous experiments, the negative effect of allelochemicals from crop plants on the elongation growth of other crop plants has been documented, e.g., rye for cucumber roots [55], sesame and rapeseed [56], mung bean for tobacco [48], cotton and sesame [57], or peppermint for radish [7]. Inhibition of root growth by allelopathic compounds may be a consequence of mitotic disturbances due to damage to the chromatin and the karyokinetic spindle [58]. With the increase of the concentration of phacelia extracts, their negative effect on grain germination increased (Figure 3), which is probably related to the increase in the concentration of allelopathic compounds in the tested extracts. The reactions of germinating triticale grains to the applied extracts, such as inhibition of the growth of aboveground parts, lower increase in seedling biomass, and inhibition of root growth, may therefore be the effect of the allelopathic compound's action mechanisms that are contained in different parts of the phacelia

However, not all allelochemicals have an inhibitory effect, as already mentioned above. The experiment carried out here pointed that allelopathic substances from phacelia root extracts have a stimulating effect on the initial growth of the triticale leaf sheath (Table 3); they at least inhibit the growth and development of the aboveground and underground parts of its seedlings. The leaf sheath is the organ responsible for the physical protection of the germinating seed and young plant, and for protecting the hypocotyl developing inside it (until it is ready to start photosynthesis). The analysed data show that this structure is not indifferent to substances contained in its environment (probably also soil) and grows in length, and its growth is stimulated by allelochemicals.

All extracts from the stalks, leaves, and flowers of phacelia significantly decreased the fresh mass of triticale seedlings, compared to the control. A similar trend was related to the percentage of water content in triticale seedlings. In the case of a dry mass of seedlings, the opposite tendency was observed (Table 4). Allelochemicals can change the content of plant growth regulators or cause imbalances in various phytohormones, which inhibits plant development and consequently affects seedling mass parameters, e.g., [59,60]. Most phenolic allelochemicals can, for example, stimulate IAA oxidase activity and inhibit the reaction of POD (peroxidase) with IAA (indoleacetic acid), bound GA (gibberellins), or IAA, to affect endogenous hormone levels [61]. Allelopathic substances also cause enzyme dysfunction and mineral and water absorption disorders, resulting in changes in plant growth [62]. They have a clear influence on the water relations in the plant [63,64]. For example, the presence of phenolic acids plays an important role in the regulation of diffusion, as well as in maintaining the correct water potential in cells [65,66].

The published studies show that changes in the permeability of cell membranes under the influence of stress are accompanied by the generation and accumulation of reactive oxygen species (ROS) [67–69]. ROS cause peroxidation of membrane lipids, thus affecting changes in membrane permeability, composition, and structure. Many studies have shown that allelochemicals significantly inhibit the activity of antioxidant enzymes and increase the level of free radicals. This, in turn, reduces the scavenging effect of activated oxygen and damages the entire membrane system of the plants. In extreme cases, this leads to programmed cell death [70–73]. The ability of many natural plant products to bind to membranes is manifested not only by conformational changes in ion channels and proteins but also by increasing or decreasing the flow of ions [68]. This generally indicates the presence of environmental stress caused by these extracts. Probably, such mechanisms acted also on the cells of the triticale seedlings studied here. It was found in our experiment with phacelia that all types of extracts increased the electrolytes leakage from triticale seedling cells, except for 10% phacelia root extract (Figure 5). However, regardless of the concentration, the leaf extracts caused the leakage of electrolytes at the same—highest level (av. 72.48%).

Most of the tested parameters of germination and early growth of triticale indicate the negative impact of aqueous extracts of *P. tanacetifolia* (Table 5). At the same time, it is worth emphasising that the allelopathic potential of phacelia compared to other species, for example, *Juglans regia* L. [4], or *Mentha × piperita* L. [8,45,74], is relatively small, and is noticeable only at concentrations of extracts of 10% and above. The use of stubble crops with weak allelopathic potential is one of the sustainable development strategies in agriculture and is currently implemented within the scope of “Agri-environment-climate measures in the European Union” [75]. It is beneficial especially in cereal monocultures, e.g., [21,59,76–80]. It has already been proven that the cultivation of phacelia as a catch crop in apple and peach orchards alleviates soil sickness, significantly lowering the concentration of phytotoxic phenols in the soil solution and improving soil biological activity. Patkowska, Konopiński [81] showed that soil mulching with *P. tanacetifolia* reduces fungal infections of seedling roots in *Tragopogon porrifolius* L. var. *sativus* (Gaterau) Br., while according to Konopiński [82], mulching the soil with phacelia has no significant effect on the emergence of *Scorzonera hispanica* L. ‘Lange Jan’.

Table 5. The comparison of the studied parameters concerning the allelopathic effect of *Phacelia tanacetifolia* Benth on *×Triticosecale* Wittm. cv. Mamut; colour indicates the type of impact: favourable (green), unfavourable (red), or neutral (grey).

Parameter	Extract Concentrate [%]											
	10				12.5				15			
	R	S	L	F	R	S	L	F	R	S	L	F*
GP(%)	Grey	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red
MGT	Grey	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red
CVG	Grey	Green	Green	Green	Grey	Green	Green	Green	Grey	Green	Green	Green
GI	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red
T ₅₀	Grey	Red	Red	Red	Grey	Red	Red	Red	Grey	Red	Red	Red
U	Grey	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
Seedling length	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red
Fresh mass	Grey	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Grey	Red	Red	Red
Dry mass	Grey	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
Total water content	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red
EL (%)	Grey	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red

* R—root; S—stalk; L—leaf; F—flower.

In the experiment carried out, the aboveground parts of phacelia (especially leaves and flowers) showed a strong inhibitory effect on the growth of the entire triticale seedling (Table 3). Concerning field conditions, this type of action may contribute to delaying the germination process of triticale or other cereal plants. However, this effect is probably

significantly weakened by the deposition of plant material from phacelia in the soil and is shaped by the biotope. Leaves and flowers are the organs that, due to the structure of the tissues, decompose the fastest after the termination of the stubble crop (they contain less difficult-to-decompose lignin and cellulose), hence the quick release of their allelopathic substances. The main factors levelling the adverse effects of allelopathic compounds are the mesofauna and soil microflora. These organisms can decompose polyphenolic compounds and flavonoids from plant biomass. For example, Liebeke et al. [83] indicated that drillodefensins (surface active lipophilic ions 259.1013 Da, which m/z are consistent with a molecular formula of $C_{12}H_{19}O_4S^-$) are produced in the foregut section of earthworms' intestine system and help them digest phenolic-rich residues of plant materials. Earthworms belonging to the *anecic* ecological group feed on litter (mulch), while the *endogeic* group processes the ploughed remains of the stubble crop in the soil. The affinity of some fungal decomposers, such as *Mucor* sp., concerning the fresh mass of plant residues introduced into the soil has also been proven [84]. In this context, it seems important to maintain an appropriate time regime between the termination of the stubble crop and the sowing of the cereal plant, so that the decomposition of allelochemicals by living organisms can take place and be accelerated by physical processes (freezing, thawing, drying, moistening, solar radiation, including UV). It can be assumed that the efficiency of decomposition of this type of compound will be a derivative of the network of connections and the efficiency of individual components of the agroecosystem, their abundance, and biodiversity [27,85].

In the term of the laboratory tests carried out here and the primary directions of interactions between phacelia and triticale recorded, it would be worth undertaking further experiments to determine the effect of phacelia on the growth and development of cereal plants, in conditions of field. Another interesting direction of research would be to reveal the impact of phacelia on other crop species to indicate those that are most resistant to its allelochemicals, which is important from the point of view of implementing research into agricultural practice.

6. Conclusions

Our experiment proves that *Phacelia tanacetifolia* Benth. has an allelopathic potential. All concentrations of extracts from roots, stems, leaves, and flowers of *P. tanacetifolia* inhibited the germination of \times *Triticosecale* Wittm. cv. Mamut, compared to the control. Extracts from the roots of phacelia had the smallest effect on the length of the underground and aboveground parts, and leaf extracts showed the strongest inhibitory effect on individual parts of triticale seedlings. Leaf sheath length was significantly stimulated by all concentrations of phacelia root extract. All concentrations of stalks, leaves, and flowers extracts as well as 12.5% roots extract resulted in a statistically significant reduction in the fresh mass of triticale seedlings, compared to the control. All types of extracts (in all concentrations) caused an increase in the dry mass of triticale seedlings regarding the control, and a statistically significant leakage of electrolytes from the cells of triticale seedlings.

Negative allelopathic effects of *P. tanacetifolia* on germinating triticale grains were found in these laboratory tests, but only in higher concentrations (the positive effect concerned the stimulation of the growth of the leaf sheath). Given the possibility of using phacelia as a stubble crop in the cultivation of cereal plants, its biomass may have a positive effect on cereals through the accumulation of organic matter in the soil, with a relatively weak allelopathic potential.

Author Contributions: Conceptualisation, A.K., K.M., B.B.-K., J.P. and A.T.; methodology, K.M., A.K., A.T. and P.Z.; software, A.T. and P.Z.; validation, A.K., K.M., B.B.-K. and A.S.-S.; formal analysis, A.K., A.T. and P.Z.; investigation, A.K., K.M. and A.T.; resources, K.M., B.B.-K. and J.P.; data curation, A.K., K.M., J.P. and A.S.-S.; writing—original draft preparation, B.B.-K. and A.T.; writing—review and editing, B.B.-K., A.T., A.K., J.P. and A.S.-S.; visualisation, A.K., A.T., B.B.-K. and A.S.-S.; supervision, A.K., K.M., B.B.-K. and J.P.; project administration, K.M., A.K., B.B.-K. and A.T.; funding acquisition, B.B.-K. and A.T. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: The research was financed by the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Poland: by the research of the Pedagogical University in Krakow BN.711-161/PBU/2022 (the article was financed by the Pedagogical University of Krakow, grant no. DNa.302.25.2023.RN).

Informed Consent Statement: Not applicable.

Data Availability Statement: All additional materials and data are available from the authors.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

- Macias, F.A.; Oliveros-Bastidas, A.; Marin, D.; Carrera, C.; Chinchilla, N.; Molinillo, J.M.G. Plant biocommunicators: Their phytotoxicity, degradation studies and potential use as herbicide models. *Phytochem. Rev.* **2008**, *7*, 179–194. [\[CrossRef\]](#)
- Macias, F.A.; Durán, A.G.; Molinillo, J.M.G. Allelopathy: The chemical language of plants. *Prog. Chem. Org. Nat. Prod.* **2020**, *112*, 1–84. [\[CrossRef\]](#)
- Willis, R.J. *The History of Allelopathy*; Springer: Dordrecht, The Netherlands, 2010; p. 316. ISBN 978-1-4020-4092-4. [\[CrossRef\]](#)
- Vyvyan, J.R. Allelochemicals as leads for new herbicides and agrochemicals. *Tetrahedron* **2002**, *58*, 1631–1646. [\[CrossRef\]](#)
- Zeng, R. Allelopathy in Chinese ancient and modern agriculture. In *Allelopathy in Sustainable Agriculture and Forestry*; Zeng, R., Mallikand, A., Luo, S., Eds.; Springer: New York, NY, USA, 2008; pp. 39–50.
- Zeng, R.S. Allelopathy—The solution is in direct. *J. Chem. Ecol.* **2014**, *40*, 515–516. [\[CrossRef\]](#)
- Szafraniec, R.; Możdżeń, K.; Barabasz-Krasny, B.; Zandi, P.; Wang, Y. Influence of volatile peppermint (*Mentha × piperita* L.) compounds on germination and seedling of radish (*Raphanus sativus* L. var. *radicula* Pers.) Growth. *Not. Bot. Horti. Agrobot.* **2019**, *47*, 1277–1284. [\[CrossRef\]](#)
- Możdżeń, K.; Barabasz-Krasny, B.; Stachurska-Swakoń, A.; Zandi, P.; Puła, J. Effect of aqueous extracts of peppermint (*Mentha × piperita* L.) on the germination and the growth of selected vegetable and cereal seeds. *Not. Bot. Horti. Agrobot. Cluj Napoca.* **2019**, *47*, 412–417. [\[CrossRef\]](#)
- Możdżeń, K.; Barabasz-Krasny, B.; Stachurska-Swakoń, A.; Zandi, P.; Puła, J.; Wang, Y.; Turisova, I. Allelopathic interaction between two common meadow plants: *Dactylis glomerata* L. and *Trifolium pratense* L. *Biologia Springer* **2020**, *75*, 653–663. [\[CrossRef\]](#)
- Moraes, P.V.D.; Agostinetto, D.; Vignolo, G.K.; Santos, L.S.; Panozzo, L.E. Cover crop management and weed control in corn. *Planta Daninha.* **2009**, *27*, 289–296. [\[CrossRef\]](#)
- Wang, C.M.; Jhan, Y.L.; Yen, L.S.; Su, Y.H.; Chang, C.C.; Wu, Y.Y.; Chang, C.I.; Tsay, S.Y.; Chou, C.H. The allelochemicals of litchi leaf and its potential as natural herbicide in weed control. *Allelopathy J.* **2013**, *32*, 157–173.
- Jabran, K.; Mahajan, G.; Sardana, V.; Chauhan, B.S. Allelopathy for weed control in agricultural systems. *J. Crop Prot.* **2015**, *72*, 57–65. [\[CrossRef\]](#)
- Pytlarz, E.; Gala-Czekaj, D. Possibilities of using seed meals in control of herbicide-susceptible and -resistant biotypes of rye brome (*Bromus secalinus* L.) in winter wheat. *Plants* **2022**, *11*, 331. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
- Bhadoria, P. Allelopathy: A natural way towards weed management. *Am. J. Exp. Agric.* **2011**, *1*, 7–20. [\[CrossRef\]](#)
- Hickman, J.M.; Wratten, W.D. Use of *Phacelia tanacetifolia* strips to enhance biological control of aphids by hoverfly larvae in cereal fields. *J. Econ. Entomol.* **1996**, *89*, 832–840. [\[CrossRef\]](#)
- Lipiński, M. *Pożytki pszczele. Zapylanie i miłododajność*; PWRiL: Warszawa, Poland, 2010; ISBN 9788309990246. (In Polish)
- Kälber, T.; Kreuzer, M.; Leiber, F. Milk fatty acid composition of dairy cows fed green whole-plant buckwheat, phacelia or chicory in their vegetative and reproductive stage. *Anim. Feed Sci. Technol.* **2014**, *193*, 71–83. [\[CrossRef\]](#)
- Akbay, F.; Kamalak, A.; Erol, A. Arı Otu (*Phacelia tanacetifolia* Bentham) ’nun Vejetatif Dönemlerinin Ot Verimine, Besin Madde İçeriğine ve Metan Üretimine Etkisi. *Kahramannaras Sütçü İmam univ. doğa bilim. derg.* **2020**, *23*, 981–985. (In Turkish) [\[CrossRef\]](#)
- Schappert, A.; Linn, A.I.; Sturm, D.J.; Gerhards, R. Weed suppressive ability of cover crops under water-limited conditions. *Plant Soil Environ.* **2019**, *65*, 541–548. [\[CrossRef\]](#)
- Schappert, A.; Schumacher, M.; Gerhards, R. Weed control ability of single sown cover crops compared to species mixtures. *Agronomy* **2019**, *9*, 294. [\[CrossRef\]](#)
- Błażewicz-Woźniak, M.; Patkowska, E.; Konopiński, M.; Wach, D. Effect of cover crops and ploughlees tillage on weed infestation of field after winter before pre-sowing tillage. *Romanian Agric. Res.* **2016**, *33*, 185–194.
- Bacq-Labreuil, A.; Crawford, J.; Mooney, S.; Neal, A.; Ritz, K. Phacelia (*Phacelia tanacetifolia* Benth.) affects soil structure differently depending on soil texture. *Plant Soil.* **2019**, *441*, 543–554. [\[CrossRef\]](#)
- Tursun, N.; Işık, D.; Demir, Z.; Jabran, K. Use of Living, Mowed, and Soil-Incorporated Cover Crops for Weed Control in Apricot Orchards. *Agronomy* **2018**, *8*, 150. [\[CrossRef\]](#)
- Wesołowski, M.; Cierpiała, R. Wpływ przyorywanego rodzaju międzyplonu ścierniskowego na plonowanie i zachwaszczenie owsa w uprawie ekologicznej. *Fragm. Agron.* **2013**, *30*, 133–144. (In Polish)
- Handlířová, M.; Procházková, B.; Smutný, V. Yields of selected catch crops in dry conditions. *Acta Univ. Agric. Silv. Mendel Brun.* **2016**, *64*, 1139–1148. [\[CrossRef\]](#)
- Kliszcz, A.; Puła, J. Assessment of earthworms activity based on eaten biomass from selected catch crops. *AUPC Stud. Nat.* **2019**, *4*, 81–90. [\[CrossRef\]](#)

27. Kliszcz, A.; Puła, J. The change of pH value and octolasion cyaneum savigny earthworms' activity under stubble crops after spring *Triticale* continuous cultivation. *Soil Syst.* **2020**, *4*, 39. [CrossRef]
28. Puig, C.G.; Valencia-Gredilla, F.; Pardo-Muras, M.; Souto, X.C.; Recasens, J.; Pedrol, N. Predictive phytotoxic value of water-soluble allelochemicals in plant extracts for choosing a cover crop or mulch for specific weed control. *Ital. J. Agron.* **2021**, *16*. Available online: <https://www.agronomy.it/index.php/agro/article/view/1872> (accessed on 30 November 2022). [CrossRef]
29. Mori, M.; Kondo, T.; Toki, K.; Yoshida, K. Structure of anthocyanin from the blue petals of *Facelia campanularia* and its blue flower color development. *Phytochemistry* **2006**, *67*, 622–629. [CrossRef]
30. Walden, G.K.; Patterson, R.W.; Garrison, L.M.; Hansen, D.R. *Phacelia tanacetifolia*, in Jepson Flora Project. Jepson eFlora, Revision 9, 2021. Available online: https://ucjeps.berkeley.edu/eflora/eflora_display.php?tid=37579 (accessed on 28 October 2022).
31. Bajkacz, S.; Baranowska, I.; Buszewski, B.; Kowalski, B.; Ligor, M. Determination of flavonoids and ohenolic acids in plant materials using SLE-SPE-UHPLC-MS/MS Method. *Food Anal. Methods.* **2018**, *11*, 3563–3575. [CrossRef]
32. Kruk, J.; Baranowska, I.; Buszewski, B.; Bajkacz, S.; Kowalski, B.; Ligor, M. Flavonoids enantiomer distribution in different parts of goldenrod (*Solidago virgaurea* L.), lucerne (*Medicago sativa* L.) and phacelia (*Phacelia tanacetifolia* Benth.). *Chirality* **2019**, *31*, 138–149. [CrossRef]
33. Egerton-Warburton, L.M.; Ghisalberti, E.L. Isolation and structural identification of a germination inhibitor in fire-recruiters from the California chaparral. *J. Chem Ecol.* **2001**, *27*, 371–382. [CrossRef]
34. Kramek, A.; Kociuba, W. Zdolność kiełkowania ziarniaków oraz wartość cech plonotwórczych materiałów kolekcyjnych pszenżyta jarego (*Triticale* Wittmack) po długotrwałym przechowywaniu. *Zesz. Problem. Post. Nauk Roln.* **2010**, *555*, 115–123. (In Polish)
35. Khan, R.; Khan, M.A.; Waheedullah Waqas, M.; Khan, A.M.; Hussain, Z.; Khan, A.; Raza, M.A. Allelopathic potential of *Silybum marianum* L. against the seed germination of edible legumes. *Pak. J. Weed Sci. Res.* **2011**, *17*, 293–302.
36. Bewley, J.D.; Black, M. *Seeds: Physiology of Development and Germination*; Plenum Press: New York, NY, USA, 1985; p. 367.
37. Jones, K.W.; Sanders, D. The influence of soaking pepper seed in water or potassium salt solutions on germination at three temperatures. *J. Seed Technol.* **1987**, *11*, 97–102. [CrossRef]
38. Chiapusio, G.; Sánchez, A.M.; Reigosa, M.J.; González, L.; Pellissier, F. Do germination indices adequately reflect allelochemical effects on the germination process? *J. Chem. Ecol.* **1997**, *23*, 2445–2453. [CrossRef]
39. Association of Official Seed Analysts (AOSA). *Seed Vigour Testing Handbook. Handbook of Seeds Testing*; Contribution no. 32; AOSA: Ithaca, NY, USA, 1983.
40. Coolbear, P.; Francis, A.; Grierson, D. The effect of low temperature pre-sowing treatment on the germination performance and membrane integrity of artificially aged tomato seeds. *J. Exp. Bot.* **1984**, *35*, 1609–1617. [CrossRef]
41. Farooq, M.; Basra, S.M.A.; Afzal, I.; Khaliq, A. Optimization of hydropriming techniques for rice seed invigoration. *Seed Sci. Technol.* **2006**, *34*, 507–512. [CrossRef]
42. Ranal, M.A.; Santana, D.G. How and why to measure the germination process? *Rev. Bras. Bot.* **2006**, *29*, 1–11. [CrossRef]
43. Islam, A.K.M.; Kato-Noguchi, H. Allelopathic potentiality of medicinal plant *Leucas aspera*. *Inter. J. Agri. Sustain.* **2012**, *4*, 1–7.
44. Lipniak, K.; Kliszcz, A. Allelopathic effect of goosefoot on germination and early stage growth of triticale and radish. *AUPC Stud. Nat.* **2020**, *5*, 110–128. [CrossRef]
45. Skrzypek, E.; Repka, P.; Stachurska-Swakoń, A.; Barabasz-Krasny, B.; Możdżeń, K. Allelopathic effect of aqueous extracts from the leaves of peppermint (*Mentha × piperita* L.) on selected physiological processes of common sunflower (*Helianthus annuus* L.). *Not. Bot. Horti. Agrobot. Cluj Napoca.* **2015**, *43*, 335–342. [CrossRef]
46. Mahmood, A.; Cheema, Z.A.; Mushtaq, M.N.; Farooq, M. Maize-sorghum intercropping systems for purple nutsedge management. *Arch. Agron Soil Sci.* **2013**, *59*, 1279–1288. [CrossRef]
47. Wortman, S.E.; Drijber, R.A.; Francis, C.A.; Lindquist, J.L. Arable weeds, cover crops, and tillage drive soil microbial community composition in organic cropping systems. *Appl. Soil Ecol.* **2013**, *72*, 232–241. [CrossRef]
48. Farooq, M.; Hussain, T.; Wakeel, A.; Cheema, Z.A. Differential response of maize and mung bean to tobacco allelopathy. *Exp. Agric.* **2014**, *50*, 611–624. [CrossRef]
49. Wezel, A.; Casagrande, M.; Celette, F.; Vian, J.F.; Ferrer, A.; Peigne, J. Agroecological practices for sustainable agriculture. A review. *Agron. Sustain. Dev.* **2014**, *34*, 1–20. [CrossRef]
50. Haider, G.; Cheema, Z.A.; Farooq, M.; Wahid, A. Performance and nitrogen use of wheat cultivars in response to application of allelopathic crop residues and 3, 4-dimethylpyrazole phosphate. *Int. J. Agric. Biol.* **2015**, *17*, 261–270.
51. Możdżeń, K.; Rzepka, A. Rola lupiny nasiennej podczas kiełkowania i wzrostu nasion bobu (*Vicia faba* L.) w obecności siarcznanu ołowiu. *Ann. Univ. Mariae Curie-Skłodowska E Agric.* **2016**, *71*, 55–65. (In Polish)
52. Mazur, A. The role of seed coat in the germination and early stages of growth of bean (*Phaseolus vulgaris* L.) in the presence of chickweed (*Stellaria media* (L.) Vill.). *AUPC Stud. Nat.* **2019**, *4*, 103–118. [CrossRef]
53. Możdżeń, K.; Tatoj, A.; Barabasz-Krasny, B.; Sołtys-Lelek, A.; Gruszka, W.; Zandi, P. The allelopathic potential of *Rosa blanda* Aiton on selected wild-growing native and cultivated plants in Europe. *Plants* **2021**, *10*, 1806. [CrossRef]
54. Cai, S.L.; Mu, X.Q. Allelopathic potential of aqueous leaf extracts of *Datura stramonium* L. on seed germination, seedling growth and root anatomy of *Glycine max* (L.) Merrill. *Allelopathy J.* **2012**, *30*, 235–245.

55. Burgos, N.R.; Talbert, R.E.; Kim, K.S.; Kuk, Y.I. Growth inhibition and root ultrastructure of cucumber seedlings exposed to allelochemicals from rye (*Secale cereale*). *J. Chem. Ecol.* **2004**, *30*, 671–689. [CrossRef]
56. Soleymani, A.; Shahrajabian, M.H. Study of allelopathic effects of sesame (*Sesamum indicum*) on canola (*Brassica napus*) growth and germination. *Intl. J. Agri. Crop Sci.* **2012**, *4*, 183–186.
57. Shah, A.N.; Iqbal, J.; Fahad, S.; Tanveer, M.; Yang, G.; Khan, E.A.; Shahzad, B.; Yousaf, M.; Hassan, W.; Ullah, A.; et al. Allelopathic Influence of Sesame and Green Gram Intercrops on Cotton in a Replacement Series. *Clean Soil Air Water* **2016**, *45*, 1–10. [CrossRef]
58. Teerarak, M.; Charoenying, P.; Laosinwattana, C. Physiological and cellular mechanisms of natural herbicide resource from *Aglaia odorata* Lour. on bioassay plants. *Acta Physiol. Plant.* **2012**, *34*, 1277–1285. [CrossRef]
59. Cheng, F.; Cheng, Z. Research progress on the use of plant allelopathy in agriculture and the physiological and ecological mechanisms of allelopathy. *Front. Plant Sci.* **2015**, *6*, 1020. [CrossRef] [PubMed]
60. Biel-Parzymieś, A. Effect of *Morus alba* L. leaf extracts on seeds germination and the seedlings growth of *Sinapis alba* L. and *Cucumis sativus* L. *AUPC Stud. Nat.* **2020**, *5*, 96–109. [CrossRef]
61. Yang, Q.H.; Ye, W.H.; Liao, F.L.; Yin, X.J. Effects of allelochemicals on seed germination. *Chin. J. Ecol.* **2005**, *24*, 1459–1465.
62. Siyar, S.; Chaudhry, Z.; Hussain, F.; Hussain, Z.; Majeed, A. Allelopathic effects of some common weeds prevailing in wheat fields on growth characteristics of wheat (*Triticum aestivum* L.). *PSM Biol. Res.* **2017**, *2*, 124–127. Available online: <https://core.ac.uk/download/pdf/327165998.pdf> (accessed on 4 February 2023).
63. Hussain, M.I.; Reigosa, M.J. Allelochemical stress inhibits growth, leaf water relations, PSII photochemistry, non-photochemical fluorescence quenching, and heat energy dissipation in three C3 perennial species. *J. Exp. Bot.* **2011**, *62*, 4533–4545. [CrossRef]
64. Friedjung, A.Y.; Choudhary, S.P.; Dudai, N.; Rachmilevitch, S. Physiological conjunction of allelochemicals and desert plants. *PLoS ONE* **2013**, *8*, e81580. [CrossRef]
65. Li, Z.-H.; Wang, Q.; Ruan, X.; Pan, C.-D.; Jiang, D.-A. Phenolics and plant allelopathy. *Molecules* **2010**, *15*, 8933–8952. [CrossRef]
66. Jacob, J.; Sarada, S. Role of phenolics in allelopathic interactions. *Allelopathy J.* **2012**, *29*, 215–230.
67. Demidchik, V.; Straltsova, D.; Medvedev, S.S.; Pozhvanov, G.A.; Sokolik, A.; Yurin, V. Stress-induced electrolyte leakage: The role of K⁺-permeable channels and involvement in programmed cell death and metabolic adjustment. *J. Exp. Bot.* **2014**, *65*, 1259–1270. [CrossRef]
68. Gill, S.S.; Tuteja, N. Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. *Plant Physiol. Biochem.* **2010**, *48*, 909–930. [CrossRef] [PubMed]
69. Kocheva, K.V.; Georgiev, G.I.; Kochev, V.K. An improvement of the diffusion model for assessment of drought stress in plants tissues. *Physiol. Plantarum.* **2014**, *150*, 88–94. [CrossRef] [PubMed]
70. Lin, W.X.; Kim, K.U.; Shin, D.H. Rice allelopathic potential and its modes of action on Barnyardgrass (*Echinochloa crus-galli*). *Allelopathy J.* **2000**, *7*, 215–224.
71. Zeng, R.S.; Luo, S.M.; Shi, Y.H.; Shi, M.B.; Tu, C.Y. Physiological and biochemical mechanism of allelopathy of secalonic acid F on higher plants. *Agron. J.* **2001**, *93*, 72–79. [CrossRef]
72. Lin, W.X. Effect of self-allelopathy on AOS of Casuarina equisetifolia forst seedling. *Fujian J. Agric. Sci.* **2010**, *25*, 108–113.
73. Harun, M.A.Y.A.; Robinson, R.W.; Johnson, J.; Uddin, M.N. Allelopathic potential of *Chrysanthemoides monilifera* subsp. *monilifera* (boneseed): A novel weapon in the invasion processes. *South Afric. J. Bot.* **2014**, *93*, 157–166. [CrossRef]
74. Skrzypek, E.; Repka, P.; Stachurska-Swakoń, A.; Barabasz-Krasny, B.; Możdżeń, K. Seedlings growth of common sunflower under influence of peppermint extract. *Mod. Phytomorphology* **2016**, *9*, 69–73. [CrossRef]
75. *Ministerstwo Rolnictwa i Rozwoju Wsi. Działanie rolno-środowiskowo-klimatyczne—Ministerstwo Rolnictwa i Rozwoju Wsi—Portal Gov.pl.* December 2022. Available online: <https://www.gov.pl/web/rolnictwo/dzialanie-rolno-srodowiskowo-klimatyczne3> (accessed on 30 November 2022). (In Polish)
76. Cheema, Z.A.; Khaliq, A.; Saeed, S. Weed control in maize (*Zea mays* L.) through sorghum allelopathy. *J. Sustain. Agric.* **2004**, *23*, 73–86. [CrossRef]
77. Khanh, T.D.; Chung, M.I.; Xuan, T.D.; Tawata, S. The exploitation of crop allelopathy in sustainable agricultural production. *J. Agron Crop. Sci.* **2005**, *191*, 172–184. [CrossRef]
78. Reeves, D.W.; Price, A.J.; Patterson, M.G. Evaluation of three winter cereals for weed control in conservation-tillage nontransgenic cotton. *Weed Technol.* **2005**, *19*, 731–736. [CrossRef]
79. Yildirim, E.; Guvenc, I. Intercropping based on cauliflower: More productive, profitable and highly sustainable. *Eur. J. Agron.* **2005**, *22*, 11–18. [CrossRef]
80. Iqbal, J.; Cheema, Z.A.; An, M. Intercropping of field crops in cotton for the management of purple nutsedge (*Cyperus rotundus* L.). *Plant Soil.* **2007**, *300*, 163–171. [CrossRef]
81. Patkowska, E.; Konopiński, M. Cover crops and soil-borne fungi dangerous towards the cultivation of salsify (*Tragopogon porrifolius* var. *sativus* (Gaterau) Br.). *Acta Sci. Pol. Hortorum Cultus.* **2011**, *10*, 167–181.
82. Konopiński, M. Wpływ mulczowania gleby i siewu bezpośredniego na wschody i plonowanie skorzonery odmiany ‘Lange Jan’. *Roczn. Akad. Roln. Pozn.* **2004**, *37*, 103–108. (In Polish)
83. Liebecke, M.; Strittmatter, N.; Fearn, S.; Morgan, A.J.; Kille, P.; Fuchser, J.; Wallis, D.; Palchykov, V.; Robertson, J.; Lohive, E.; et al. Unique metabolites protect earthworms against plant polyphenols. *Nat. Commun.* **2015**, *6*, 7869. [CrossRef]

84. Bonkowski, M.; Griffiths, B.S.; Ritz, K. Food preferences of earthworms for soil fungi. *Pedobiologia* **2000**, *44*, 666–676. [[CrossRef](#)]
85. Gavinet, J.; Santonja, M.; Baldy, V.; Hashoum, H.; Peano, S.; Tchong, T.; Gros, R.; Greff, S.; Fernandez, C.; Mousquet-Melou, A. Phenolics of the understory shrub *Cotinus coggygria* influence Mediterranean oak forests diversity and dynamics. *For Ecol. Manag.* **2019**, *441*, 262–270. [[CrossRef](#)]

Disclaimer/Publisher’s Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.