

WPLYW WIELOLETNIEGO NAWOŻENIA I ZMIANOWANIA NA TRWAŁOŚĆ STRUKTURY GLEBY

IRENA SUWARA¹

¹*Katedra Agronomii, Instytut Rolnictwa, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie*

Synopsis. Badania przeprowadzono w 2017 i 2021 roku, na dwóch doświadczeniach statycznych założonych w 1955 roku w Chylicach metodą losowanych bloków w czterech powtórzeniach. Doświadczenia zlokalizowano na czarnej ziemi wylugowanej wytworzonej z lekkiej gliny zwałowej. Pierwsze doświadczenie prowadzono w zmianowaniu norfolkskim (A: burak cukrowy – jęczmień jary z wsiewką koniczyny łąkowej – koniczyna łąkowa – pszenica ozima), natomiast drugie w zmianowaniu bez rośliny bobowatej (B: burak cukrowy – jęczmień jary – rzepak ozimy – pszenica ozima). Celem badań było określenie wpływu nawożenia mineralnego (NPK), organicznego (OB) i mineralno-organicznego ($\frac{1}{2}$ NPK + $\frac{1}{2}$ OB) oraz zmianowania roślin na trwałość struktury gleby. Uzyskane wyniki wskazują, że nawożenie obornikiem sprzyja tworzeniu trwałej struktury. Największą wodoodporność agregatów glebowych zanotowano na obiekcie nawożonym wyłącznie obornikiem (OB), a nieco niższą po zastosowaniu obornika łącznie z nawozami mineralnymi ($\frac{1}{2}$ NPK + $\frac{1}{2}$ OB). Najmniejszą wodoodpornością charakteryzowały się agregaty glebowe z obiektu nienawożonego (0) oraz nawożonego wyłącznie mineralnie (NPK). Ponadto wykazano, że uprawa koniczyny łąkowej w zmianowaniu nie różnicuje istotnie średniej ważonej średnicy agregatu wodoodpornego (MWDg) ani współczynnika wodoodporności (Ws).

Słowa kluczowe: nawożenie obornikiem, nawożenie mineralne, zmianowanie roślin, wodoodporność agregatów glebowych, struktura gleby

WSTĘP

W ostatnich latach degradacja gleb użytkowanych rolniczo dramatycznie się pogłębiła i w związku z tym podstawowym celem rolnictwa zrównoważonego jest podejmowanie działań przywracających i utrzymujących ich zdrowie [Gogoi i in. 2018]. Jednym z kluczowych wskaźników świadczących o degradacji gleby jest niska trwałość struktury gleby, która w istotny sposób kształtuje jej właściwości wodno-powietrzne [Jiao i in. 2006, Lenart 2002, Lenart 2008, Piechota 2005, Suwara 2010, Suwara i Gawrońska-Kulesza 2011]. Poprawa struktury gleby, szczególnie wodoodporności agregatów glebowych łagodzi skutki degradacji i należy do kluczowych czynników determinujących zdrowie gleby. Gleba charakteryzująca się dobrą stabilnością agregatów jest mniej podatna na erozję i zagęszczenie oraz charakteryzuje się korzystniejszymi stosunkami wodno-powietrznymi [Lenart i in. 2005, Pagliai i in. 2004, Piechota 2005, Suwara 2010]. Obecność trwałych agregatów decyduje o zagęszczeniu gleby, rozkładzie porów w glebie oraz o jej zdolności retencyjnej [Pagliai i in. 2004, Pranagal 2007, Shukla i in. 2006]. O tym, iż retencja wodna jest złożoną funkcją struktury i składu gleby świadczą badania przeprowadzone przez Wösten i in. [2001]. Stabilna struktura gleby zwiększa jej odporność na erozję oraz poprawia wykorzystanie wody opadowej.

¹Adres do korespondencji – *Corresponding address*: irena_suwara@sggw.edu.pl

Wykazano, że dobrym wskaźnikiem jakości gleby jest trwała struktura gleby, a w procesie strukturotwórczym główną rolę odgrywają materia organiczna i procesy biologiczne zachodzące w glebie [Lenart i in. 2005, Pagliai i in. 2004, Suwara 2010, Tisdall i Oades 1982]. W tym kontekście kształtowanie agregacji glebowej w znacznym stopniu determinują stosowane technologie uprawy, system nawożenia oraz odpowiednio dobrane zmianowanie roślin [Abiven i in. 2009, Bronick i Lal 2005, Lenart 2002, Pagliai i in. 2004, Suwara 2010, Suwara i Gawrońska-Kulesza 2011]. Istotny wpływ na stabilność agregatów glebowych wywiera nawożenie oraz płodozmian [Naveed i in. 2014, Stehlíková i in. 2016].

Wieloletnie badania wskazują na pozytywny wpływ nawożenia organicznego i mineralnego na produktywność gleby głównie poprzez zwiększenie dopływu węgla organicznego do gleby i poprawę jej struktury [Gawrońska-Kulesza i Suwara 1989, Lenart i Gawrońska-Kulesza 1992, Lenart 2002, Piechota 2005, Suwara i Gawrońska-Kulesza 1994, Suwara i in. 2005, Suwara 2010, Wang i in. 2019]. Dai i in. [2019] wykazali, że stosowanie nawozów organicznych i naturalnych wraz z nawozami nieorganicznymi sprzyja tworzeniu i stabilizacji agregatów glebowych. Uważa się, że efekt ten wynika z obecności substancji organicznych działających jako czynnik wiążący [Wang i in. 2019, Tian i in. 2022]. Zwiększoną stabilność agregatów glebowych po zastosowaniu nawozu obornika krowiego przypisuje się zwiększonej zawartości glebowej materii organicznej [Wang i in. 2019].

W literaturze opisano także przypadki braku wpływu lub niekorzystnego oddziaływania nawożenia organicznego na wodoodporność agregatów glebowych [Giemza-Mikoda i in. 2011, Parylak i Waclawowicz 2004]. Również opinie dotyczące roli nawozów mineralnych w tworzeniu struktury gleby są niejednoznaczne. Powszechnie uważa się, że długotrwałe stosowanie wyłącznie nawozów mineralnych może prowadzić do zwiększonej mineralizacji substancji organicznej [Liu i in. 2017], zniszczenia struktury gleby [Sun i in. 2022] i ogólnego pogorszenia żyzności gleby [Zhu i in. 2021]. Wiele badań nie potwierdziło jednak negatywnego wpływu nawożenia mineralnego (NPK) na strukturę gleby [Lenart 2002, Piechota 2005, Suwara i Gawrońska-Kulesza 1994]. Niektórzy autorzy [Suwara i in. 2005, Suwara 2010] z kolei wskazują, że nawozy mineralne stosowane bez wapnowania zmniejszyły wodoodporność agregatów glebowych w porównaniu z obserwowaną na obiektach, na których nie stosowano nawożenia lub zastosowano obornik. Różnice te najprawdopodobniej wynikają z odmiennych warunków pogodowych i glebowych, w jakich prowadzono eksperymenty.

Ważną rolę w tworzeniu trwałej struktury gleby odgrywają uprawiane w zmianowaniu rośliny. Pozostawione na polu resztki roślinne przyczyniają się do kształtowania stabilnej struktury gleby oraz zawartości w niej węgla organicznego, co z kolei prowadzi do modyfikacji właściwości fizycznych gleby [Boydaś i Turgut 2007, Khan i in. 2024, Rahman i in. 2008, Raczkowski i in. 2012]. Rośliny bobowate nie tylko ograniczają zużycie azotu syntetycznego, ale znacząco zwiększają różnorodność mikrobiologiczną w ryzosferze oraz zasoby substancji organicznej w glebie, a także zapewniają lepszą agregację gleby, co w efekcie prowadzi do poprawy zdrowia gleby [Angers i in. 1993, Bainard i in. 2019]. Wiele badań dowodzi, iż uprawa roślin bobowatych korzystnie wpływa na strukturę gleby i wraz ze wzrostem proporcji upraw wieloletnich, zwłaszcza roślin bobowatych, wzrasta odporność agregatów glebowych na destrukcyjne działanie wody [Lynch i Bragg 1985, Broersma i in. 1997].

Z kolei Sainju i in. [2003] stwierdzili, że żyto lepiej wpływało na agregację gleby i zawartość glebowej substancji organicznej niż wyka kosmata czy koniczyna łąkowa na drobnoziarnistej piaszczystej glinie (Rhodic Kandiuults, USDA). Oliveira i in. [2019] wykazali, że wprowadzenie roślin strączkowych do płodozmianów zbożowych w warunkach klimatycznych północnej Portugalii nie zawsze poprawia właściwości fizyczne gleby, w tym stopień jej agregacji. Podsumowu-

jąc, obserwowane efekty wpływu roślin bobowatych na strukturę gleby mogą zależeć od miejsca i rodzaju gleby, jej odczynu oraz specyfiki uprawianego gatunku roślin.

Celem badań własnych było określenie wpływu różnych systemów nawożenia stosowanych w dwóch zmianowaniach na wybrane parametry struktury gleby.

MATERIAŁ I METODY

Badania struktury gleby wykonano po 62 i 66 latach prowadzenia dwóch wieloletnich doświadczeń założonych w 1955 roku na czarnej ziemi wylugowanej [Kabała i in. 2019] (według World Reference Base for Soil Resources WRB – Endogleyic Phaeozems), która wykształciła się z gliny zwałowej lekkiej w Chylicach koło Warszawy (52°06' N, 20°33' E). Pierwsze doświadczenie prowadzone jest w zmianowaniu norfolkskim (A), natomiast drugie w zmianowaniu bez rośliny bobowatej (B). W doświadczeniu A do 1989 roku stosowano zmianowanie: ziemniak – jęczmień jary z wsiewką koniczyny łąkowej – koniczyna łąkowa – pszenica ozima, a od 1990 roku ziemniak został zastąpiony przez burak cukrowy: burak cukrowy – jęczmień jary z wsiewką koniczyny łąkowej – koniczyna łąkowa – pszenica ozima. W doświadczeniu B do 1989 roku stosowano trójpolowe zmianowanie: ziemniak – jęczmień jary – żyto, a od 1990 roku rośliny uprawiane są w czteropolowym zmianowaniu: burak cukrowy – jęczmień jary – rzepak ozimy – pszenica ozima. W obu doświadczeniach stosuje się następujące obiekty nawozowe: mineralne (NPK), obornikowe (OB), mineralno-obornikowe (½NPK + ½OB) i kontrola bez nawożenia (0). Wielkość poletek do zbioru wynosiła 50 m². Dawki nawozów podano w tabelach 1 i 2. Zawartość azotu ogółem w warstwie ornej w zmianowaniu A kształtowała się na poziomie 0,76 g·kg⁻¹, a w zmianowaniu B 0,66 g·kg⁻¹, zawartość węgla organicznego odpowiednio 11,97 i 9,47 g·kg⁻¹, natomiast pH_{KCl} było na poziomie 5,7 w zmianowaniu A i 6,3 w zmianowaniu B [Suwara i in. 2025]. Doświadczenia założono metodą losowanych bloków w czterech powtórzeniach. Gleba na wszystkich badanych obiektach nie była wapnowana od 1955 roku.

Tabela 1. Schemat nawożenia w zmianowaniu norfolkskim (A) od 1990 roku
Table 1. Diagram of fertilizer experiments in Norfolk rotation (A) since 1990

Roślina Plant	Nawożenie/Fertilization								
	Mineralne/ Mineral (NPK) [kg·ha ⁻¹]			Organiczne/ Organic FM [t·ha ⁻¹]	Mineralno-organiczne/ Mixed mineral with organic ½ NPK (kg·ha ⁻¹) + ½ FM [t·ha ⁻¹]				0
	N	P	K	OB (FM)	N	P	K	OB (FM)	
Burak cukrowy Sugar beet	200	56,0	200,0	40	100	28,0	100,0	20	–
Jęczmień jary z wsiewką koniczyny łąkowej Spring barley with red clover	100	36,5	91,5	20	50	18,3	45,8	10	–
Koniczyna łąkowa Red clover	–	36,5	91,5	–	–	18,3	45,8	–	–
Pszenica ozima Winter wheat	100	36,5	91,5	20	50	18,3	45,8	10	–

OB(FM) – obornik/farmyard manure, (0) – bez nawożenia/without fertilization

Tabela 2. Schemat nawożenia w zmianowaniu bez bobowatych (B) od 1990 roku
 Table 2. Diagram of fertilizer experiments in crop rotation without legumes (B) since 1990

Roślina Plant	Nawożenie/Fertilization								
	Mineralne/Mineral (NPK) [kg·ha ⁻¹]			Organiczne/ Organic FM [t·ha ⁻¹]	Mineralno-organiczne/ Mixed mineral with organic ½ NPK (kg·ha ⁻¹) + ½ FM [t·ha ⁻¹]				0
	N	P	K	OB (FM)	N	P	K	OB (FM)	
Burak cukrowy Sugar beet	200	56,0	200,0	40	100	28,3	100,0	20	–
Jęczmień jary Spring barley	100	36,5	91,5	20	50	18,3	45,8	10	–
Rzepak ozimy Winter rapeseed	100	36,5	91,5	20	50	18,3	45,8	10	–
Pszenica ozima Winter wheat	100	36,5	91,5	20	50	18,3	45,8	10	–

OB(FM) – obornik/farmyard manure, (0) – bez nawożenia/without fertilization

Próby glebowe do badań o masie około 2,5 kg pobierano w obu doświadczeniach z każdego poletka z warstwy ornej 0–20 cm w latach 2017 i 2021 po zbiorze pszenicy ozimej. Wilgotność gleby w momencie pobierania prób wynosiła średnio od 10,1 do 12,4% wagowych. Próby te po doprowadzeniu gleby do stanu powietrznie suchego przesiano przez sito o średnicy 10 mm w celu oddzielenia brył >10 mm od agregatów glebowych. Z tak przygotowanej gleby odważono z każdego poletka próby o masie 500 g w dwóch powtórzeniach, które rozsegregowano przesiewając przez 2 minuty na przesiewaczu z zestawem sit o średnicy oczek 7; 5; 3; 1; 0,5 i 0,25 mm. To co pozostawało na każdym sicie zostało zważone oraz został obliczony procentowy udział każdej z frakcji. Na podstawie uzyskanych wyników obliczono:

$$\text{średnią ważoną średnicę agregatu } MWD_a = \frac{\sum B \times C}{100}$$

gdzie:

B – środki klasowe w mm przyporządkowane odpowiednim frakcjom agregatów,

C – procent wagowy.

Z uzyskanych frakcji po przesianiu na sucho przygotowano próby o masie 50 g w celu oznaczenia wodoodporności agregatów metodą przesiewania na mokro. Przesiewanie to trwało 12 minut w aparacie Bakszejewa na zestawie sit o średnicach oczek 7; 5; 3; 1; 0,5; 0,25 mm. Pozostałości z sit zostały przeniesione na saszki z bibuły, które były umieszczone w lejkach. Saszki te suszono w temperaturze 105°C. Masa cząstek pozostałych w wyniku rozpadu rozmytych frakcji agregatów poddawanych rozmyciu została wyrażona w procentach wagowych w stosunku do masy próbki wziętej do rozmywania równej 50 g.

Następnie obliczono średnią ważoną średnicę gruzelka MWD_g i współczynnik wodoodporności W_s według wzorów:

$$MWD_g = \frac{\sum B \cdot C}{100}$$

gdzie:

B – środek klasowy danej frakcji w mm,

C – procent wagowy agregatów wodoodpornych.

$$Ws = \frac{MWDg}{MWDa} \cdot 100$$

gdzie:

MWDg – średnia ważona średnica gruzełka,

MWDa – średnia ważona średnica agregatu.

Porównania wielokrotne zostały wykonane procedurą Tukeya w programie Statistica na poziomie istotności $\alpha = 0,05$.

W pracy wyniki parametrów glebowych podano jako średnie z lat, gdyż nie stwierdzono współdziałania z latami badań. Dla badanych parametrów zostały obliczone średnie z lat 2017 i 2021 dla porównania wpływu badanych czynników (nawożenia i zmianowania) oraz ich współdziałania. Na bazie tych analiz zostały wydzielone grupy jednorodne, które oznaczono kolejnymi literami alfabetu.

WYNIKI I DYSKUSJA

Nie stwierdzono istotnego zróżnicowania średniej ważonej średnicy agregatu (MWDa) w zależności od nawożenia jak i zmianowania (tab. 3). Są one potwierdzeniem wyników uzyskanych we wcześniejszych badaniach, które wskazywały na brak oddziaływania nawożenia i zmianowania na średnią ważoną średnicę agregatu na czarnej ziemi (MWDa) [Suwara i in. 2016].

Tabela 3. Średnia ważona średnica agregatu (MWDa) w zależności od nawożenia i zmianowania [mm]
Table 3. Mean diameter of aggregates (MWDa) depends on fertilization and crop rotation [mm]

Nawożenie Fertilization	Zmianowanie/Crop rotation		Średnio Mean
	z rośliną bobowatą with legume A	bez rośliny bobowatej without legume B	
NPK	3,72 a	3,43 a	3,58 a
OB (FM)	3,48 a	3,46 a	3,47 a
½ NPK + ½ OB (FM)	3,50 a	3,40 a	3,45 a
0	3,62 a	3,66 a	3,64 a
Średnio/Mean	3,58 A	3,49 A	–

OB(FM) – obornik/farmyard manure, (0) – bez nawożenia/without fertilization

Poszczególne litery oznaczają jednorodne grupy średnich, wartości średnie oznaczone tymi samymi literami nie różnią się istotnie przy $\alpha = 0,05$; małe litery oznaczają porównanie nawożenia w kolumnach, duże litery oznaczają porównanie płodozmianów w rzędach

Individual letters indicate homogeneous groups of means, mean values marked with the same letters do not differ significantly at $\alpha = 0.05$; lower case letters refer to comparison of fertilization in columns, upper case letters refer to comparison of crop rotations in rows

Nawożenie wpłynęło natomiast istotnie na wodoodporność agregatów glebowych w obu zmianowaniach. Świadczą o tym wyniki średniej ważonej średnicy gruzełka (MWDg) (tab. 4) oraz współczynnika wodoodporności (Ws) (tab. 5). Średnia ważona średnica gruzełka (MWDg) w obu eksperymentach była istotnie większa dla gleby obiektów nawożonych wyłącznie obornikiem (OB) o 35–40%, a dla nawożonych obornikiem łącznie z nawozami mineralnymi o 15-20% (½NPK + ½OB) w porównaniu z glebą nawożoną wyłącznie mineralnie (NPK) i nienawożoną (0) od 1955 roku. Sun i in. [2022] wskazują, że nawożenie mineralne ma ograniczony wpływ na

Tabela 4. Średnia ważona średnica gruzelka (MWDg) w zależności od nawożenia i zmianowania [mm]
 Table 4. Wet mean weight diameter of aggregates (MWDg) depends on fertilization and crop rotation [mm]

Nawożenie Fertilization	Zmianowanie/Crop rotation		Średnio Mean
	z rośliną bobowatą with legume A	bez rośliny bobowatej without legume B	
NPK	1,60 b	1,57 c	1,59 c
OB (FM)	2,05 a	2,28 a	2,17 a
½ NPK + ½ OB (FM)	1,90 a	1,78 b	1,84 b
0	1,63 b	1,48 c	1,55 c
Średnio/Mean	1,79 A	1,78 A	–

OB(FM) – obornik/farmyard manure, (0) – bez nawożenia/without fertilization

Poszczególne litery oznaczają jednorodne grupy średnich, wartości średnie oznaczone tymi samymi literami nie różnią się istotnie przy $\alpha = 0,05$; małe litery oznaczają porównanie nawożenia w kolumnach, duże litery oznaczają porównanie płodozmianów w rzędach

Individual letters indicate homogeneous groups of means, mean values marked with the same letters do not differ significantly at $\alpha = 0.05$; lower case letters refer to comparison of fertilization in columns, upper case letters refer to comparison of crop rotations in row

Tabela 5. Współczynnik wodoodporności agregatów (Ws) w zależności od nawożenia i zmianowania [%]
 Table 5. Water stability of aggregates (Ws) depends on fertilization and crop rotation [%]

Nawożenie Fertilization	Zmianowanie/Crop rotation		Średnio Mean
	z rośliną bobowatą with legume A	bez rośliny bobowatej without legume B	
NPK	43,0 b	45,8 c	44,2 c
OB (FM)	58,9 a	65,9 a	62,4 a
½ NPK + ½ OB (FM)	54,3 a	52,4 b	53,3 b
0	45,0 b	40,4 c	42,7 c
Średnio/Mean	50,2 A	51,0 A	–

OB(FM) – obornik/farmyard manure, (0) – bez nawożenia/without fertilization

Poszczególne litery oznaczają jednorodne grupy średnich, wartości średnie oznaczone tymi samymi literami nie różnią się istotnie przy $\alpha = 0,05$; małe litery oznaczają porównanie nawożenia w kolumnach, duże litery oznaczają porównanie płodozmianów w rzędach

Individual letters indicate homogeneous groups of means, mean values marked with the same letters do not differ significantly at $\alpha = 0.05$; lower case letters refer to comparison of fertilization in columns, upper case letters refer to comparison of crop rotations in row

strukturę gleby, ponieważ w mniejszym stopniu niż nawozy organiczne stymuluje aktywność mikrobiologiczną odpowiedzialną za procesy agregacyjne. Wyniki w tabeli 5 dotyczące współczynnika wodoodporności agregatów (Ws) świadczą, że najwyższą odporność agregatów na wodę w obu doświadczeniach odnotowano w glebie z zastosowaniem wyłącznie obornika (OB), a następnie obornika łącznie z nawozami mineralnymi (½NPK + ½OB). Istotnie najmniejszą stabilność agregatów zaobserwowano w glebie nienawożonej (0) lub z zastosowaniem wyłącznie nawozów mineralnych (NPK).

Podsumowując najbardziej trwałą strukturę wykazuje czarna ziemia nawożona obornikiem (OB i ½ NPK + ½ OB), natomiast nawożenie mineralne zwiększa jej podatność na rozmywanie. Korzystne strukturotwórcze działanie obornika potwierdziły badania wielu autorów [Lenart

i Gawrońska-Kulesza 1992, Lenart 2002, Piechota 2005, Suwara i Gawrońska-Kulesza 1994, Suwara 2010, Suwara i in. 2016]. Wang i in. [2019] oraz Tian i in. [2022] wskazują, że substancje organiczne działają jako naturalne spoiwo agregatów, natomiast Wang i in. [2019] podkreślają, że stabilność agregatów po zastosowaniu obornika wynika z wyższej zawartości węgla organicznego w glebie. Również Dai i in. [2019] wykazali, że obornik zwiększa zawartość węgla organicznego, jednak zdaniem tych autorów słoma bardziej skutecznie wspiera tworzenie i stabilizację agregatów glebowych. Wprowadzanie obornika do gleby sprzyja tworzeniu trwałej struktury, nawóz ten jest bogaty w materię organiczną, składniki odżywcze i mikroorganizmy oraz pomaga również zrównoważyć pH gleby [Liu i in. 2020, Rayne i Aula 2020]. Materia organiczna stanowi źródło węgla, które wspomaga wzrost ryzobakterii w glebie, co prowadzi do zwiększenia wiązania azotu poprzez ich symbiotyczny związek z roślinami bobowatymi [Ulzen i in. 2020].

Wyniki przedstawione w tabelach 4 i 5 świadczą o tym, że stosowanie koniczyny czerwonej w płodozmianie od 1955 roku nie miało wpływu na strukturę gleby i stabilność agregatów. Wartości średniej ważonej średnicy gruzełka (MWDg) jak i współczynnika wodoodporności agregatów (Ws) były podobne dla gleby pochodzącej z obiektów, na których stosowano zmianowanie norfolkskie i zmianowanie bez rośliny bobowatej. Wyniki te różnią się od wcześniejszych obserwacji, które wskazywały, że uprawa koniczyny czerwonej sprzyjała tworzeniu agregatów o wysokiej stabilności wodnej [Lenart 2002, Suwara i in. 2016]. Brak wpływu uprawy koniczyny łąkowej w zmianowaniu na poprawę trwałości agregatów glebowych może wynikać z obniżenia pH gleby do 5,7 [Suwara i in. 2025] co sugeruje, że zakwaszenie gleby może być przyczyną braku oddziaływania rośliny bobowatej na strukturę gleby. Oliveira i in. [2019] podkreślają, że efektywność roślin bobowatych w tworzeniu agregatów zależy od gatunku oraz właściwości gleby, co sugeruje, że w glebach kwaśnych lub ubogich w materię organiczną wpływ koniczyny na strukturę gleby może być ograniczony. Według Yeremko i in. [2025] niski odczyn gleby (pH) ogranicza przeżywalność bakterii *Rhizobium* i powstawanie brodawek korzeniowych, osłabiając tym samym symbiozę roślin bobowatych. Sainju i in. [2003] wykazali natomiast, że w piaszczystych glebach ubogich w węgiel organiczny i przy wysokim nawożeniu azotem rośliny bobowate nie zwiększały agregacji tak skutecznie jak zboża, co wynikało z ograniczonej aktywności mikrobiologicznej i niskiej zawartości materii organicznej, zmniejszających tworzenie stabilnych agregatów.

WNIOSKI

1. Trwałość struktury gleby i wodoodporność agregatów glebowych zależały od systemu nawożenia.
2. Nawożenie obornikiem i obornikiem łącznie z nawozami mineralnymi sprzyjało tworzeniu bardziej trwałej struktury gleby. Najmniejszą wodoodpornością charakteryzowały się agregaty glebowe z obiektu nienawożonego oraz nawożonego wyłącznie mineralnie.
3. Uprawa koniczyny łąkowej w zmianowaniu nie miała istotnego wpływu na stan struktury gleby.

PIŚMIENNICTWO

- Abiven S., Menasseri S., Chenu, C. 2009. The effects of organic inputs over time on soil aggregate stability – A literature analysis. *Soil Biol. Biochem.* 41: 1–12.
- Angers D. A., Samson N., Legere A. 1993. Early changes in water-stable aggregation induced by rotation and tillage in a soil under barley production. *Can. J. Soil Sci.* 73(1): 51–59.
- Bainard L.D., Evans B., Malis E., Yang, T., Bainard J.D. 2020. Influence of annual plant diversity on forage productivity and nutrition, soil chemistry, and soil microbial communities. *Front. Sustain. Food Syst.* 4, art. no. 560479.
- Boydaś M.G., Turgut N. 2007. Effect of tillage implements and operating speeds on soil physical properties and wheat emergence. *Turk. J. Agric. For.* 31: 399–412.
- Broersma K., Robertson J.A., Chanasyk D.S. 1997. The effects of diverse cropping systems on aggregation of a Luvisolic soil in the Peace River region. *Can. J. Soil Sci.* 77(2): 323–329.
- Bronick C.J., Lal R. 2005. Manuring and rotation effects on soil organic carbon concentration for different aggregate size fractions on two soils in northeastern Ohio, USA. *Soil Till. Res.* 81(2): 239–252.
- Dai H.C., Chen Y.Q., Liu K.C., Li Z.X., Qian X., Zang H.D., Yang X.L., Zhao Y.X., Shen Y.S., Li Z.J., Sui P. 2019. Water-stable aggregates and carbon accumulation in barren sandy soil depend on organic amendment method: A three-year field study. *J. Clean. Prod.* 212: 393–400.
- Gawrońska-Kulesza A., Lenart S., Suwara I. 1989. Wpływ wieloletniego nawożenia organicznego i mineralnego na niektóre właściwości chemiczne warstwy ornej i podornej gleby. *Rocz. Glebozn.* 40(1): 21–26.
- Giemza-Mikoda M., Waclawowicz R., Zimny L., Malak D. 2011. Wpływ zróżnicowanego nawożenia organicznego i wzrastających dawek azotu na wskaźniki struktury gleby. *Fragm. Agron.* 28(3): 16–25.
- Gogoi N., Baruah K.K., Meena R.S. 2018. Grain legumes: impact on soil health and agroecosystem. In: *Legumes for Soil Health and Sustainable Management*. Springer, Singapore, pp. 511–539.
- Jiao Y., Whalen J.K., Hendershot W.H. 2006. No-tillage and manure applications increase aggregation and improve nutrient retention in sandy-loam soil. *Geoderma* 134: 24–33.
- Kabała C., Charzyński P., Chodorowski J., Drewnik 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.
- Khan M.T., Aleinikovienė J., Butkevicienė L.M. 2024. Innovative organic fertilizers and cover crops: perspectives for sustainable agriculture in the era of climate change and organic agriculture. *Agronomy* 4, art. no. 2871.
- Lenart S. 2002. Studia nad wodoodpornością agregatów glebowych w różnych systemach uprawy roli i roślin. Fundacja Rozwój SGGW Warszawa: ss. 104.
- Lenart S. 2008. Wpływ sposobu użytkowania gruntów oraz stosowanej agrotechniki na strukturę gruzełkową gleby. *Ochr. Środ. Zas. Nat.* 35(36): 173–179.
- Lenart S., Gawrońska-Kulesza A. 1992. Wpływ wieloletniego nawożenia mineralnego i organicznego na niektóre właściwości gleby oraz plonowanie roślin w zmianowaniu 3- i 4-polowym. Część I. Właściwości gleby. *Rocz. Nauk Rol., seria A* 109 (3): 33–44.
- Lenart S., Mercik S., Łabętowicz J., Mazur T., Urbanowski S. 2005. Zmiany właściwości fizycznych gleb pod wpływem różnych systemów nawożenia w pięciu wieloletnich doświadczeniach polowych. *Fragm. Agron.* 22(1): 161–170.
- Liu S., Wang J., Pu S., Blagodatskaya E., Kuzyakov Y., Razavi, B.S. 2020. Impact of manure on soil biochemical properties: A global synthesis. *Sci. Total Environ.* 745, art. no. 141003.
- Liu S.B., Razavi B.S., Su X., Maharjan M., Zarebanadkouki M., Blagodatskaya E., Kuzyakov Y. 2017. Spatio-temporal patterns of enzyme activities after manure application reflect mechanisms of niche differentiation between plants and microorganisms. *Soil Biol. Biochem.* 112: 100–109.

- Lynch J.M., Bragg E. 1985. Microorganisms and soil aggregate stability. *Adv. Soil Sci.* 133-171.
- Naveed M., Moldrup P., Vogel H.J., Lamandé M., Wildenschild D., Tuller M., de Jonge L.W. 2014. Impact of long-term fertilization practice on soil structure evolution. *Geoderma* 217: 181-189.
- Oliveira M., Barré P., Trindade H., Virto I. 2019. Different efficiencies of grain legumes in crop rotations to improve soil aggregation and organic carbon in the short-term in a sandy Cambisol. *Soil Till. Res.* 186: 23-35.
- Pagliai M., Vignozzi N., Pellegrini S. 2004. Soil structure and the effect of management practices. *Soil Till. Res.* 79(2): 131-143.
- Parylak D., Waclawowicz R. 2004. Wpływ nawożenia organicznego w trzecim roku po zastosowaniu oraz dawek azotu na wskaźniki struktury gleby średniej. *Rocz. Glebozn.* 55(1): 193-201.
- Piechota T. 2005. Wpływ wieloletniego oddziaływania systemów następstwa roślin i nawożenia na fizyczne właściwości gleby. *Fragm. Agron.* 22(2): 158-166.
- Pranagal J. 2007. Oddziaływanie uproszczonych systemów uprawy roli na właściwości retencyjne gleby płowej wytworzonej z lessu. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.* 520(2): 675-683.
- Raczkowski C.W., Mueller J.P., Busscher W.J., Bell M.C., McGraw M.L. 2012. Soil physical properties of agricultural systems in a large-scale study. *Soil Till. Res.* 119: 50-59.
- Rahman M.H., Okubo A., Sugiyama S., Mayland H.F. 2008. Physical, chemical and microbiological properties of and Andisol as related to land use and tillage practice. *Soil Till. Res.* 101: 10-19.
- Rayne N., Aula L. 2020. Livestock manure and the impacts on soil health: A review. *Soil Syst.* 4, art. no. 64.
- Sainju U.M., Whitehead W.F., Singh B. P. 2003. Cover crops and nitrogen fertilization effects on soil aggregation and carbon and nitrogen pools. *Can. J. Soil Sci.* 83: 155-165.
- Shukla M.K., Lal R., Ebinger M. 2006. Determining soil quality indicators by factor analysis. *Soil Till. Res.* 87(2): 194-204.
- Stehlíková I., Madaras M., Lipavský J., Šimon T. 2016. Study on some soil quality changes obtained from long-term experiments. *Plant Soil Environ.* 62(2): 74-79.
- Sun Q., Yang X., Meng J., Lan Y., Han X.R., Chen W.F. 2022. Long-term effects of straw and straw-derived biochar on humic substances and aggregate-associated humic substances in brown earth soil. *Front. Environ. Sci.* 10, art. no. 899935.
- Suwara I. 2010. Rola wieloletniego nawożenia w kształtowaniu wybranych właściwości gleby lekkiej ze szczególnym uwzględnieniem stosunków wodno-powietrznych. *Wyd. SGGW*, ss. 98.
- Suwara I., Gawrońska-Kulesza A. 1994. Wpływ wieloletniego nawożenia na właściwości gleby i plonowanie roślin. *Cz. 1. Właściwości gleby, Rocz. Nauk Rol., Ser. A*, 110(3-4): 105-115.
- Suwara I., Gawrońska-Kulesza A. 2011. Wpływ roślin uprawianych w wąskie i szerokie rzędy na strukturę gleby. *Fragm. Agron.* 28(2): 98-105.
- Suwara I., Gawrońska-Kulesza A., Korc M. 2005. Wpływ systemów nawożenia na kształtowanie się wybranych właściwości fizycznych gleby lekkiej. *Fragm. Agron.* 22(1): 290-297.
- Suwara I., Pawlak-Zaręba K., Gozdowski D., Młynek S. 2025. Chemical properties of soil after over 55 years of differentiated fertilization and crop rotation. *Soil Sci. Ann.* 76(3), art. no. 213837.
- Suwara I., Pawlak-Zaręba K., Gozdowski D., Perzanowska A. 2016. Physical properties of soil after 54 years of long-term fertilization and crop rotation. *Plant Soil Environ.* 62(9): 389-394.
- Tian S.Y., Zhu B.J., Yin R., Wang M.W., Jiang Y.J., Zhang C.Z., Li D.M., Chen X.Y., Kardol P., Liu M.Q. 2022. Organic fertilization promotes crop productivity through changes in soil aggregation. *Soil Biol. Biochem.* 165, art. no. 108533.
- Tisdall J.M., Oades J.M. 1982. Organic matter and water-stable aggregates in soils. *J. Soil Sci.* 33(2): 141-163.
- Ulzen J., Abaidoo R.C., Ewusi-Mensah N., Osei O., Masso, C., Opoku A. 2020. Organic manure improves soybean response to rhizobia inoculant and P-fertilizer in northern Ghana. *Front. Agron.* 2, art. no. 9.
- Wang P., Wang J.D., Zhang H., Dong Y., Zhang Y.C. 2019. The role of iron oxides in the preservation of soil organic matter under long-term fertilization. *J. Soils Sediments* 19: 588-598.

- Wösten J.H., Pachepsky M.Y.A., Rawls W.J. 2001. Pedotransfer functions: bridging the gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics. *J. Hydrol.* 251(3–4): 123–150.
- Yeremko L., Czopek K., Staniak M., Marenych M., Hanhur V. 2025. Role of environmental factors in legume-rhizobium symbiosis: A review. *Biomolecules* 15, art. no. 118.
- Zhu L.X., Zhang F.L., Li L.L., Liu T.X. 2021. Soil C and aggregate stability were promoted by bio-fertilizer on the North China Plain. *Soil Sci. Plant Nutr.* 21: 2355–2363.

I. SUWARA

THE EFFECT OF LONG-TERM FERTILIZATION AND CROPS ROTATION ON THE STABILITY OF THE SOIL STRUCTURE

Summary

The research was conducted in 2017 and 2021, using a randomized block design with four replications on two static experiments established in 1955 in Chylice. The experiments were located on leached black earth made from light boulder clay. The first experiment was conducted in a Norfolk rotation (A: sugar beet – spring barley with red clover undersown – red clover – winter wheat), while the second was conducted in a rotation without legumes (B: sugar beet – spring barley – winter rapeseed – winter wheat). The aim of the study was to determine the effect of mineral (NPK), organic (FM), and mineral-organic ($\frac{1}{2}$ NPK + $\frac{1}{2}$ FM) fertilization, as well as crop rotation, on the stability of soil structure. The obtained results indicate that fertilization with manure promotes the formation of a stable structure. The highest water resistance of soil aggregates was observed in the treatment fertilized solely with manure (FM), and slightly lower after the application of manure together with mineral fertilizers ($\frac{1}{2}$ NPK + $\frac{1}{2}$ FM). The lowest water resistance was observed in soil aggregates from the treatment without fertilization (0) and the treatment fertilized solely with mineral fertilizers (NPK). Furthermore, it was shown that red clover cultivation in the crop rotation did not significantly differ in the weighted mean diameter of the water-resistant aggregate (MWDg) or the water resistance coefficient (Ws).

Key words: manure fertilization, mineral fertilization, crop rotation, water resistance of soil aggregates, soil structure

Zaakceptowano do druku – *Accepted for print:* 25.11.2025

Do cytowania – *For citation:*

Suwara I. 2025. Wpływ wieloletniego nawożenia i zmianowania na trwałość struktury gleby. *Fragm. Agron.* 42(2): 37–46.