

Autoreferat

Opis dorobku i osiągnięć naukowych
(w języku polskim)

dr inż. Dorota Pikuła

Zakład Żywienia Roślin i Nawożenia
Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa - Państwowy Instytut Badawczy
w Puławach

Puławy 2019

1. DANE PERSONALNE:

Imię i nazwisko: Dorota Piкуła

Data urodzenia: 28.04.1976 r.

Miejsce urodzenia: Biała Podlaska

Miejsce pracy: Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa –Państwowy Instytut Badawczy, ul. Czartoryskich 8, 24-100 Puławy

Dane kontaktowe: tel. 81 4786 837

e-mail: dpikula@iung.pulawy.pl

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4173-197X>

2.POSIADANE DYPLOMY, STOPNIE NAUKOWE/ARTYSTYCZNE

magister inżynier, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, Wydział Rolnictwa i Biologii, Specjalność Ochrona Środowiska, 2000 r., praca magisterska pt.: „Fracje metali ciężkich w glebach nawożonych osadem ściekowym”, promotor prof. dr hab. Barbara Gworek.

doktor nauk rolniczych w zakresie agronomii, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego, Wydział Rolnictwa i Biologii, Zakład Chemii Rolniczej, 2006 r., rozprawa pt.: „Wpływ wybranych właściwości fizyko-chemicznych gleby na zawartość metali ciężkich w roślinach paszowych”,

promotor: prof. dr hab. Jan Łabętowicz

recenzenci: prof. dr hab. Jerzy Prac

prof. dr hab. Florian Gambuś

3.INFORMACJE O DOTYCHCZASOWYM ZATRUDNIENIU W JEDNOSTKACH NAUKOWYCH/ARTYSTYCZNYCH

- 2002-2003 - staż Redakcja Tygodnika Agro- Spółdzielca „Plon”, Spółdzielnia Pracy Dziennikarzy, stanowisko: **redaktor, doradca agrotechniczny**
- 2003-2006 - Redakcja Poradnik Rolniczy, Firma Promark Sp. z o.o., Pszczelarz Polski, Polski Związek Pszczelarski Warszawa, stanowisko: **redaktor**
- 2006 -2016 - Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa-Państwowy Instytut Badawczy w Puławach, Zakład Żywienia Roślin i Nawożenia, stanowisko: **starszy specjalista badawczo-techniczny**.
- 2016- obecnie - Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa-Państwowy Instytut Badawczy w Puławach, Zakład Żywienia Roślin i Nawożenia, stanowisko: **adiunkt**

4. WSKAZANIE OSIĄGNIĘCIA WYNIKAJĄCEGO Z ART. 16 UST. 2 Z DNIA 14 MARCA 2003 R. O STOPNIACH NAUKOWYCH I TYTULE NAUKOWYM ORAZ O STOPNIACH I TYTULE W ZAKRESIE SZTUKI (DZ. U. NR 65, POZ. 595 ZE ZM.):

Osiągnięciem, będącym podstawą do ubiegania się o stopień naukowy doktora habilitowanego jest cykl 5 publikacji naukowych powiązanych tematycznie oraz zebranych pod wspólnym tytułem:

4A. Tytuł osiągnięcia naukowego

Środowiskowe i produkcyjne skutki uprawy roślin w zmianowaniach różniących się ilością dopływającej materii organicznej

4B. Wykaz publikacji stanowiących osiągnięcie naukowe

1. **Pikuła D.**, Rutkowska A. Effect of leguminous crop and fertilization on soil organic carbon in 30-years field experiment. Plant Soil Environ. Vol. 60, (2014), No. 11: 507–511.

IF5-letni = 1.53, IF2014 = 1.226; MNiSW = 30 pkt.; udział: 95%

2. Ten Berge H.F.M., **Pikuła D.**, Goedhart P.W., Schröder J.J. Apparent nitrogen fertilizer replacement value of grass–clover leys and of farmyard manure in an arable rotation. Part I: grass–clover leys. Soil Use and Management 32 S1. ISSN 0266-0032, (2016), 9 - 19.

IF5-letni = 2.143; IF2016 = 2.1; MNiSW = 30 pkt.; udział 50%

3. **Pikuła D.**, Berge, Ten H.F.M.; Goedhart, P.W.; Schröder, J.J. Apparent nitrogen fertilizer replacement value of grass– clover leys and of farmyard manure in an arable rotation. Part II: farmyard manure. Soil Use and Management, 32 S1. ISSN 0266-0032, (2016), 20-31.

IF5-letni = 2.143; IF2016 = 2.117; MNiSW = 30 pkt.; udział 55%

4. Martyniuk S., **Pikuła D.**, Kozieł M. Soil properties and productivity in two long-term crop rotations differing with respect to organic matter management on an Albic Luvisol. Scientific Reports, DOI:10.1038/s41598-018-37087-4, (2019), 9:1878:1-9.

IF5-letni = 4.609; IF2018 = 4.122; MNiSW = 40 pkt.; udział 50%

5. **Pikuła D.** Zmienność składu frakcyjnego materii organicznej gleby wskaźnikiem jej jakości. Monografia pt. „Rolnictwo XXI wieku – problemy i wyzwania” pod redakcją: D. Łuczyckiej, ISBN 978-83-945311-9-5, (2018), 251-260.

IF5-letni = 0; IF2018 = 0; MNiSW = 5; udział 100%

Oświadczenia współautorów podano w załączniku 4.

Sumaryczny Impact Factor (IF) prac stanowiących najważniejsze osiągnięcie w dorobku naukowym według listy Journal Citation Reports (JCR), zgodnie z rokiem opublikowania wynosi: 9.582, punkty MNiSW = 135

4C. OMÓWIENIE CELU NAUKOWEGO I OSIĄGNIĘTYCH WYNIKÓW

Wstęp

Możliwości produkcyjne gleb w Polsce są ograniczane ze względu na przewagę gleb lekkich (35%) i bardzo lekkich (30%), a więc słabo próchnicznych charakteryzujących się ponadto odczynem bardzo kwaśnym i kwaśnym, który wpływa niekorzystnie na ich żyzność (Ochal i Kopiński 2017). W przypadku gleb lekkich żyzność i urodzajność można zachować, odtwarzać, a nawet powiększać poprzez stosowanie nawozów naturalnych, organicznych i mineralnych (Mercik i in. 2000; Maćkowiak 2000). Najważniejszą rolę w utrzymywaniu żyzności gleby i zapewnieniu długoterminowej stabilności plonowania roślin odgrywa bezsprzecznie materia organiczna, która w znacznym stopniu warunkuje biologiczne, chemiczne i fizyczne właściwości gleb. Zawartość materii organicznej stanowi integracyjny i najczęściej wymieniany wskaźnik jakości gleby (Reeves 1997, Liu i in. 2006). Ze względu na niską zawartość materii organicznej w glebach i postępujący jej ubytek, w większości krajów europejskich postuluje się monitorowanie zasobów materii organicznej w glebach oraz wprowadza się praktyki mających na celu ochronę próchnicy w glebach (Terelak i in. 2008). Materia organiczna w glebie podlega nieustannie procesom mineralizacji i humifikacji, które zachodzą jednocześnie, ale ich skutki dla właściwości gleb są odmienne. Humifikacja jest procesem w wyniku którego tworzą się nowe produkty stanowiące uzupełnienie zasobów związków organicznych powstałych w procesie mineralizacji (Gonet 2007; Bieńkowski i Janowiak 2006). W wyniku humifikacji powstają bardzo ważne dla jakości i stabilności materii organicznej frakcje swoistych związków próchnicznych: kwasy huminowe, kwasy fulwowe i huminy (Gonet 1989; Rutkowska i Piкуła 2013). Oprócz działań w kierunku zwiększania zawartości materii organicznej, szczególnie w glebach lekkich istotne jest badanie jakości i stabilności materii organicznej. Jednym z podstawowych wskaźników oceny jakości gleb jest indeks humifikacji, wyrażany jest jako stosunek zawartości węgla frakcji kwasów huminowych do węgla kwasów fulwowych ($C_{KH}:C_{KF}$). Parametr ten wskazuje na kierunek transformacji materii organicznej w glebie, pozwala ocenić stabilność próchnicy oraz oszacować zmiany zachodzące w glebie, spowodowane m.in. długoletnią uprawą różnych roślin w płodozmianach, monokulturą, regularnym stosowaniem lub brakiem nawozów naturalnych oraz mineralnych. Powszechnie przyjmuje się, że próchnica o wartościach indeksu humifikacji wyższych od 1 jest charakterystyczna dla gleb żyzniejszych.

Wskaźnik $C_{KH}:C_{KF}$ przyjmujący wartości <1 jest typowy dla gleb z przewagą procesu mineralizacji.

Przekształcanie glebowej materii organicznej w związki próchniczne odbywa się z udziałem mikroorganizmów glebowych i jest rezultatem ich aktywności enzymatycznej (Diacono i Montemurro 2010; Blanchet i in. 2016; Scotti i in. 2015).

Oprócz zwiększenia zawartości materii organicznej w glebie ważne dla utrzymania żyzności gleb lekkich jest ograniczenie strat składników pokarmowych z gleby. Azot wniesiony do gleby w postaci nawozów naturalnych i organicznych ma na ogół mniejszą dostępność dla upraw niż azot wniesiony w nawozach mineralnych (Flavel i Murphy 2006). Pomimo istotnie niższej dostępności azotu z nawozów organicznych (nawozy zielone) i naturalnych (obornik, gnojowica), najbardziej efektywne wykorzystanie zapewniają zrównoważone dawki nawozów organicznych i mineralnych N (Schröder 2014). Ich określenie wymaga jednak dokładnych informacji o wartości odtworzeniowej organicznych zasobów azotu, wyrażonej we wspólnej jednostce. Azot mimo, że jest ważny dla plonowania roślin, a skutki jego stosowania są szybko widoczne w postaci zwiększonego plonu, to pierwiastek ten jest jednak podatny na wymywanie z gleby do wód podziemnych. W związku z tym może stwarzać zagrożenie dla środowiska. Z tego powodu azot wniesiony w nawozach organicznych i naturalnych musi być dokładnie dopasowany do dawki nawozów azotowych mineralnych, aby uniknąć jego strat. Nawozy naturalne i organiczne, oprócz tego, że wpływają na plonowanie roślin, wywołują także istotne zmiany właściwości fizycznych, chemicznych i biologicznych gleb, a ich skutki są najbardziej widoczne w trwałych doświadczeniach nawozowych.

Wieloletnie statyczne doświadczenia nawozowe, płodozmianowe, monokulturowe są cenne ze względu na możliwość śledzenia zmian właściwości gleb. W Polsce najstarszym prowadzonym do dziś doświadczeniem, kontynuowanym nawet w czasie trwania II wojny światowej, jest nawozowo-płodozmianowe doświadczenie założone w 1923 roku w Stacji Doświadczalnej w Skierniewicach, należące do Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie (Marks i in. 2018). Podobne doświadczenie zostało założone w 1979 roku, w Grabowie, w celu zbadania wpływu stosowania obornika i azotu mineralnego na produktywność roślin. To doświadczenie stanowiło mój podstawowy obiekt badawczy.

Opis eksperymentu polowego

Wyniki badań przedstawionych w 5 publikacjach naukowych pochodzą ze wspomnianego powyżej statycznego doświadczenia polowego, kierowanego przeze mnie od

12 lat, prowadzonego w Zakładzie Doświadczalnym IUNG-PIB w Grabowie nad Wisłą (52° 7' 36" N, 19° 0' 9" E). Doświadczenie jest zlokalizowane na glebie Albic Luvisol (FAO, 1998) o uziarnieniu piasku gliniastego lekkiego, kompleksu żytniego bardzo dobrego, klasy bonitacyjnej IVa. Klimat w tej części kraju jest umiarkowany ze średnimi rocznymi opadami wynoszącymi około 560 mm i średnią roczną temperaturą 7,8°C. Wyniki badań mogą być zatem generalizowane dla podobnych warunków glebowo-klimatycznych w środkowej Polsce.

Doświadczenie o powierzchni ponad 2 ha obejmuje dwa czteropolowe zmianowania i prowadzone jest polami dwóch roślin w każdym sezonie wegetacyjnym. W zmianowaniu A, określonym jako „zubożające” glebę w materię organiczną uprawiane są: kukurydza na ziarno (do 2007 r. ziemniak), pszenica ozima, jęczmień jary i kukurydza na kiszonkę. W zmianowaniu B, określanym jako „wzbogacające” glebę w materię organiczną uprawia się: kukurydzę na ziarno (do 2007 r. ziemniak), pszenicę ozimą + gorczycę na przyoranie jako poplon, jęczmień z wsiewką koniczyny i mieszankę koniczyny z trawami. Przez dwie pierwsze cztero-letnie rotacje zmianowań - drugim obok zmianowań czynnikiem doświadczenia były poziomy nawożenia obornikiem. Nawóz ten stosowano w obu zmianowaniach pod ziemniaki w dawkach 0, 20, 40, 60 i 80 t·ha⁻¹ co 4 lata. Od trzeciej rotacji - w doświadczeniu wprowadzono kolejny czynnik, którym jest zróżnicowany poziom nawożenia azotem mineralnym (N0, N1, N2, N3), dostosowanym do wymagań pokarmowych uprawianych roślin. Dawki N2 i N3 są wielokrotnościami dawki N1, która od 2007 roku w zmianowaniu A wynosi odpowiednio: 50 kg pod kukurydzę na ziarno, 50 kg pod pszenicę ozimą, 30 kg pod jęczmień jary a w zmianowaniu B: 50 kg pod kukurydzę na ziarno, 50 kg pod pszenicę ozimą, 30 kg pod jęczmień jary z wsiewką, oraz 50 kg pod każdy pokos mieszanki koniczyny z trawami. Dawki nawozów fosforowych pod wszystkie rośliny są jednakowe w obydwu zmianowaniach i wynoszą 54 kg P₂O₅·ha⁻¹. Nawozy potasowe wnoszą się w dawkach odpowiednio: 85 kg K₂O·ha⁻¹ pod jęczmień jary, 100 kg P₂O₅·ha⁻¹ pod pszenicę ozimą, 115 kg K₂O·ha⁻¹ pod mieszankę koniczyny z trawami, 120 kg K₂O·ha⁻¹ pod kukurydzę na silos i 160 kg K₂O·ha⁻¹ pod kukurydzę na ziarno.

Schemat doświadczenia:

- I czynnik: zmianowanie A (zubożające glebę w materię organiczną) i zmianowanie B (wzbogacające glebę w materię organiczną)

- II czynnik: zróżnicowane dawki obornika t·ha⁻¹ w obu zmianowaniach:

1.0. 0

2.0. 20

3.0. 40

4.0. 60

5.0. 80

- III czynnik: 4 poziomy nawożenia azotem mineralnym w $\text{kg N}\cdot\text{ha}^{-1}$ stosowane w odpowiednich dawkach pod wszystkie rośliny w obu zmianowaniach

0.1. N₀

0.2. N₁

0.3. N₂

0.4. N₃

W obydwu zmianowaniach plony uboczne roślin zbierano z pola i nie stosowano wapnowania gleby. W każdym roku oznaczano wielkość plonów głównych roślin i pobierano ich próbki dla oznaczenia zawartości całkowitych form składników mineralnych. W odstępach 4 -letnich (po każdej rotacji zmianowania) pobierano próbki gleby z warstwy ornej (0-30 cm) i oznaczano w nich zawartość przyswajalnych form składników mineralnych, węgla organicznego i pH. W 2013 roku wykonano także szczegółowe badania mikrobiologiczne gleby: zawartość Corg. i N całk. w ekstraktach zimną i gorącą wodą, biomasę mikroorganizmów metodą fumigacji-ekstrakcji, aktywność dehydrogenazy (ogólną aktywność drobnoustrojów glebowych), aktywność fosfatazy kwaśnej i fosfatazy alkalicznej oraz właściwości fizyczne gleby- skład granulometryczny. W celu oceny struktury gleby (agregacji), próbki suchej gleby zostały przesiane przez zestaw sit. Wydzielono dwie frakcje makroagregatów (> 0,5 mm i 0,5-0,25 mm) i jedną frakcję mikroagregatów (<0,25 mm). Wykonano również frakcjonowanie materii organicznej metodą Schnitzera.

Cele naukowe badań:

Dysponując eksperymentem w postaci trwałego wieloletniego doświadczenia zgromadziłam obszerną bazę danych oraz przeprowadziłam badania, które pozwoliły na postawienie i zrealizowanie następujących celów naukowych:

1. Określenie plonowania roślin w zależności od poziomu nawożenia obornikiem i azotem mineralnym w zmianowaniach różniących się ilością dopływającej materii organicznej (**4B.2, 4B.3, 4B.4**).
2. Poznanie wpływu badanych czynników doświadczalnych na ilość i jakość glebowej materii organicznej oraz na wybrane właściwości fizykochemiczne i biologiczne gleby (**4B.1, 4B.4 i 4B.5**).

3. Wyznaczenie równoważników nawozowych dla azotu obornika i azotu związanego biologicznie przez mieszankę koniczyny z trawami (**4B.3 i 4B.2**).

Omówienie osiągniętych wyników badań

• Cele badań 1 i 2

Plonowanie roślin w zależności od poziomu nawożenia obornikiem i azotem mineralnym w zmianowaniach różniących się ilością dopływającej materii organicznej

Kompleks czynników ujętych w doświadczeniu pozwolił na ocenę wpływu zróżnicowanych dawek azotu mineralnego oraz obornika na plony roślin w dwóch zmianowaniach A i B. Porównywalne zmianowania różniły się dopływem świeżej masy organicznej. W zmianowaniu B dopływ był większy - po zbiorze pszenicy ozimej uprawiano gorczycę na przyoranie i mieszankę koniczyny z trawami. Średni plon ś.m. gorczycy na obiektach nienawożonych obornikiem i azotem mineralnym wyniósł $3,1 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$, na obiektach z najwyższą dawką obornika i nawozu mineralnego nawet $20 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ (**4B.4**). Warto dodać, że mimo iż w badaniach nie była określona biomasa korzeni gorczycy, to z danych literaturowych wynika, że przy plonie około $20 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ gorczyca pozostawia w glebie około $2,5 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ korzeni (Nowakowski i Franke 2013). Biorąc to pod uwagę w zmianowaniu B, w zależności od poziomu nawożenia obornikiem i azotem mineralnym glebie dostarcza się od 6 do $23 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ więcej świeżej masy organicznej w porównaniu ze zmianowaniem A. Dodatkowo szacowano, że mieszanka koniczyny z trawami, która uprawiana jest w 4 roku zmianowania dostarcza do $10 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ suchej masy resztek materii organicznej (Jarchow i Liebman 2012).

Czynnikiem najbardziej różnicującym plon były warunki pogodowe w analizowanych latach badań, które rzutowały również na interakcje lat z czynnikami doświadczalnymi. Mimo to wpływ badanych czynników i występujących między nimi współdziałań na plony roślin był podobny. Plony wszystkich roślin wzrastały po zastosowaniu azotu mineralnego i obornika. Plony roślin uzyskiwane w zmianowaniu A były jednak mniejsze w porównaniu z plonami roślin w zmianowaniu B. Na przykład przy tej samej dawce obornika, plony bulw ziemniaka w zmianowaniu B bez dodatku azotu mineralnego wynosiły 103-107% plonów uzyskiwanych w zmianowaniu A przy maksymalnej dawce azotu mineralnego $150 \text{ kg N}\cdot\text{ha}^{-1}$. Odpowiednio te wartości dla pszenicy wyniosły 70-91%, a dla jęczmienia 73-88% (zmianowanie A) i 92-104% (zmianowanie B). Plony bulw ziemniaka, ziarna pszenicy ozimej i jęczmienia jarego zależały od zmianowania i były istotnie większe w zmianowaniu B (z koniczyną) niż w

zmianowaniu A. Na wielkość plonu roślin silniej wpływało nawożenie azotem mineralnym niż obornikiem. Efekt działania obornika i nawozów mineralnych był większy w zmianowaniu A niż w zmianowaniu B, a azot dostarczony w nawozach mineralnych działał zawsze istotnie lepiej niż azot z obornika (**4B.2 i 4B.3**). W celu określenia efektu dopływu większej ilości materii organicznej na produktywność zmianowań przeanalizowano szczegółowo plony pszenicy ozimej w pracy (**4B.4**). W zmianowaniu bez rośliny bobowatej i poplonu naturalna żyzność gleby nie nawożonej obornikiem i azotem mineralnym pozwoliła osiągnąć plon $2,5 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ tej rośliny w zmianowaniu A. Wprowadzenie do zmianowania nawożenia obornikiem w dawce $40 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ zwiększyło jej produktywność o 72,5%, a równoczesne zastosowanie obornika i azotu mineralnego o 163%. W zmianowaniu B, z rośliną bobowatą i poplonem gorczycy, bez nawożenia obornikiem i azotem mineralnym, produktywność gleby uległa zwiększeniu do $3,7 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ ziarna. Ponadto w zmianowaniu tym, dla uzyskania takich samych plonów ziarna pszenicy, jak w porównywanym zmianowaniu A było możliwe zmniejszenie zarówno dawek obornika, jak i dawek azotu mineralnego. Jednak maksymalną produktywność pszenicy na poziomie ok. $8,1 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ ziarna zapewniało zmianowanie, w którym uprawiano roślinę bobowatą i przyorywano po pszenicy gorczycę oraz stosowano obornik w dawce $40 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ i 150 kg N azotu $\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$.

Uzyskane wyniki wykazały, że na poletkach bez zastosowania obornika i azotu mineralnego w porównywalnych obiektach zmianowania B plony pszenicy ozimej były o ponad $1 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ większe niż w zmianowaniu A. Plony ziarna na poletkach bez nawożenia azotem mineralnym wynosiły odpowiednio $4,4 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ i $4,9 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ odpowiednio w zmianowaniu A i B. Korzystny wpływ dodatku nawożenia obornikiem na plony pszenicy ozimej był również wyraźnie widoczny przy obu poziomach nawożenia azotem mineralnym 100 i $150 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$. W obu zmianowaniach uzyskano maksymalne plony ziarna przy najwyższej dawce azotu mineralnego wynoszącej - $150 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ i aplikacji obornika, ale w zmianowaniu B plony były o prawie 10% większe niż w zmianowaniu A. Ciekawym efektem uzyskanym w przeprowadzonych badaniach był wyraźnie niższy (kwaśniejszy) odczyn gleby w zmianowaniu B, niż w zmianowaniu A. Regularne stosowanie obornika łagodziło negatywne skutki zakwaszenia w obu zmianowaniach, ale go nie niwelowało. W obiektach bez nawożenia obornikiem średnie pH wynosiło 4,5, a po zastosowaniu $40 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ obornika pH wzrosło do 4,7. Dla porównania w zmianowaniu A pH wynosiło odpowiednio 5,0 i 5,3. Duży spadek pH w zmianowaniu B był spowodowany przyorywaniem dużej ilości świeżej masy gorczycy, która działała zakwaszająco na glebę,

oraz większym wynoszeniem (większe plony) z gleby tego zmianowania Ca i Mg (**4B.4**). Pomimo mniej korzystnego odczynu gleby w porównaniu ze zmianowaniem A, wprowadzenie do gleby większych ilości świeżej masy organicznej w zmianowaniu B miało jednak pozytywny skutek. Pozwalało to na akumulację zwiększonych ilości węgla organicznego w glebie i było prawdopodobnie odpowiedzialne za lepsze wyniki plonowania - pszenicy ozimej i innych roślin uprawianych zmianowaniu B niż roślin w zmianowaniu A, z mniejszym dopływem świeżej masy organicznej.

Przeprowadzona przez mnie analiza plonów potwierdziła, że produktywność gleby lekkiej można zwiększyć nawet o ok. 50% po wprowadzeniu do zmianowania uprawy koniczyny z trawami oraz gorzycy wysiewanej jako poplon, a następnie przyorywanej. Znaczny przyrost produktywności gleby, o ok. 73% w zmianowaniu A i ok. 30% w zmianowaniu B można uzyskać przy regularnym, co 4 lata, stosowaniu obornika. Istotne były interakcje pomiędzy azotem mineralnym (nawozowym) i azotem wiązany przez roślinę bobowatą oraz azotem obornika. Zastosowanie dawki nawozów azotowych ($150 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ nawet w najkorzystniejszych warunkach (zmianowanie B i nawożenie obornikiem) zapewniło przyrost plonu ziarna pszenicy o niemal 70% (**4B.4**). Podobne wyniki uzyskano w wielu innych doświadczeniach polowych i dlatego moja uwaga była ukierunkowana przede wszystkim na środowiskowe skutki uprawy roślin w porównywanych zmianowaniach. Jak wcześniej wspomniano na początku w tym doświadczeniu nie stosowano wapnowania, aby ocenić jej właściwości buforujące po zastosowaniu obornika. Mechanizmy zachodzące w glebie po przyoraniu gorzycy - prowadzące do zmiany pH gleby nie są w pełni wyjaśnione. Ogólnie przyjmuje się, że najistotniejsze procesy generowania protonów (H^+) i jonów hydroksylowych (OH^-) związane są z przemianami C i N w glebach (Butterly i in. 2013). Kolejnym czynnikiem prowadzącym do zakwaszenia gleby w tym zmianowaniu mogła być większa produkcja CO_2 podczas mikrobiologicznego rozkładu świeżej materii organicznej. Uzyskane większe plony roślin w zmianowaniu B (**4B.2**) wskazują także na wyższe pobranie przez rośliny składników pokarmowych z gleby (w tym kationów zasadowych (K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) w porównaniu ze zmianowaniem A, czego przyczyną prawdopodobnie było większe zakwaszenie gleby w zmianowaniu B. Bardzo ciekawym i mało znanym w literaturze zjawiskiem zaobserwowanym w przeprowadzonych badaniach był jednak brak negatywnej reakcji plonu roślin na zakwaszenie gleby w tym zmianowaniu. Schröder i in. (2011), którzy badali zakwaszenie gleby w wyniku ponad 30-letniego stosowania rosnących dawek (do $272 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) różnych nawozów azotowych stwierdzili, że chociaż, wartość pH gleby zmniejszyła się do $<5,0$ już po 10 latach nawożenia azotem, to w ciągu 25 kolejnych sezonów

wegetacyjnych wystąpiło jedynie nieznaczne zmniejszenie plonu ziarna pszenicy ozimej. Warto dodać, że w eksperymencie powyższych autorów pszenica ozima była uprawiana w monokulturze i do gleby nie dodawano żadnych nawozów organicznych.

Przypuszczam, że w prowadzonych przeze mnie badaniach nastąpi jednak spadek plonowania roślin i że opóźnienie pojawienia się negatywnych skutków silniejszego zakwaszenia gleby w zmianowaniu B może wynikać z korzystnych efektów (jak omówiono powyżej) wprowadzenia do gleby świeżej masy organicznej gorczycy i resztek mieszanki koniczyny z trawami.

Ilość i jakość glebowej materii organicznej oraz wybrane właściwości fizykochemiczne i biologiczne gleby

Ilość i jakość glebowej materii organicznej zależą od wielu czynników środowiskowych, a w gruntach ornych w dużym stopniu od sposobu gospodarowania (Blanchet i in. 2016; Pranagal 2004; West i Post 2002). W prowadzonym przeze mnie wieloletnim doświadczeniu uwzględniono podstawowe czynniki agrotechniczne, które mogą wpływać na zawartość materii organicznej w glebie, tj. zmianowanie roślin, uprawa w zmianowaniu rośliny bobowatej i poplonu z gorczycy, nawożenie obornikiem i azotem mineralnym (Gonet, 2007; Maćkowiak 2000; Mazzoncini 2011; Rutkowska i Pikuła 2013). Pozwoliło to na zbadanie ich wpływu na ilość i jakość materii organicznej (Corg.). Na akumulację materii organicznej w glebie największy wpływ miało zmianowanie, następnie nawożenie obornikiem. Stwierdzono też korzystny wpływ nawożenia azotem mineralnym (**4B.1 i 4B.4**). Wpływ regularnie stosowanego obornika (raz na cztery lata) na zawartość węgla organicznego był ściśle powiązany z doбором gatunków roślin do uprawy. W zmianowaniu A w skrajnych obiektach doświadczalnych (bez obornika i azotu mineralnego) zawartość węgla organicznego po 33 latach prowadzenia doświadczenia wynosiła 6,1 g Corg. \cdot kg⁻¹ gleby (zmianowanie A). Natomiast największą ilość węgla organicznego - 8,5 g \cdot kg⁻¹ stwierdzono w zmianowaniu B, w glebie nawożonej obornikiem i najwyższą dawką azotu mineralnego (**4B.4**). Korzystny wpływ zmianowania B zapewniały głównie uprawa mieszanki koniczyny z trawami i uprawa poplonu na przyoranie. Wpływ zmianowania na zawartość węgla organicznego ulegał systematycznemu zwiększaniu w miarę upływu lat prowadzenia doświadczenia (**4B.1**). Wieloletnia analiza trendów zmian zawartości Corg. w glebie przedstawiona w publikacji (**4B.1**) wykazała, że nawożenie obornikiem w większym stopniu zwiększało zawartość Corg. w zmianowaniu B (o 17,4 %) niż w zmianowaniu A (o 14,5 %), przy czym wpływ ten

wzrastał wraz z dawką obornika. Po 33 latach stosowania obornika w dawce $20 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ w zmianowaniu A nie uzyskano zwiększenia zawartości Corg. w glebie. Wzrost ten o 8,1% nastąpił dopiero po zastosowaniu dawki $40 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$. Największy wzrost o 19,3% zawartości tego składnika uzyskano po zastosowaniu $60 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ obornika. W zmianowaniu B z rośliną bobowatą już zastosowanie dawki $20 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ obornika powodowało wzrost o 7,2 % zawartości węgla organicznego w glebie, w porównaniu do obiektu bez tego nawozu. Natomiast w zmianowaniu bez tej rośliny, nawet największe dawki obornika (60 i $80 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$) nie były wystarczające do utrzymania zawartości węgla organicznego na poziomie początkowym. **Powyższe ustalenia potwierdzają korzystny wpływ współdziałania obornika z odpowiednim doбором gatunków roślin na akumulację węgla organicznego w glebie. W moich badaniach potwierdziłam także wzrost zawartości tego składnika w glebie wraz ze zwiększeniem dawki obornika, był on istotnie większy w glebie pod zmianowaniem B niż w zmianowaniu A.**

Stwierdziłam ponadto istotny wpływ stosowania azotu mineralnego na zawartość węgla organicznego w glebie (**4B.1**). W zmianowaniu A zawartość Corg. zwiększyła się o 3% w porównaniu z obiektem kontrolnym, a w zmianowaniu z koniczyną odpowiednio o 4,6%. Dane na ten temat występujące w literaturze nie są jednoznaczne (Gregorach i in. 1994; Liebig 2002; Janowiak 1995). Wyjaśnienie tych rozbieżności będzie stanowić interesujący temat przyszłych badań.

Samo zmagazynowanie węgla organicznego w glebie nie gwarantuje stabilności i dobrej jakości materii organicznej. Glebowa materia organiczna składa się z frakcji lekkiej, niezwiązanej z koloidami mineralnymi (labilna frakcja), frakcji związanej z agregatami glebowym oraz z frakcji silnie związanej z cząstkami mineralnymi, które decydują o jej jakości i stabilności (Józefowska 2009; Sollins i in. 1996). Od strony chemicznej o jakości materii organicznej decyduje skład substancji humusowych, a więc udział frakcji kwasów huminowych (C_{KH}), kwasów fulwowych, (C_{KF}) i humin (C_H) w puli całkowitej węgla organicznego oraz stosunki ich zawartości $C_{KH}:C_{KF}$. W badaniach przedstawionych w publikacji (**4B.5**) potwierdziłam istotny, jakkolwiek niewielki, wpływ nawożenia obornikiem i doboru roślin w zmianowaniu na skład frakcyjny substancji humusowych. W wyniku stosowania wzrastających dawek obornika wystąpiła tendencja spadkowa zawartości frakcji węgla kwasów fulwowych (C_{KF}) i wzrostowa zawartości frakcji humin (C_H) w stosunku do obiektów bez nawożenia obornikiem. Procentowy udział frakcji kwasów huminowych (C_{KH}) w całkowitej puli węgla organicznego był wyższy w zmianowaniu A „zubożającym” niż w

zmianowaniu B „wzbogacającym” glebę w materię organiczną. Gleba w zmianowaniu B charakteryzowała się natomiast istotnie większym udziałem frakcji węgla kwasów fulwowych (C_{KF}). Konsekwencją zmian zawartości węgla kwasów huminowych i fulwowych, pod wpływem doboru roślin w zmianowaniu oraz nawożenia obornikiem były zmiany indeksu humifikacji (stosunku $C_{KH}:C_{KF}$). Według wartości tego indeksu bardziej stabilną próchnicą (wyższa wartość tego stosunku) charakteryzowała się gleba w zmianowaniu A i gleba nawożona obornikiem. Niższa wartość indeksu humifikacji w zmianowaniu B wynikała najprawdopodobniej z uprawy w tym zmianowaniu rośliny bobowatej, która pozostawiała większe ilości azotu w glebie oraz przyorywanej gorczycy działającej zakwaszająco na glebę, co mogło powodować nasilenie procesu mineralizacji. Ponadto proces humifikacji resztek roślinnych zawierających dużo azotu może charakteryzować się niższą wartością indeksu humifikacji. Wyjaśnienie tego zagadnienia będzie stanowić dalszy etap moich badań. Nawożenie azotem mineralnym pozostawało praktycznie bez wpływu na skład frakcji kwasów humusowych.

Wszystkie przemiany materii organicznej w glebie dokonują się z udziałem mikroorganizmów glebowych oraz ich enzymów (Allison 2006; Bastysda i in. 2006; Gałązka i in. 2017; Scherer i in. 2011). W badaniach własnych analizowałam również właściwości mikrobiologiczne gleby. Założyłam, że skoro uprawa roślin bobowatych wpływa korzystnie na akumulację węgla organicznego oraz jakość materii organicznej, to również może wpływać korzystnie na właściwości fizyczne i biologiczne gleby oraz wywierać inne skutki środowiskowe w zależności od dopływu lub braku świeżej materii organicznej. Wymagało ponadto wyjaśnienia czy wysiewanie roślin zielonych na przyoranie działa podobnie jak wapnowanie gleby, czyli wykazuje tzw. "efekt wapnowania". Jest to bardzo ważne w rolniczym zagospodarowaniu kwaśnych gleb i łagodzeniu zakwaszających skutków ubocznych nawożenia azotem (Xu i Coventry 2003; Naramabuye i Haynes 2007; Mazzoncini i in. 2011; Tejada i in. 2008). Wyniki badań przedstawiałam w pracy (4B.4). Jarchow i Liebman (2012) wskazują, że kukurydza uprawiana w zmianowaniu może wytwarzać od 4 do 6 razy mniej biomasy korzeniowej niż trawy C3 lub mieszanki trawiaste. Biorąc pod uwagę te wyniki, jak również wyniki własnych badań nad korzeniami roślin uprawnych, przyjąłam, że mieszanka koniczyny z trawami wzbogaca glebę w znacznie większe ilości materii organicznej niż kukurydza na zielonkę (korzenie i dolne części łodyg).

W przeprowadzonych badaniach udowodniłam, że zwiększony długotrwały dopływ materii organicznej w zmianowaniu B spowodował zarówno korzystne, jak i negatywne zmiany w wybranych właściwościach gleby. Po 33 latach uprawy roślin w

dwóch zmianowaniach gleba w zmianowaniu B zawierała więcej węgla organicznego, niż gleba w zmianowaniu A, niezależnie od dawki nawozów mineralnych i obornika, średnio o prawie 12%. Na zawartość węgla biomasy mikroorganizmów glebowych (SMBC) i aktywność enzymów w glebie (dehydrogenaza, fosfataza kwaśna) istotny wpływ miały wszystkie czynniki badane w tym doświadczeniu. Ogólnie, parametry te miały znacznie wyższe wartości w zmianowaniu A niż w zmianowaniu B oraz w obiektach nawożonych obornikiem, w porównaniu z obiektami bez tego nawozu. Zawartość SMBC była większa w zmianowaniu B niż w zmianowaniu A i istotnie wrastała pod wpływem nawożenia obornikiem. Interesujący jest wpływ azotu mineralnego na ten parametr gleby. W miarę zwiększania dawek N generalnemu obniżaniu ulegała zawartość SMBC. Ten ujemny wpływ był największy w zmianowaniu A i w obiektach bez obornika i ulegał złagodzeniu zarówno pod wpływem doboru gatunków roślin w zmianowaniu B, jak i stosowania obornika. Aktywność fosfatazy kwaśnej i alkalicznej oraz dehydrogenazy kształtowały się podobnie jak zawartość SMBC i mogą służyć jako pośredni wskaźnik tej zawartości. Istnieje także ogólny pogląd, że właściwe praktyki gospodarowania glebami uprawnymi, w szczególności w odniesieniu do nawożenia azotem, zwiększają sekwestrację węgla organicznego w glebie i są korzystne dla mikroorganizmów glebowych i ich aktywności, głównie ze względu na większą ilość trafiających do gleby pozostałości poźniwnych (Blanchet i in. 2016; Mazzoncini i in. 2011; Acosta-Martinez i in. 2007; Halvorson i in. 1999). Istnieją jednak również doniesienia, w których się stwierdza, że mineralne nawozy azotowe, a szczególnie ich wysokie dawki, mogą zmniejszać zawartość SMBC i aktywność enzymów glebowych. Otrzymane przez ze mnie wyniki badań w odniesieniu do SMBC i aktywności dehydrogenazy są z nimi zgodne (Ghimire 2017; Liebig 2002). Ogromna aktywność biochemiczna mikroorganizmów sprawia, że odgrywają one decydującą rolę w kształtowaniu stabilności ekologicznej i produktywności ekosystemów, dlatego też SMBC uważana jest za dobry wskaźnik jakości gleby.

W publikacji (4B.4) omówiono i zinterpretowano wpływ badanych czynników doświadczalnych na odczyn i zawartość wymiennych form wapnia i magnezu w glebie. Jak wspomniano we wstępie w doświadczeniu nie stosowano wapnowania i nawozów magnezowych. Lekko kwaśny odczyn wyjściowy gleby ulegał wyraźnemu obniżeniu do odczynu kwaśnego we wszystkich obiektach doświadczalnych. Przy braku wapnowania wzrastające dawki azotu mineralnego powodowały silniejsze zakwaszenie gleby szczególnie w obiektach nienawożonych obornikiem w obu zmianowaniach. W zmianowaniu B niekorzystny wpływ na odczyn (wartość pH) gleby miało stosowanie nawozów azotowych

oraz przyorywanie dużej ilości masy gorczyicy w zmianowaniu B. Ten wpływ był „łagodzony”, ale nie ulegał zniwelowaniu w wyniku nawożenia obornikiem. Interesujące jest, że zawartość wymiennego wapnia podlegała silniejszemu zmniejszeniu niż odczyn gleby. Bardzo znacznemu obniżeniu, niezależnie od czynników doświadczalnych, uległa wyjściowa zawartość magnezu, zwłaszcza w obiektach bez obornika i z większymi dawkami nawozów azotowych.

W prezentowanych badaniach opublikowanych w pracy **4B.4** oceniałam również strukturę gleby w zmianowaniu A i B w kontekście korzystnego lub negatywnego wpływu czynników tego eksperymentu. Niektórzy autorzy wskazują (Liebig 2002, Butterly i in. 2013), że nawożenie mineralne nie wpływa korzystnie na strukturę gruzelkową i niszczy życie biologiczne gleby. Gleba w zmianowaniu A zawierała znacznie więcej frakcji makroagregatów > 0,5 mm niż gleba w zmianowaniu B, odwrotnie niż było w przypadku makroagregatów mniejszych (0,5-0,25 mm) i frakcji mikroagregatów (**4B.4**). Wyniki te wskazują, że powstawanie dużych agregatów w zmianowaniu B było zredukowane. Chociaż Zhang i in. (2016), Whalen i Chang (2002), podają, że w glebach traktowanych corocznie i przez długi czas obornikiem dyspersja dużych agregatów może być zwiększona, to w przypadku prowadzonych przeze mnie badań uzyskano zmniejszony udział frakcji makroagregatów > 0,5 mm w glebie w zmianowaniu B. Może to wynikać głównie z niższej zawartości dwuwartościowych kationów, Ca^{2+} i Mg^{2+} w tej glebie w porównaniu z glebą w zmianowaniu A. Jony, szczególnie Ca^{2+} , są istotne z uwagi na ważną rolę w agregacji gleby poprzez tworzenie mostków między minerałami ilastymi a cząsteczkami węgla organicznego (Six i in. 2004). Podobnie w badaniach innych autorów (Zhang i in. 2016; Wang i in. 2017) przyorywany obornik w dawce $40\ t\cdot ha^{-1}$ zwiększał zawartość frakcji makroagregatów > 0,5 mm i zmniejszał frakcję mikroagregatów w porównaniu z nienawożoną glebą, ale efekt ten był istotny tylko w zmianowaniu A.

Z omówionych dotychczas 3 prac wynika, że **maksymalną produktywność roślin, uprawianych na glebach lekkich można uzyskać jedynie pod warunkiem równoczesnego stosowania właściwego zmianowania, nawożenia obornikiem i stosowania właściwej dawki azotu mineralnego. Na przykładzie szczegółowo analizowanej uprawy pszenicy ozimej czysty efekt zmianowania pozwolił więc zwiększyć produktywność gleby o 45%. W zmianowaniu B uzyskanie takich samych plonów ziarna pszenicy, jak w porównywanym zmianowaniu A było możliwe przy zmniejszeniu zarówno dawek obornika, jak i dawek azotu mineralnego. Regularne stosowanie obornika łagodziło**

negatywne skutki zakwaszenia w obu zmianowaniach, ale go nie niwelowało. Gleba w zmianowaniu B, w przeciwieństwie do gleby zmianowania A, była bardziej kwaśna, miała też niższą zawartość Ca i Mg i zawierała zmniejszoną część frakcji agregatów > 0,5 mm. Uwzględnienie w zmianowaniu rośliny bobowatej i uprawy poplonu na przyoranie wpływało dodatnio na wszystkie cechy gleby składające się na jej żyzność. Te czynniki agrotechniczne pozwalają na stabilizację produktywności gleby lekkiej na poziomie plonów średnich. Uzyskiwanie dużych plonów roślin jest jednak możliwe dopiero pod warunkiem stosowania odpowiednich dawek nawozów azotowych.

• **Cel badań 3.**

Równoważniki nawozowe azotu dla obornika i azotu związanego biologicznie przez mieszankę koniczyny z trawami

W badaniach przeprowadzonych w statycznym doświadczeniu polowym bardzo istotne są interakcje pomiędzy azotem mineralnym (nawozowym) i azotem wiązanym przez roślinę bobowatą oraz azotem obornika. Interakcje te wyceniałam na podstawie obliczonych równoważników azotowych (NFRV - nitrogen fertilizer replacement value), co stanowiło realizację kolejnego celu badań i jest kluczowym elementem prezentowanego osiągnięcia naukowego.

Koncepcję i metodę wyliczenia równoważników azotowych przygotowałam, będąc na stażu naukowym w Wageningen (Holandia), realizowanym w ramach projektu Catch-C, którego byłam wykonawcą. Celem tego projektu było opracowanie i ocena najlepszych praktyk zarządzania składnikami pokarmowymi w gospodarstwie (zwiększenie plonów roślin uprawnych, łagodzenie skutków zmian klimatu i poprawa jakości gleby), między innymi na podstawie wyników wieloletnich doświadczeń nawozowych w UE. Zarówno w UE, jak i w Polsce od wielu lat zagadnienie związane z bezpiecznym wykorzystaniem azotu w rolnictwie badane jest w kontekście zmniejszenia negatywnego oddziaływania tego składnika na środowisko. Postępująca od wielu lat intensyfikacja rolnictwa opierająca się na mineralnych nawozach azotowych oraz rozwój gospodarstw wielkotowarowych nastawionych na produkcję zwierzęcą wiąże się z rozpraszaniem azotu do środowiska. Wymaga to opracowania sposobu prawidłowego zarządzania składnikami pokarmowymi w gospodarstwie. W celu zmniejszenia presji azotu na środowisko wciąż poszukuje się metod jego efektywniejszego wykorzystania przez rośliny i ograniczenia stosowania mineralnych nawozów azotowych, poprzez zastąpienie ich nawozami organicznymi lub naturalnymi.

Literatura podaje, że 100 kg azotu związanego przez rośliny bobowate może być ekwiwalentem 200 kg azotu zastosowanego w formie nawozu mineralnego (Prusiński i Kotecki 2006). Zatem właściwa ocena wartości zastępczej azotu z tych upraw, jak również z nawozów, jest szczególnie istotna w gospodarstwach wielkotowarowych, ze względu na możliwe duże straty azotu do środowiska. W tym celu przeanalizowałam dane z 24 lat trwania doświadczenia, z sześciu czteroletnich rotacji zmianowania A i B, a wyniki przedstawiłam w dwóch pracach (**4B.2** i **4B.3**). Azot wniesiony w nawozach naturalnych (obornik) ma z reguły mniejszą dostępność dla roślin niż azot wniesiony w nawozach mineralnych (Flavel i Murphy 2006). Różnice dostępności azotu pochodzącego z obydwu źródeł wycenia się z zastosowaniem tzw. równoważnika wartości nawozowej (*Mineral Fertilizer Equivalent*), określanego również jako wartość zastąpienia azotu mineralnego (*Mineral Fertilizer Replacement Value - NFRV*) (Jensen 2013). Wartość tę wyraża się stosunkiem ilości kg N w nawozie mineralnym do kg N w oborniku (Schröder 2005a) potrzebnej do uzyskania takiego samego plonu roślin. Do wyznaczenia wartości NFRV konieczne są wyniki doświadczeń polowych ze wzrastającymi dawkami nawozów azotowych stosowanymi bez nawozów organicznych i na tle określonej dawki tych nawozów. Z uwagi na działanie następcze nawozów organicznych doświadczenia takie powinny być prowadzone przez szereg lat na tym samym polu (Gutser in. 2005, Schröder 2005b). Do grupy odpowiednich obiektów (nielicznych w Europie) należy doświadczenie w Grabowie. W publikacji (**4B.3**) przedstawiono metodykę wyliczania wartości NFRV dla obornika oraz odpowiednie wyliczenia w odniesieniu do sumy plonów suchej masy lub sumy pobrania azotu przez trzy lub cztery kolejne rośliny uprawiane w zmianowaniach A i B, dla 4 poziomów nawożenia obornikiem. Średnie wartości NFRV wyliczone w odniesieniu do plonów suchej masy roślin i sumy pobrania azotu przez rośliny wynosiły odpowiednio 0,37 i 0,50 kg N nawozów azotowych/kg N w oborniku. Wartości te można bezpośrednio przedkładać na zalecenia nawozowe. Należy jednak wziąć pod uwagę fakt, że odnoszą się one do długiego okresu, a nie do jednorocznego stosowania nawozów. Trzeba podkreślić, że efekt nawozowy obornika może być większy, niż wynika to z przedstawionych powyżej wartości równoważników azotu obornika (wartości nawozowe obornika stanowią około połowy wartości nawozów mineralnych), ponieważ w miarę upływu lat coraz większego znaczenia nabierają pozanawozowe efekty nawożenia obornikiem.

W publikacji (**4B.2**) przedstawiono metodykę i obliczenia równoważnika nawozowego azotu związanego biologicznie przez roślinę bobowatą - koniczynę uprawianą z trawami w zmianowaniu B. Koniczyna uprawiana w monokulturze lub w mieszance z trawą

jest ważnym komponentem płodozmianów, ze względu na dostarczanie glebie azotu biologicznie związanego i wydajność produkcyjną (Van der Meer i Baan Hofman 1989). Azot biologicznie związany przez koniczynę jest częściowo akumulowany w korzeniach pozostających na polu po zbiorze. Resztki poźniwne tej rośliny po przejściu procesu dostarczają znacznych ilości azotu dla następnych upraw (Grootenhuis 1977; Fotyma i Filipiak 2006 ; Pikuła i Rutkowska 2008).

Ocena wartości NFRV dla rośliny bobowatej dokonywana w odniesieniu do plonu, lub pobrania azotu przez rośliny następcze jest komplikowana przez fakt pozanawozowej wartości roślin bobowatych, obejmującej korzystny fitosanitarny wpływ na środowisko glebowe. Trudność w wyznaczaniu wartości NFRV roślin bobowatych polega zatem na wydzieleniu „czystego” efektu zakumulowanego w glebie, azotu związanego biologicznie z całkowitego efektu uprawy tych roślin (Giller 2002; Schröder 2005a, b). Również wyznaczenie „czystego” efektu azotowego obornika, jest skomplikowane poprzez jego działania uboczne, ale wyzwanie to jest znacznie większe w przypadku rośliny bobowatej. Należy również uwzględnić fakt, że w nawozach organicznych i naturalnych poza azotem, są także inne składniki pokarmowe, takie jak fosfor (P), potas (K) lub siarka (S), które również wpływają na plony. Dlatego ważne jest, aby wykluczyć te dodatkowe efekty przy szacowaniu wartości NFRV na podstawie plonów albo pobrania azotu.

Wyznaczone przeze mnie wartości NFRV różniły się również w analizowanych trzech czteroletnich rotacjach zmianowań z uwagi na zmienne w latach badań plony koniczyny z trawami i różny udział samej koniczyny w tej mieszance. Z wyliczeń wynikało również, że na wartość NFRV wpływał poziom nawożenia azotem stasowanym pod roślinę następczą i konieczne było oddzielne oszacowanie tej wartości dla niskich (L) i wysokich dawek nawozów azotowych (H), zawsze porównując zmianowanie A i B przy dawkach obornika (0, 20, 40, 60 i 80 t·ha⁻¹). Wszystkie te elementy wzięto pod uwagę w wyznaczaniu NFRV dla rośliny bobowatej. W przypadku wyznaczania równoważnika nawozowego azotu związanego biologicznie posłużono się uproszczonym pojęciem zastąpienia azotu zastosowanego w nawozach mineralnych przez azot związany biologicznie dzięki uprawie koniczyny w mieszance z trawami. Wartość zastąpienia azotu jest to jego ilość w nawozie mineralnym zaoszczędzona dzięki uprawie mieszanki koniczyny z trawami. W odniesieniu do mojego doświadczenia jest to ilość azotu w nawozie mineralnym konieczna w zmianowaniu A do uzyskania takich samych plonów roślin, lub takiego samego pobrania azotu przez rośliny, jak w zmianowaniu B w obiekcie bez nawożenia azotem mineralnym. Wartości wyliczone oddzielnie dla każdej dawki obornika. Sumaryczne oszczędności azotu wyliczone dla trzech

roślin uprawianych w rotacji zmianowania B (z wyłączeniem koniczyny z trawami) wynosiły: 188, 246, 270, 295 i 312 kg N/ha, co w ujęciu procentowym stanowi 50, 65, 72, 79 i 83% dla dawek obornika (0, 20, 40, 60 i 80 t·ha⁻¹). Te wartości odnoszą się do zmianowania B w stosunku do zmianowania A.

Uzyskane tak duże wartości oszczędności azotu mineralnego po wprowadzeniu do zmianowania mieszanki koniczyny z trawami wynikają prawdopodobnie z pozanawozowego efektu uprawy w zmianowaniu rośliny bobowatej oraz pozostawiania w glebie dużej ilości resztek po ich zbiorze. Oznacza to, że wartość nawozowa azotu mineralnego stosowanego w zmianowaniu z koniczyną wynosi 50-83% wartości azotu stosowanego w zmianowaniu bez rośliny bobowatej. Wartości zastępcze nawozu N dla resztek poźniwnych mieszanki koniczyny z trawą w tym doświadczeniu wskazują, że mieszanki w rotacji ornej mogą znacznie zmniejszyć zapotrzebowanie na azot. Udowodniłam, że korzystanie z organicznych źródeł azotu może przynieść inne korzyści oprócz dostarczenia azotu dla kolejnych roślin uprawianych w zmianowaniu. Najbardziej oczywistymi z nich jest dostarczenie innych składników pokarmowych, takich P i K oraz materii organicznej, której wpływ na właściwości fizyczne i chemiczne gleb został już szeroko przedstawiony.

Podsumowanie i wnioski

Z przeprowadzonych wieloletnich badań polowych i laboratoryjnych, które zostały omówione w 5 publikacjach wyciągnęłam następujące wnioski o charakterze zarówno naukowym, jak i praktycznym.

1. Maksymalną produktywność roślin uprawianych na glebach lekkich można uzyskać jedynie pod warunkiem stosowania właściwego zmianowania, nawożenia obornikiem i aplikowania odpowiedniej dawki azotu mineralnego.
2. W zmianowaniu B z udziałem mieszanki koniczyny z trawą oraz gorczycą na przyoranie plonowanie wszystkich roślin w tym zmianowaniu było znacząco wyższe niż w zmianowaniu bez tych elementów (zmianowanie A). Na przykład, po sześciu rotacjach średnie (dla wszystkich poziomów N i obornika) plony bulw ziemniaka oraz ziarna pszenicy ozimej i jęczmienia jarego były w zmianowaniu B większe o odpowiednio, 27,5%, 12,5%, 17,0%. W przypadku pszenicy ozimej czysty efekt zmianowania pozwolił zwiększyć produktywność gleby o 45%. Ponadto w zmianowaniu B, dla uzyskania takich samych plonów ziarna pszenicy,

jak zmianowaniu A wymagało mniejszych dawek, zarówno dawek obornika, jak azotu mineralnego.

3. Wieloletnie stosowanie obornika co 4 lata, oraz uprawa rośliny bobowatej w mieszance z trawami i poplonu z gorzycy spowodowało istotne zwiększenie zawartości materii organicznej w glebie oraz poprawę jej jakości. Nawożenie obornikiem w tym zmianowaniu (tzw. „wzbogacającym”) zwiększało zawartość materii organicznej w znacznie większym stopniu niż w zmianowaniu A (tzw. „zubożającym”). Po 33 latach stosowania obornika w dawce $20 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ w zmianowaniu A nie uzyskano zwiększenia zawartości materii organicznej w glebie. W zmianowaniu B już zastosowanie dawki $20 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ obornika spowodowało wzrost zawartości Corg. o 7,2%. Mimo tego zaobserwowano malejące tempo akumulacji materii organicznej w glebie w ciągu ostatnich lat. Wskazuje to na postępujące wysycenie gleby lekkiej materią organiczną, co szczególnie uwidocznia się w obiektach z największym jej dopływem, w formie resztek rośliny bobowatej i przyoranej gorzycy (zmianowanie B).
4. Zmianowanie i nawożenie obornikiem miały wpływ nie tylko na ilość nagromadzonej materii organicznej, ale i na jej jakość, ocenianą na podstawie chemicznego rozdziału na frakcje kwasów huminowych, kwasów fulowych i humin oraz na podstawie charakterystyki węgla biomasy mikroorganizmów glebowych. Parametry te były wyższe w zmianowaniu B niż w zmianowaniu A i wzrastały pod wpływem dawki obornika, co wskazuje na lepszą i stabilniejszą jakość materii organicznej w tym zmianowaniu.
5. Dopływ dużych ilości świeżej materii organicznej do gleby wywierał wiele korzystnych zmian i poprawiał właściwości gleby lekkiej i jej produktywność, tym niemniej, w pewnych warunkach, np. przy braku wapnowania gleby, takie zmianowanie (B) może mieć również niekorzystny wpływ na niektóre właściwości (odczyn gleby i agregację) gleb (Luvisols).
6. Równoważnik nawozowy azotu dla obornika wyznaczony w badaniach własnych w odniesieniu do sumy plonów roślin w zmianowaniu A wyniósł $0,37 \text{ kg N}$ mineralnego na 1 kg N w oborniku, a w odniesieniu do sumy pobrania azotu przez wszystkie uprawiane w zmianowaniu rośliny - $0,50 \text{ kg N}$ mineralnego na 1 kg N w oborniku.
7. Zastąpienie azotu mineralnego w zmianowaniu B, wyniosło od 50 do 83% w stosunku do zmianowania A. Wartości te wskazują na możliwe duże ograniczenie

stosowania nawozów mineralnych azotowych, co ma wymiar środowiskowy (mniejsze straty azotu) oraz ekonomiczny (mniejsze nakłady na zakup nawozów azotowych mineralnych).

Najważniejsze stwierdzenia z przeprowadzonych badań mające znaczenie praktyczne:

Badania nad skutkami środowiskowymi i produkcyjnymi uprawy roślin w zmianowaniach różniących się ilością dopływającej materii organicznej w warunkach gleby lekkiej zakwaszonej mają przede wszystkim znaczenie praktyczne. Problem zachowania żyzności i urodzajności gleb obecnie znajduje odzwierciedlenie w prawodawstwie europejskim i światowym (Gonet 2007). Wyczerpywanie rezerw glebowej materii organicznej prowadzić może z jednej strony do zaburzeń podstawowych funkcji gleby, z drugiej zaś do znacznego spadku jej żyzności, a w konsekwencji do redukcji plonów (Pranagal 1994, Wiater 2000). Jest to problem szczególnie ważny i aktualny w przypadku polskich gleb, w większości lekkich i zakwaszonych. Do potwierdzonych w moich badaniach praktyk rolniczych wpływających na przyrost zasobów glebowej materii organicznej można zaliczyć m.in. przyorywanie nawozów zielonych i stosowanie obornika. Doświadczenie z dwoma zmianowaniami jednoznacznie wykazało, że uprawa roślin bobowatych w mieszankach z trawami oraz stosowanie nawozów zielonych w postaci gorczycy uprawianej jako poplon po zbiorze pszenicy ozimej pozwalają zmagazynować w glebie dużą ilość węgla organicznego. Poza tym wpływają korzystnie na poprawę struktury gleby lekkiej i wzmagają życie biologiczne gleby. Cennym osiągnięciem badań jest wyznaczenie równoważników azotowych dla obornika oraz dla mieszanki koniczyny z trawami. Otrzymane wartości zastępcze N wynoszące odpowiednio 0,37 i 0,50 kg nawozu-N na kg azotu z obornika mają znaczenie również poza lokalnymi warunkami doświadczenia. Uzyskane wysokie wartości zastępcze azotu z mieszanki koniczyny z trawami wskazują na możliwość oszczędności stosowania nawozów mineralnych, które w doświadczeniu płodozmianowym dla dawek obornika: 0, 20, 40, 60 i 80 t·ha⁻¹ wyniosły 50, 65, 72, 79 i 83%.

Literatura

Acosta-Martinez V., Mikha M. M. & Vigil M. F. 2007. Microbial communities and enzyme activities in soils under alternative crop rotations compared to wheat-fallow for the Central Great Plains. *Appl. Soil Ecol.* 37, 41–52.

Allison S.D. 2006. Brown ground: a soil carbon analogue for the green worldhypothesis? *The American Naturalist* 167, 619-627.

- Bastyda F., Moreno J.L., Hernandez T., Garcia C. 2006. Microbiological activity in soil 15 years after its devegetation. *Soil.Biol. Biochem.*, 38:2503-2507.
- Bieńkowski J., Janowiak J. 2006. Zawartość węgla organicznego w glebie, jego zmiany pod wpływem różnych systemów produkcji. *Fragmenta Agronomica*, 2:216-225.
- Blanchet G., Gavazov K., Bragazza L. & Sinaj S. 2016. Responses of soil properties and crop yields to different inorganic and organic amendments in a Swiss conventional farming system. *Agr. Ecosyst. Environ.* 230, 116–126.
- Butterly C. R., Baldock J. A., Tang C. 2013. The contribution of crop residues to changes in soil pH under field conditions. *Plant Soil* 366, 185–198.
- Diacono M. & Montemurro F. 2010. Long-term effects of organic amendments on soil fertility. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 30, 401–422.
- Flavel T.C., Murphy D.V. 2006. Carbon and nitrogen mineralization rates after application of organic amendments to soil. *J Environ Qual* 35:183–193. doi:10.2134/jeq2005.0022.
- Fotyma M., Filipiak K. 2006. The influence of long-term application on FYM and nitrogen fertilizers on the yield and uptake of nitrogen by crops grown in two rotations. *Fertilizers and Fertilization*, 1: 71–89.
- Gałązka A., Gawryjolek K., Grzędziel J., Frąc M, Książak J., 2017. Microbial community diversity and the interaction of soil under maize grown in different cultivation techniques. *Plant Soil. Environ.*, 63(6): 264-270.
- Ghimire R., Machado, S. & Bista P. 2017. Soil pH, organic matter, and crop yields in winter wheat-summer fallow systems. *Agron. J.* 109(2), 706–717.
- Giller K.E. 2002. Targetting management of organic resources and mineral fertilisers: can we match scientists' fantasies with farmers' realities? In: *Integrated plant nutrient management in sub-saharan Africa* (eds B. Vanlauwe, J. Diels, N. Sanginga & R. Merckx), pp. 155–171. CAB International, Wallingford, UK.
- Gonet S.S. 1989. Właściwości kwasów huminowych gleb o zróżnicowanym nawożeniu. *Rozprawy 33. Bydgoszcz: ATR* ss 55.
- Gonet S.S. 2007 *Ochrona zasobów materii organicznej. W: Rola materii organicznej w środowisku; Markiewicz M. (red.), PTSH, Wrocław, 7-29.*
- Gregorich E.G., Montreal C.M., Carter D.A., Angers D.A., Ellert B.H. 1994. Towards a minimum data set to assess organic matter quality in agricultural soils. *Canadian Journal of Soil Science*, 74: 367–385.
- Grootenhuis, J.A. 1977. Mehrjährige Versuchsergebnisse mit Sommergerste, Winterweizen, Speisekartoffeln und Zuckerrüben ohne und mit Einschaltung von Leguminosen als

Hauptfrüchte in die Fruchtfolge (1953 bis 1976). Proceedings symposium produktion der biomassa und ertragsbildung der feldfrüchte, vol. 2, pp. 111–120, [s.l.], Praag.

Gutser R., Ebertseder T., Weber A., Schraml M., Schmidhalter U. 2005. Short-term and residual availability of nitrogen after long-term application of organic fertilizers on arable land. *Z. Pflanzenernähr Bodenk* 168:439-446.

Halvorson A. D., Reule C. A., Follett, R. F. 1999. Nitrogen fertilization effects on soil carbon and nitrogen in a dryland cropping system. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63: 912–917.

Janowiak J. 1995. Effect of fertilization manure supplemented with straw and different nitrogen doses on the properties soil organic matter. *Advances of Agricultural Sciences Problem Issues*, 421:145–150.

Jarchow M., Liebman M. 2012. Tradeoffs in biomass and nutrient allocation in prairies and corn managed for bioenergy production. *Crop Sci.* 52, 1330–1342.

Jensen L. S. 2013. Animal manure fertiliser value, crop utilisation and soil quality impacts. In: Sommer SG, Christensen ML, Schmidt T, Jensen LS (eds) *Animal manure recycling: treatment and management*. Wiley, Chichester.

Józefowska A. 2009. Materia organiczna gleby i metody jej frakcjonowania. W: *Wielokierunkowość badań w rolnictwie i leśnictwie*, 2:517-523.

Liebig M. A., Varvel G. E., Doran J. W. & Wienhold, B. J. 2002. Crop sequence and nitrogen fertilization effects on soil properties in the Western Corn Belt. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66, 596–601.

Liu X., Herbert S.J., Hashemi A.M., Zhang X. and Ding G. 2006. Effects of agricultural management on soil organic matter and carbon transformation – a review. *Plant Soil Environ.*, 52, 531-543.

Maćkowiak Cz. 2000. Wpływ doboru roślin w zmianowaniu, obornika i nawozów mineralnych na zawartość węgla organicznego w glebie i produktywność zmianowań. *Nawozy i Nawożenia, Fertilizers nad Fertilization*, 4(5), II, 91-102.

Marks M., Magdalena J., Kostrzevska M.K. 2018. *Eksperymenty wieloletnie w badaniach rolniczych w Polsce*. Wydawnictwo UMW Olsztyn, 2018, ISBN 978-83-8100-132-8:7-271.

Mazzoncini M., Sapkota T. B., Barber P., Antocji D. & Risaliti R. 2011. Long-term effect of tillage, nitrogen fertilization and cover crops on soil organic carbon and total nitrogen content. *Soil Till. Res.* 114, 165–174.

Mercik S., Stępień W., Lenart S. 2000. Żyzność gleb w trzech systemach nawożenia: mineralnym, organicznym i organiczno-mineralnym - w doświadczeniach wieloletnich. *Cz. I.*

Właściwości fizyczne i fizykochemiczne gleb. *Folia Univ. Agric. Stetin* 211, Agric. 84: 311-316.

Naramabuye F. X. & Haynes R. J. 2007. The liming effect of five organic manures when incubated with an acid soil. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 170, 615–622.

Nowakowski M., Franke, K. 2013. Yield structure of selected varieties of white mustard grown as main crops and their impact on the potato cyst nematode (*Globodera rostochiensis*) II. Above-ground and root biomass production and potato cyst nematode density in soil. *Rosliny Oleiste Oilseed Crops*, 34(1), 85–94 (In Polish with an English abstract).

Ochal P. Kopiński J. 2017. Wpływ zakwaszenia gleb na środowisko i produkcję roślinną. *Studia i Raporty IUNG-PIB. Nawożenie a środowisko*, 53 (7):9-25.

Pikuła D., A. Rutkowska. 2008. Ocena ilości azotu związanego biologicznie przez koniczynę uprawną w mieszance z trawami w płodozmianie czteropolowym. *Fragm. Agronom.*, (XXV) Nr 4 (100):98-110.

Pranagal J. 2004. Wpływ systemu uprawy na zawartość węgla organicznego w glebie. *Annales UMCS Sectio E* 59, 1:1-10.

Prusiński J., Kotecki A. 2006. Współczesne problemy produkcji roślin motylkowatych. *Fragm. Agron.* 23(3):94-126.

Reeves D. W. 1997. The role of soil organic matter in maintaining soil quality in continuous cropping systems. *Soil Till. Res.* 43, 131–167.

Rutkowska, A. Pikuła, D. 2013. Effect of crop rotation and nitrogen fertilization on the quality and quantity of soil organic matter. *Soil Processes and Current Trends in Quality Assessment*. ISBN 978-953-51-1029-3, Edited by Maria C. Hernandez Soriano, InTech: 249-268.

Scherer, H. W., Metker, D. J. & Welp, G. 2011. Effect of long-term organic amendments on chemical and microbial properties of a luvisol. *Plant Soil Environ.* 57, 513–518.

Schröder J.J. 2005a. Manure as a suitable component of precise nitrogen nutrition. In: *IFS Proceedings N 574*, 32 pp.

Schröder J.J. 2005b. Revisiting the agronomic benefits of manure: a correct assessment and exploitation of its fertilizer value spares the environment. *Biores Technol* 96:253–261.

Schröder, J.J. 2014. The position of mineral nitrogen fertilizer in efficient use of nitrogen and land: a review. *Natural Resources*, 5, 936–948.

Schröder, J. L., Zhang H., Grima K., Raum W.R., Penn C.J., Payton M.E. 2011. Soil acidification from long-term use of nitrogen fertilizers on winter wheat. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 75, 956–961.

- Scotti, R., Bonanomi, G., Sceleza, A., Zoina, A. & Rao, M. A. 2015. Organic amendments as sustainable tool to recovery fertility in intensive agriculture systems. *J. Soil Sc. Pl. Nutr.* 15(2), 333–352.
- Six, J., Bossuyt, H., Degryze, S. & Denef, K. 2004. A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil Till. Res.* 79, 7–31.
- Sollins, P., Homann, P., Caldwell, B.A. 1996. Stabilization and destabilization of soil organic matter: mechanisms and controls. *Geoderma* 74: 65–105.
- Tejada, M., Gonzalez, J. L., Garcia-Martinez, A. M. & Parrado, J. 2008. Application of a green manure and green manure composted with beet vinasse on soil restoration: Effects on soil properties. *Bioresour. Technol.* 99, 4949–4957.
- Terelak H., Stuczyński T., Motowicka-Terelak T., Maliszewska-Kordybach B., Pietruch Cz. 2008. Monitoring chemizmu gleb ornych Polski w latach 2005-2007. Raport. Biblioteka Monitoringu Środowiska, Warszawa.
- Wang Y., Ge T., Kuzyakov Y., Hu N., Wang Z.L., Li Z., Tang Z., Chen Y., Wu C., Lou Y., 2017. Soil aggregation regulates distributions of carbon, microbial community and enzyme activities after 23-year manure amendment. *Appl. Soil Ecol.* 111, 65–72.
- West T.O., Post W.M. 2002. Soil Organic Carbon sequestration rates by tillage and crop rotation: a global data analysis. *Journal of American Soil Science Society*, 66: 1930-1946.
- Whalen, J. K. & Chang, Ch. 2002. Macroaggregate characteristics in cultivated soil after 25 annual manure applications. *Soil Sci. Soc. Am.J.* 66, 1637–1647.
- Wiater J. 2000. Wpływ nawożenia organiczno-mineralnego na bilans węgla organicznego. *Fol. Univ. Agric. Stetin.* 211, *Agricultura* 84, 515-520.
- Van der Meer, H.G., Baan Hofman, T. 1989. Contribution of legumes to yield and nitrogen economy of leys on a biodynamic farm. In: *Legumes in farming systems. Developments in plant and soil sciences 37* (eds P. Plancquaert & R. Hagggar), pp. 25–36. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.
- Xu R.K., Coventry D.R. 2003. Soil pH changes associated with lupin and wheat plant materials incorporated in a red-brown earth soil. *Plant and Soil* 250, 113-119.
- Zhang S., Wand R., Yang X., Sun B. & Li Q. 2016. Soil aggregation and aggregating agents as affected by long term contrasting management of an Anthrosol. *Sci. Rep.* 6, 39107, <https://doi.org/10.1038/srep39107>.

5C. GŁÓWNE KIERUNKI PROWADZONYCH BADAŃ I NAJWAŻNIEJSZE POZOSTAŁE OSIĄGNIĘCIA NAUKOWO-BADAWCZE

• Przed uzyskaniem stopnia doktora (2000-2006)

Tematyka badawcza, którą zajmowałam się w trakcie studiów doktoranckich w Zakładzie Chemii Rolniczej, Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie obejmowała zagadnienia związane z ochroną środowiska glebowego. W tamtym okresie zanieczyszczenie gleb m.in. metalami ciężkimi, wynikające z postępującego rozwoju cywilizacji, było jednym z istotniejszych problemów środowiskowych. Równocześnie dążono do uzyskiwania wysokiej jakości płodów rolnych przeznaczonych do konsumpcji, na cele paszowe i do przetwórstwa. Z drugiej strony nie można było zaprzestać prowadzenia działań zmniejszających zanieczyszczenie gleb w naszych warunkach agro-klimatycznych, gdyż wpłynęłoby to na pobieranie przez rośliny zwiększonych ilości metali ciężkich, a w przypadku gleb -powodowałoby ich degradację. Zaniechanie uprawy roślin na glebach o podwyższonej zawartości metali ciężkich mogło skutkować tym, że gleba stałaby się nieużytkiem i zaczęła stwarzać zagrożenie dla wód podziemnych i cieków wodnych. Dlatego też w Zakładzie Chemii Rolniczej w tamtym okresie podjęto poszukiwania praktycznych rozwiązań gospodarowania na glebach o podwyższonej zawartości metali ciężkich. Gleby takie najczęściej zlokalizowane są przy trasach szybkiego ruchu. Zmniejszenie stopnia zanieczyszczenia gleb metalami ciężkimi można uzyskać poprzez stosowanie prawidłowej agrotechniki oraz zrównoważone nawożenie mineralne, organiczne i wapnowanie gleby. W moich badaniach wykorzystałam doświadczenie mikropoloetkowe na glebach sztucznie zanieczyszczonych tlenkami miedzi, cynku, ołowiu i kadmu. Gleby były zróżnicowane pod względem odczynu, zawartości materii organicznej (poprzez dodatek węgla brunatnego) i składu granulometrycznego (piasek gliniasty mocny i glina lekka pylasta). Jako rośliny testowe uprawiałam rośliny zielone z przeznaczeniem na paszę dla przeżuwaczy: seradellę, żyto ozime i jęczmień. Próbkę gleb do analiz pobierałam z różnych poziomów profilu glebowego. Postawiłam hipotezę badawczą, że na glebach zanieczyszczonych metalami ciężkimi można bezpiecznie uprawiać rośliny paszowe pod warunkiem zwapnowania gleb i wzbogacenia ich w materię organiczną. Hipoteza ta znalazła częściowe potwierdzenie. Wyniki zostały przedstawione w mojej pracy doktorskiej oraz w publikacjach. W ramach tej tematyki zostały wyjaśnione następujące zagadnienia badawcze:

• Odporność uprawianych roślin na skażenie metalami ciężkimi

Ważnym elementem moich badań było określenie tolerancji roślin na obecność metali ciężkich w glebie (**II.B1, V.B2**). Reakcja wszystkich roślin paszowych na nadmiar metali ciężkich była podobna - reagowały one obniżeniem plonów, proporcjonalnie do poziomu zanieczyszczenia. Średnie wartości wskaźnika tolerancji (określającego stopień zahamowania wzrostu roślin w warunkach ich uprawy na glebie zanieczyszczonej metalami ciężkimi) były wyższe na glebie średniej niż na glebie lekkiej. Oznacza to, że w warunkach uprawy na glebach zanieczyszczonych metalami ciężkimi, zahamowanie wzrostu roślin jest większe na glebie lekkiej niż na średniej. Wartość tego wskaźnika zależała również od gatunku rośliny. Spośród badanych roślin najbardziej wrażliwa na zanieczyszczenie okazała się seradela zbierana na zielonkę, z najniższą wartością wskaźnika tolerancji. Natomiast wyższą wartością wskaźnika tolerancji charakteryzowały się żyto na zielonkę i jęczmień w uprawie na ziarno. Wzrost pH gleby z 4 do 6 i wzrost zawartości węgla organicznego z 6 do 12 g·kg⁻¹ zwiększały wartość wskaźnika tolerancji. Stwierdziłam przydatność indeksu tolerancji roślin do oceny ich wrażliwości na zanieczyszczenie gleby metalami ciężkimi. Wrażliwość roślin na przekraczanie dopuszczalnego poziomu metali ciężkich w glebach była mniejsza w przypadku uprawy na glebach o większej zawartości frakcji poniżej 0,02 mm w porównaniu z lekkimi glebami o małej pojemności kompleksu sorpcyjnego. Tolerancja roślin na metale ciężkie w glebie jest negatywnie skorelowana z poziomem zanieczyszczenia gleby metalami ciężkimi i jej zakwaszeniem. Wykazałam, że wartości wskaźnika tolerancji były zróżnicowane dla badanych metali ciężkich i zależały zarówno od gatunku rośliny, jak i od właściwości gleby.

Zgromadzone wyniki badań pozwoliły mi również na wyznaczenie wskaźnika bioakumulacji metali ciężkich. Wskaźnik bioakumulacji jest to stosunek zawartości metalu w roślinie do jego zawartości w glebie. Wykazałam że wartości współczynnika bioakumulacji zależą głównie od gatunku rośliny, ale również od właściwości gleby (**II.B2**). W przeprowadzonych badaniach potwierdziłam, że kadm charakteryzuje się wyższą wartością współczynnika bioakumulacji w porównaniu do ołowiu. Natomiast w odniesieniu do roślin najwyższą wartość tego wskaźnika stwierdziłam dla zielonki seradeli, a najniższą dla ziarna jęczmienia. Pobieranie kadmu przez rośliny w warunkach zanieczyszczenia gleb metalami ciężkimi jest intensywniejsze niż pobieranie ołowiu, co należy łączyć z odmienną ruchliwością w glebie i innymi właściwościami chemicznymi obu pierwiastków. Jednym ze sposobów ograniczania przyswajalności metali ciężkich z gleby jest zwiększanie w niej zawartości materii organicznej (**V.B3**). W badaniach wykazałam, że wartość współczynnika

bioakumulacji zależała także od zawartości Corg. w glebie. Na glebach o wyższej jego zawartości uzyskałam niższe wartości współczynników bioakumulacji Pb i Cd. Wartości współczynnika bioakumulacji Cd i Pb wskazują, że akumulacja metali ciężkich w roślinach może być większa niż ich zawartość w glebie oraz zależy od rodzaju metalu. Przyrost zawartości kadmu w glebie o jednostkę może powodować wzrost jego zawartości w słomie jęczmienia nawet o 1,2 jednostki. Literatura przedmiotu wskazuje, że stosunek zawartości Cd w roślinie do jego zawartości w glebie mieści się w granicach od 1 do 10. Natomiast wartość wskaźnika bioakumulacji Pb nie przekracza wartości 0,1 (**II.B2**). W warunkach symulowanego zanieczyszczenia gleby metalami ciężkimi biomasa roślin paszowych zawierała więcej Cd i Pb w obiektach z najniższą zawartością Corg. w glebie. Zawartość Cd i Pb w roślinach zależała od gatunku rośliny oraz od rodzaju metalu. Najwięcej Cd gromadziła zielonka seradeli, a najmniej ziarno jęczmienia (**V.B3**). Kadm charakteryzował się wyższą wartością współczynnika bioakumulacji w porównaniu do ołowiu. Jednym ze sposobów zmniejszenia biodostępności metali ciężkich dla roślin jest regulacja odczynu gleby (**V.B1**). Jak wiadomo spadek pH gleby prowadzi do wzrostu przyswajalności metali ciężkich. Zawartość metali ciężkich w roślinach paszowych zależała od rodzaju gleby i gatunku rośliny. Dla wszystkich badanych roślin najmniejszy wpływ wzrostu odczynu na zmniejszenie akumulacji otrzymano dla miedzi, następnie dla cynku, zarówno na glebie lekkiej, jak i średniej. Obniżenie zawartości metali ciężkich w glebie, pod wpływem wzrostu pH było większe na glebie lekkiej niż na glebie średniej, a spadek akumulacji metali ciężkich był zróżnicowany w zależności od rodzaju metalu. Dla większości roślin wzrost odczynu najbardziej ograniczał przyswajalność kadmu, jedynie w przypadku seradeli na glebie lekkiej wzrost odczynu bardziej zmniejszał zawartość ołowiu. Na podstawie średniej wartości współczynnika bioakumulacji można stwierdzić, że rośliny w warunkach zanieczyszczenia gleb metalami ciężkimi łatwiej kumulują Zn i Cd (wysoka wartość bioakumulacji), a w mniejszym stopniu Pb i Cu (niższa wartość wskaźnika). W badaniach wykazałam, że najwyższe wskaźniki bioakumulacji Zn, Cd i Pb ma seradela, a Cu żyto. Wraz ze wzrostem odczynu gleby średnia wartość wskaźnika bioakumulacji malała.

Ponadto badane metale ciężkie różniły się wskaźnikami stopnia skażenia roślin i pod tym względem uszeregowałam je w następujący sposób: Cd>Pb>Zn>Cu. Potwierdziłam, że wartość tego wskaźnika zależała również od gatunku badanych roślin. Najważniejsze wyniki prezentowane z tej pracy pozwoliły mi na wyciągnięcie następujących wniosków:

Wzrost w odczynu gleby w przedziale od 4 do 6 powodował obniżenie zawartości metali ciężkich w roślinach paszowych, na glebie lekkiej i średniej. Przy czym najbardziej

ograniczał mobilność Cd. Wskaźnik stopnia skażenia roślin potwierdza, że w roślinach najbardziej wzrasta zawartość Cd, a najmniej Cu. Przekroczenie dopuszczalnych norm zawartości Cd i Zn w paszach stwierdzono w seradeli, zielone żyta i słomie jęczmienia. Jedynie ziarno jęczmienia może być bez zastrzeżeń przeznaczone na paszę. Istotnych informacji o odporności roślin uprawnych na zanieczyszczenie gleby jest wskaźnik tolerancji **(II.B1)**. Zgodnie z obowiązującym w okresie prowadzenia badań Rozporządzeniem Ministra Rolnictwa i Rozwoju Wsi z dnia 28 czerwca 2004 r. w sprawie dopuszczalnych zawartości substancji niepożądanych w paszach zawartość Cd w paszach nie powinna przekraczać $1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, a Pb-10 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ s.m. wysoka zawartość Cd w zielone żyta i zielonce seradeli według powyższych kryteriów, szczególnie na glebie lekkiej dyskwalifikowała te rośliny pod względem przydatności na paszę. Natomiast ziarno jęczmienia mogło być bez zastrzeżeń przeznaczone na paszę. Uzyskane przeze mnie wyniki badań potwierdziły predyspozycje gatunkowe roślin do akumulacji metali ciężkich.

• Mobilność metali ciężkich w profilu glebowym

Metale ciężkie po dostaniu się do gleby ulegają różnym przemianom w zależności od jej właściwości fizycznych i chemicznych. Na rozpuszczalność metali ciężkich w rozworze glebowym z jednej, i akumulację w glebie z drugiej strony mają największy wpływ takie właściwości gleby, jak: odczyn, skład granulometryczny, pojemność kompleksu sorpcyjnego, zawartość i rodzaj materii organicznej. Po 4 latach od zastosowania zróżnicowanych dawek metali ciężkich dodanych do gleby lekkiej, zawierającej 17% części sflawialnych, stwierdzono stosunkowo duże przemieszczanie badanych pierwiastków w profilu glebowym **(V.A2)**. Ilość wymywanych metali zależała od dawki danego pierwiastka W miarę wzrostu dawki powiększała się ilość pierwiastka przemieszczonego w głąb profilu glebowego. Największe zawartości metali ciężkich wykrywano w poziomie próchnicznym i w warstwie Eet gleby, ale ich znaczące ilości, zwłaszcza przy dużych skażeniach, stwierdzono również w poziomie Bt na głębokości poniżej 50 cm. Przy zastosowaniu najwyższej dawki metali ciężkich ich zawartość w tym poziomie gleby była siedmiokrotnie większa, niż w glebach nie skażonych. Dodatek węgla brunatnego powodował zwiększenia pojemności sorpcyjnej gleby, zwiększenia wartości pH i ograniczał mobilność dodanych do gleby metali ciężkich. Wzrost zawartości węgla organicznego najbardziej ograniczał wymywanie ołowiu, a najmniej kadmu.

Po uzyskaniu stopnia doktora nauk rolniczych (od roku 2006 do chwili obecnej)

Poza tematyką przedstawioną w głównym osiągnięciu badawczym w moim obszarze badań naukowych, w tym metodycznych, wydzieliłam następujące kierunki:

1. Osiągnięcia metodyczne

Od ponad 12 lat kieruję wieloletnim doświadczeniem polowym, założonym w połowie lat siedemdziesiątych, które należy, zaraz po słynnych doświadczeniach w Skierniewicach do najdłużej prowadzonych w Polsce i obok pełnienia funkcji eksperymentu polowego stanowi część dorobku kulturowego polskiej nauki. W oparciu o to doświadczenie gromadziłam archiwalne wyniki analiz oraz przeprowadziłam własne badania, które pozwoliły mi stworzyć ogromną bazę danych, którą wykorzystałam do publikacji w czasopiśmie z listy JCR, publikacji naukowych spoza tej listy, publikacji popularno- naukowych, szkoleń, wykładów i prezentacji plakatowych w kraju i zagranicą. Oprócz stałego nadzorowania, doświadczenie wymaga ciągłych, przemyślanych modyfikacji, nienaruszających jednak ustalonego schematu polowego.

W 2007 roku do zmianowania wprowadziłam kukurydzę na ziarno w obu zmianowaniach, zamiast ziemniaka, którego uprawa ma już obecnie mniejsze znaczenie. Natomiast kukurydza na ziarno stała się jedną z dominujących upraw w Polsce. Ważne jest zatem badanie wpływu uprawy jej na glebę i możliwości plonowania kukurydzy w następstwie roślin zbożowych, na glebie lekkiej, zakwaszonej, a więc reprezentującej gleby przeważające w Polsce. Ponadto jak wynika z danych przedstawionych w pracy (4B.4) konieczna jest już eliminacja czynników ograniczających produktywność roślin i żyzność gleby – znacznego obniżenia odczynu gleby oraz wyczerpania wapnia i magnezu - poprzez wapnowanie i modyfikację nawożenia tymi składnikami. W ramach tego doświadczenia prowadzę badania nad ilością biomasy korzeni pozostawionych w glebie po zbiorach roślin, oznaczam w nich zawartość Corg. i N. Wyniki te zostaną wykorzystane do wyznaczenia aktualnych współczynników reprodukcji i degradacji glebowej materii organicznej w ramach tematu statutowego, którego jestem głównym wykonawcą.

Do weryfikacji hipotez dotyczących nagromadzenia i przemian materii organicznej w glebie konieczne było opanowanie nowych metodyk oznaczania składu granulometrycznego gleby, całkowitej form węgla i frakcji węgla, azotu oraz fizykochemicznych metod frakcjonowania próchnicy. W 2012 r., po stażu naukowym w Nitrze (Słowacja) wdrożyłam w Zakładzie Żywienia Roślin i Nawożenia IUNG metodę badania jakości materii organicznej, z wykorzystaniem chemicznego frakcjonowania wg. metody Schnitzera. W tym celu została

zakupiona nowoczesna aparatura (wirówki Magafuge 40 i analizator TOC/TN Multi 3100) i stworzone laboratorium badania jakości próchnicy. Dzięki temu stało się możliwe prowadzenie badań nad jakością materii organicznej oraz scharakteryzowanie zmian udziału poszczególnych frakcji glebowej materii organicznej w stosunku do całkowitej puli Corg. w glebie. Ponadto możliwe było wyznaczenie ważnego wskaźnika żyzności gleby i jakości materii organicznej – indeksu humifikacji wyliczanego ze stosunku węgla kwasów huminowych do węgla kwasów fulowych ($C_{KH}:C_{KF}$). Metodę tę przetestowałam w badaniach nad wpływem różnych technologii uprawy roślin, systemów gospodarowania, zmianowań i preparatów mikrobiologicznych na skład frakcyjny materii organicznej. W oparciu o przeprowadzone badania potwierdziłam wpływ różnych technologii uprawy, nawożenia, stosowanych preparatów z mikroorganizmami pożytecznymi na zmiany w składzie frakcyjnym próchnicy oraz oceniłam jej jakość. Metoda została wykorzystana w pięciu zakończonych tematach statutowych (**XIX.B3, XIX.B5, XIX.B6, XIX.B7, XIX.B9**).

Jakość materii organicznej jest obecnie badana w temacie statutowym (**XIX.B11**) i projekcie (**XVII.B1**), w których jestem wykonawcą. Wyniki obecnie prowadzonych badań pozwolą w przyszłości opracować najlepsze rozwiązania agrotechniczne prowadzące do utrzymania optymalnej żyzności gleby, a nawet w perspektywie wyznaczyć klasy jakości próchnicy dla różnych gatunków gleb.

Poza działalnością naukową, laboratorium badania jakości materii organicznej doskonale wpisuje się w obecne zapotrzebowanie rynku na badania substancji humusowych. Aktualnie w laboratorium frakcjonowania materii organicznej wykonywane są analizy preparatów zawierających substancje humusowe. **Stworzenie nowego zaplecza badawczego, które jest wykorzystywane nie tylko na potrzeby naukowe, ale i dla praktyki rolniczej, jest znacznym osiągnięciem naukowym i ważnym moim wkładem w rozwój i unowocześnienie działalności badawczej IUNG-PIB.**

Ocena żyzności gleby jest skomplikowana i wymaga wielu analiz, które są kosztowne i czasochłonne. W literaturze pojawiły się doniesienia o próbach bezpośredniego pomiaru jakości i żyzności gleby przy użyciu spektroskopii VIS-NIR. Spektroskopia w paśmie widzialnym i w bliskiej podczerwieni (VIS-NIR) jest narzędziem, które umożliwia analizę wielu składników chemicznych i fizycznych gleby, w tym samym czasie. Jest ona tania, nieskomplikowana i nie wymaga stosowania dużych ilości odczynników chemicznych, z wyjątkiem próbek kalibracyjnych. Co więcej, VIS-NIR jest praktycznym narzędziem rolnictwa precyzyjnego, które może wspomagać decyzje nawozowe prowadzące do zwiększenia dostępności składników odżywczych dla roślin. W ramach tematu statutowego,

którego byłam kierownikiem, postanowiłam przetestować wraz z zespołem gleboznawców celowość zastosowania metody spektroskopii do charakterystyki przestrzennej zmienności właściwości gleb na obszarze doświadczenia statycznego w Grabowie. Przeprowadzone analizy zawartości Corg. potwierdziły, że spektroskopia w zakresie VIS-NIR może być wykorzystywana do przewidywania wielu właściwości związanych z żyznością gleby, m.in. zawartości węgla organicznego (**II.B4; IV.B5**). W skali gospodarstwa metoda VIS-NIR daje wyniki porównywalne do uzyskanych metodami klasycznymi. W skali regionalnej lub większej metoda ta nie jest tak precyzyjna, jak metody laboratoryjne. Jednak biorąc pod uwagę fakt, że koszty jej zastosowania są do nawet 90% niższe, a czas analizy może być również zmniejszony kilkukrotnie, można ją stosować na większą skalę, gdyż jest ona prawdopodobnie najlepszą alternatywą dla klasycznych metod mapowania tych właściwości i konieczności pobierania setek lub tysięcy próbek. Metoda VIS-NIR jest techniką szybką, dokładną i bardziej ekonomiczną niż konwencjonalne metody analizy gleb, niewymagającą dużych ilości materiału glebowego, ponadto jest niedestrukcyjna i w połączeniu z wielowymiarową kalibracją widma glebowego może być wykorzystana do szacowania zawartości węgla organicznego (**4B.11**). Wysoka czułość w stosunku do organicznych i nieorganicznych składników gleby - czyni z niej potencjalnie bardzo przydatne narzędzie do oceny i monitorowania właściwości gleby oraz jej jakości i funkcjonalności.

2. Aktualne trendy w ochronie materii organicznej i ograniczaniu rozpraszania azotu do środowiska

• Uściślenie współczynników reprodukcji i degradacji materii organicznej w glebie

Ocena zasobności naszych gleb w próchnicę jest istotna nie tylko z punktu widzenia potencjału produkcyjnego, ale i skutków środowiskowych. Obecnie najważniejszym i aktualnym zagadnieniem zwrócenie szczególnej uwagi na poszerzenie zakresu badań materii organicznej w celu opracowaniu normatywów, które mogą okazać się konieczne przy opracowywaniu programów zapobiegających zmniejszaniu się zawartości materii organicznej w glebach, w świetle rosnącego areału upraw roślin w monokulturach i zmniejszenia stosowania nawozów naturalnych w rolnictwie (**V.B12**). We wstępnych badaniach przeprowadzonych w wybranych regionach Polski na profilach wzorcowych, stwierdzono znaczne ubytki glebowej materii organicznej w okresie ostatnich 30 lat. Ponadto występuje znaczny brak spójności pomiędzy wynikami analiz dokonywanymi różnymi metodami analitycznymi – badania porównawcze w profilach wzorcowych, modele zmian zawartości węgla w glebie, bilans węgla na podstawie współczynników reprodukcji/degradacji. Jedną z

przyczyn wspomnianego zróżnicowania wyników ocen może być brak zaktualizowanych i zaadaptowanych do krajowych warunków współczynników bilansowania materii organicznej w glebie dla poszczególnych upraw, systemów produkcji i uprawy, typów zmianowania. Z uwagi na często zmienne wyniki doświadczeń polowych nad bilansem glebowej materii organicznej (z powodu dużego wpływu czynników klimatycznych i pogodowych, glebowych i poziomu ochrony roślin) oraz wysoki koszt doświadczeń wieloletnich poszczególne kraje niezwykle rzadko decydują się na określenie lub weryfikację współczynników akumulacji glebowej materii organicznej. W Niemczech współczynniki reprodukcji i degradacji opracowane w latach 80. XX w. zostały zaktualizowane w 2004 r. z inicjatywy VDLUFA (Niemieckie Stowarzyszenie Instytutów Rolniczych). W Polsce prowadzono i prowadzi się szereg badań nad dynamiką przemian i jakością materii organicznej, ale w większości mają one charakter analityczny (opisowy) i nie znalazły podsumowania w postaci normatywów (IV.B1). W Polsce saldo próchnicy określane jest w oparciu o nie aktualne niemieckie wartości współczynników reprodukcji i degradacji materii organicznej z lat osiemdziesiątych ubiegłego wieku. Wadą ich jest również to, że koncepcja współczynników odnosi się do 1 ha uprawy danej rośliny bez względu na wielkość plonu i ilość wprowadzanych do gleby resztek poźniwnych i nie uwzględnia puli węgla organicznego wnoszonego do gleby z masą korzeniową roślin uprawnych.

Dodatkowo, analizy doświadczeń wieloletnich w projektach unijnych (CATCH-C) uzasadniają konieczność ustalenia wiarygodnych, doświadczalnie potwierdzonych współczynników bilansowania węgla w glebie, wskazując na znaczne różnice w gospodarce materią organiczną gleby w zależności od systemu uprawy roli lub nawożenia organicznego, oraz niejednoznaczne rezultaty porównań różnych zmianowań. Dla przykładu, zmianowania roślin zawierające rośliny bobowate sprzyjały gromadzeniu węgla w glebie, jednak wykazanie istotnych statystycznie różnic w porównaniu do monokultury czy rotacji ze zbożami nie było możliwe. Wskaźniki te byłyby niezwykle przydatne w modelowaniu wieloletniego wpływu różnych systemów produkcji rolniczej i sposobów uprawy na gospodarkę glebową materią organiczną oraz w ocenie efektów stosowania instrumentów polityki rolnej wspomagających ochronę gleb.

Konieczne jest również zwrócenie uwagi na szersze postrzeganie żyzności gleby w aspekcie środowiskowym, szczególnie na to by zwiększanie zawartości w niej próchnicy poprzez różne zabiegi agrotechniczne nie pogarszało jakości wód, jakości pasz i żywności.

Azot wprowadzony do gleby nie ulega w niej nagromadzeniu, ale bezpośrednio lub pośrednio rozprasza się w środowisku. Współczesne sposoby mechanicznej uprawy gleby

sprzyjają mineralizacji glebowej materii organicznej i związanego z nią azotu. Z drugiej strony stwierdza się, że w ostatnich latach zawartość węgla zwiększyła się o kilkanaście t na hektar w wyniku pogłębienia warstwy ornej do 35 cm i towarzyszyło temu także nagromadzenie azotu (Nieder i Richter 2000). W polskich gospodarstwach ukierunkowanych wyłącznie na produkcję zwierzęcą stwierdza się natomiast zwiększenie ilości azotu rozpraszanego do środowiska. Dlatego też dąży się do nawożenia zrównoważonego, które jako uzupełnienie nawożenia mineralnego uwzględniałoby wszystkie źródła azotu – z pochodzących z nawozów naturalnych i organicznych oraz azotu biologicznie związanego przez rośliny bobowate.

Powyższe przesłanki skłoniły mnie do uściślenia współczynników reprodukcji i degradacji glebowej materii organicznej oraz oszacowania ilości azotu biologicznie związanego. Celem badań prowadzonych w latach 2008 - 2011 było uściślenie współczynników reprodukcji i degradacji glebowej materii organicznej (WRD), oficjalnie przyjętych w Polsce, a zapożyczonych z Niemiec. Współczynnik reprodukcji (+)/degradacji(-) jest to ilość materii organicznej w glebie pozostającej po uprawie określonej rośliny lub zastosowaniu określonej dawki nawozu organicznego. Badania prowadzono w oparciu o opisane we wstępie doświadczenie. Wyniki przedstawiono w pracach **(IV.B7, XV.B1)**. Zawartość materii organicznej w glebie oznaczano w odstępach 4 letnich zawsze po zbiorze pszenicy jako ostatniej rośliny w 4-polowym członie zmianowania. Była to jednocześnie roślina przychodząca w czwartym roku od zastosowania obornika. Z tych względów zweryfikowanie współczynników akumulacji węgla dla nawożenia organicznego możliwe było tylko dla całego 4-letniego zmianowania. Jak należało przypuszczać, obiekty nawożone obornikiem charakteryzowały się wyższą zawartością węgla organicznego niż gleby referencyjne nie nawożone tym nawozem, jednak różnice te nawet przy praktykach wieloletnich nie były większe niż 20% zawartości referencyjnej.

Średnio z ogólnej ilości węgla wniesionego w oborniku w glebie pod zmianowaniem A (bez rośliny bobowatej i poplonu) ulegało humifikacji 12,1%, a w glebie pod zmianowaniem B (z rośliną bobowatą i poplonem) - 31,4%. Wielkość współczynników humifikacji była uzależniona od wielkości dawek obornika i od długości okresu regularnego (co 4 lata) stosowania tego nawozu. Bardzo wyraźnie zaznaczył się wpływ rodzaju zmianowania na przyrost zawartości materii organicznej w glebie i był on większy od wpływu obornika. W zmianowaniu B już dawka 20 t·ha⁻¹ w czteroletniej rotacji zapewniała lekko tylko ujemny lub zrównoważony bilans materii organicznej w glebie. Natomiast w zmianowaniu A postępował ubytek materii organicznej w glebie niezależnie od wielkości

dawek obornika. Wyliczone przeze mnie wartości współczynników reprodukcji i degradacji materii organicznej (WRD) dla obornika różniły się od niemieckich wartości współczynników, stosowanych w praktyce rolniczej. Nawet w zmianowaniu B osiągały zaledwie 50% wartości współczynników niemieckich (IV.B7).

Obecnie badania te są kontynuowane w temacie statutowym, w którym jestem wykonawcą. Głównym celem badań jest opracowanie współczynników bilansu węgla organicznego w glebie w zależności od sposobu uprawy roli oraz zmianowania roślin dla różnych warunków glebowych. Współczynniki są wyznaczane w oparciu o bazę danych doświadczeń wieloletnich IUNG-PIB. Współczynniki te będą służyć ocenie zrównoważenia poszczególnych kombinacji praktyk rolniczych (zmianowania i agrotechniki) oraz prognozowaniu skutków stosowania instrumentów polityki rolnej dla zachowania zasobów węgla organicznego w glebie. Wiarygodne i uszczegółowione współczynniki bilansowania materii organicznych będą niezwykle przydatnym narzędziem do oceny zrównoważenia produkcji rolniczej oraz skuteczności instrumentów Wspólnej Polityki Rolnej. W krótkiej perspektywie czasowej trudno jest ocenić zmiany poziomu węgla w glebie na podstawie pomiarów bezpośrednich – efekt poszczególnych metod produkcji roślinnej może być mierzalny dopiero po wielu latach.

- **Oszacowanie ilości azotu związanego biologicznie przez koniczynę uprawianą w mieszance z trawami**

Najbardziej powszechną praktyką w rolnictwie jest uprawa bobowatych w mieszankach z trawami lub mieszanek bobowatych ze zbożami. Określenie ilości azotu związanego biologicznie przez rośliny bobowate w warunkach polowych jest zadaniem trudnym. Precyzyjnie tę ilość można oszacować jedynie przy wykorzystaniu metod izotopowych (V.B4). Dlatego od lat poszukuje się najlepszych pośrednich metod wyceny tego składnika. Najczęściej wykorzystuje się współczynniki symbiotycznego wiązania azotu z lat 90. XX w. lub korzysta z założenia, że 1% udział koniczyny z trawami w runi łąkowej równoważy od 2 do 3 kg azotu azotanowego. Wykorzystanie metod izotopowych w warunkach polowych jest rzadko stosowane w badaniach rolniczych, z uwagi na wysokie koszty. Dzięki układowi eksperymentu w Grabowie, w pracy wykorzystałam sposób szacowania ilości azotu związanego biologicznie przez roślinę bobowatą - oparty na różnicy bilansowej wynikającej z porównania ilości składnika pobranego przez mieszanek koniczyny z trawami i uprawianą równorzędnie roślinę testową – kukurydzę przeznaczoną na zielonkę

(II.B3). Różnica w ilości pobrania azotu przez kukurydzę uprawianą na zielonkę i mieszkankę koniczyny z trawami odpowiada ilości azotu związanego biologicznie. Do oszacowania ilości azotu związanego biologicznie przez koniczynę uprawianą w mieszance z trawami wykorzystałam wyniki z trzech czteroletnich rotacji zmianowania A i B w latach badań (1992-1996; 1997-2000; 2001-2004). Obie rośliny korzystały z działania następczego takich samych dawek azotu w oborniku i porównywano je w obiektach z niemal jednakową dawką nawozów mineralnych $120 \text{ kg N}\cdot\text{ha}^{-1}$ pod koniczynę z trawą i $135 \text{ kg N}\cdot\text{ha}^{-1}$ pod kukurydzę na zielonkę. Dużym walorem takiego podejścia jest łączenie wnoszenia azotu związanego biologicznie z plonem roślin bobowatych. W obiekcie bez nawożenia azotem mineralnym różnica pobrania wynosiła $180 \text{ kg N}\cdot\text{ha}^{-1}$, w obiekcie z dawką $135 \text{ kg N}\cdot\text{ha}^{-1}$ malała do $139 \text{ kg N}\cdot\text{ha}^{-1}$. Średnio koniczyna uprawiana w mieszance z trawami związała $155 \text{ kg N}\cdot\text{ha}^{-1}$. Wyniki 24 - letnich badań dotyczące szacowania azotu biologicznie związanego przez mieszkankę koniczyny zamieszczone w pracy **(4B.2)** wskazują, że z wyjątkiem cyklu VIII, ilość ta wahała się od 150 do $400 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$. Została obliczona w oparciu o różnicę pobrania azotu ze wszystkich źródeł, z nieco wyższymi wartościami przy braku nawozu N lub obornika. Biorąc pod uwagę te fakt, że 100 kg azotu związanego przez roślinę bobowatą jest ekwiwalentem 200 kg N zastosowanego w formie nawozu mineralnego, można zaoszczędzić od 300 do nawet 800 kg azotu w nawozach mineralnych. W przypadku moich wyliczeń oszczędności mogą być jeszcze większe i można sugerować całkowite zrezygnowanie z nawożenia azotem mineralnym.

Otrzymane przeze mnie wyniki wydają się bardziej miarodajne od uzyskanych przy użyciu tzw. współczynnika symbiotycznego wiązania azotu Köpkego dla mieszanek koniczyny z trawą wykorzystywanego w warunkach doświadczeń polowych, gdyż odnoszą się bezpośrednio do pobrania składnika z plonami roślin. Oszacowane w badaniach własnych ilości azotu związanego przez koniczynę uprawianą w mieszance z trawami były niemal dwukrotnie wyższe niż ilość wyznaczona za pomocą tego współczynnika. Wartości te wskazują na duże potencjalnie oszczędności stosowania nawozów azotowych mineralnych.

3. Wpływ wybranych czynników agrotechnicznych, technologii, preparatów z pożytecznymi mikroorganizmami na ilość i jakość glebowej materii organicznej

Badania wpływu wybranych czynników agrotechnicznych, technologii, preparatów z pożytecznymi mikroorganizmami na ilość i jakość glebowej materii organicznej realizowałam

w ramach działalności statutowej w latach 2012 - 2016. W oparciu o przeprowadzone badania potwierdziłam wpływ różnych technologii uprawy gleby, systemu produkcji: (ekologiczny, integrowany i konwencjonalny) oraz następstwa roślin: (płodozmian klasyczny i monokultura) i rodzaju nawożenia; na zmiany w składzie frakcyjnym glebowej materii organicznej oraz oszacowałam jej jakość. Zakres badań obejmował: udział zbóż w strukturze zasiewów (50%, 75%, 100%), sposób uprawy roli (orkowy, bezorkowy), technologie produkcji (integrowana, intensywna), odmianę. Badania obejmowały pszenicę ozimą i jary oraz jęczmień jary (**XV.B10**). W kolejnym temacie statutowym oceniałam ilość i jakość glebowej materii organicznej w zależności od systemu produkcji (ekologiczny, konwencjonalny i monokultura) oraz nawożenia obornikiem (**XV.B7**). W tym celu został wykorzystany obiekt badawczy o powierzchni około 16 ha, w którym porównuje się różne systemy gospodarowania: ekologiczny (5-polowy płodozmian: ziemniak - pszenica jara + wsiewka - koniczyna czerwona z trawą (I rok) - koniczyna czerwona z trawą (II rok) - pszenica ozima + poplon), integrowany oraz konwencjonalny w dwóch wariantach: uproszczone zmianowanie i monokultura pszenicy ozimej. W systemie ekologicznym; potrzeby pokarmowe roślin w stosunku do azotu były zaspokajane poprzez biologiczne wiązanie tego składnika przez rośliny bobowate, a także stosowany raz w rotacji obornik w dawce 30 t ha^{-1} . System konwencjonalny obejmował dwa warianty: A - 3 polowy płodozmian (rzepak - pszenica ozima - pszenica jara). W systemie tym były realizowane intensywne technologie produkcji. Nawożenie azotem stosowane było w oparciu o dawki ustalane pod kątem maksymalizacji plonów; B – monokultura pszenicy ozimej.

Z badań tych mogłam wyciągnąć następujące wnioski:

1. **Na długoterminowe utrzymanie zawartości materii organicznej w glebie i jej stabilizację miał wpływ przede wszystkim udział zbóż w strukturze zasiewów, w mniejszym stopniu rodzaj technologii produkcji i system uprawy gleby.** Najwyższą zawartość Corg. stwierdziłam w glebie pod zmianowaniem z 75% udziałem zbóż w strukturze zasiewów. Głównym czynnikiem wpływającym na wartość indeksu humifikacji – $C_{KH}:C_{KF}$ była technologia uprawy i sposób uprawy gleby. Niższe wartości tego indeksu otrzymano w integrowanej technologii produkcji – 1,13. W technologii intensywnej wartość stosunku $C_{KH}:C_{KF}$ była wyższa – 1,26. W glebie zwiększał się udział frakcji węgla kwasów huminowych C_{KH} , a malał udział frakcji węgla kwasów fulwowych C_{KF} , a tym samym poszerzał się stosunek $C_{KH}:C_{KF}$, co świadczy o lepszej jakości próchnicy. Na poprawę tego stosunku w porównaniu do technologii integrowanej wpłynęło wprowadzenie uproszczonej uprawy gleby (system bezorkowy) i stosowanie intensywnej technologii produkcji.

2. **Najlepszą jakością próchnicy (szeroki stosunek $C_{KH}:C_{KF}$) charakteryzowały się gleby w ekologicznym systemie produkcji.** Wprowadzenie systemu uproszczonego, a szczególnie monokultury pszenicy powodowało znaczne pogorszenie jakości próchnicy o czym świadczy znacznie niższy (<1) stosunek węgla kwasów huminowych do węgla kwasów fulwowych.

Ważnym tematem badawczym, który wymagał naukowego wyjaśnienia była ocena wykorzystania preparatów mikrobiologicznych do poprawy jakości glebowej materii organicznej (**XV.B6**). W praktyce rolniczej od kilku lat zaczęły być dość szeroko stosowane preparaty zawierające tzw. „efektywne” lub „pożyteczne” mikroorganizmy, w skrócie EM. Preparaty EM są mieszkankami bakterii samożywnych, bakterii kwasu mlekowego, promieniowców, drożdży, grzybów, często uzupełniane makro- i mikroelementami. Praktyka, a ściślej komercja, wyprzedziły jednak obiektywne badania naukowe. Do badań wybrano trzy najbardziej rozpowszechnione w praktyce rolniczej preparaty z mikroorganizmami pożytecznymi: EM – Efektywne Mikroorganizmy, EmFarma Plus i UGmax- Użyźniacz glebowy. Badania ilości i jakości materii organicznej przeprowadzono w warunkach eksperymentów polowych, w latach 2012 - 2014. W prowadzonych badaniach zastosowano 3 czynniki badawcze. Pierwszym czynnikiem były 3 badane preparaty, drugim 3 sposoby ich stosowania, a trzecim 3 poziomy nawożenia azotem mineralnym. Drugim czynnikiem badawczym były 3 sposoby stosowania: (na ściernisko, na ściernisko+ słoma oraz na ściernisko+ słoma + 30 kg N). Nie stwierdzono jednoznacznego wpływu preparatów, sposobów ich stosowania oraz nawożenia N na zawartości Corg. w glebie oraz skład frakcyjny materii organicznej. W drugim roku badań obserwowano lekki wzrost procentowego udziału frakcji kwasów huminowych pod wpływem stosowania preparatów mikrobiologicznych aplikowanych bezpośrednio na ściernisko oraz na ściernisko ze słomą i azotem mineralnym. Pod wpływem stosowania preparatów mikrobiologicznych ulegał zmianie stosunek zawartości węgla kwasów huminowych do węgla kwasów fulwowych, ale nie wykazano istotnej statystycznie zmiany jakości materii organicznej, mierzonej $C_{KH}:C_{KF}$. Nie stwierdzono również istotnego wpływu sposobów aplikacji preparatów oraz poziomu nawożenia azotem mineralnym na zmianę zawartości Corg.

Badania wpływu preparatów mikrobiologicznych na ilość i jakość materii organicznej wymagają kontynuacji, gdyż trzyletni okres jest za krótki, by wyciągnąć jednoznaczne wnioski, zwłaszcza w warunkach zmiennego przebiegu pogody. **Uważam, że w warunkach polowych trudno jest uzyskać ich pozytywny wpływ na akumulację materii organicznej, ze względu na skomplikowane interakcje między organizmami glebowymi. Dostarczenie do gleby źródła węgla, jakim jest melasa (nośnik tych preparatów) może powodować**

wzrost liczebności autochtonicznych drobnoustrojów i ich aktywności enzymatycznej. Zakładam więc, że w wyniku długotrwałego stosowania preparatów mikrobiologicznych ulegać będzie obniżaniu zawartość Corg. w glebie, będzie wzrastać procentowy udział frakcji kwasów fulowych w puli całkowitej Corg., gdyż mikroorganizmy po wprowadzeniu do gleby stymulują rozkład masy organicznej (proces mineralizacji).

6. DZIAŁANIA NA RZECZ POLITYKI ROLNEJ, PRAKTYKI ROLNICZEJ I POPULARYZUJĄCE NAUKĘ

Poza badaniami naukowymi, ważnym moim osiągnięciem przydatnym dla praktyki rolniczej, było opracowanie w 2014 r. zasad bezpiecznego nawożenia nawozami mineralnymi i naturalnymi zawierającymi azot oraz fosfor, przygotowane w ramach zadania Programu Wieloletniego IUNG-PIB pt. „Wspieranie działań w zakresie kształtowania środowiska rolniczego i zrównoważonego rozwoju produkcji rolniczej w Polsce”. Aby sprostać rosnącemu zapotrzebowaniu na żywność, wielu producentów realizuje intensywny model produkcji, w którym wytworzenie plonów opiera się na wysokich dawkach azotu i fosforu wnoszonych z nawozami mineralnymi i naturalnymi. W przypadku niewłaściwego stosowania (nieodpowiednie terminy zabiegów, niebilansowane dawki) nawozy te mogą znacząco negatywnie oddziaływać na stan środowiska naturalnego. Zrównoważony rozwój rolnictwa to ambitny cel, którego realizacji podjęło się większość krajów europejskich, w tym Polska. Powyższe przesłanki stanowiły podstawę do przeprowadzenia ogólnopolskiej kampanii informacyjnej pt. „Racjonalna gospodarka nawozami”. W kampanii, w której brałam udział, poruszono zagadnienia dotyczące zasad racjonalnego gospodarowania nawozami naturalnymi i mineralnymi na gruntach ornych oraz omówiono zrównoważone, przyjazne dla środowiska systemy nawożenia podstawowych gatunków roślin uprawnych. Dopełnieniem kampanii były warsztaty naukowe, pt. „Efektywne i bezpieczne dla środowiska nawożenie roślin uprawnych”, podczas których prezentowałam w dwóch wykładach wyniki badań z zakresu gospodarki nawozowej rozpatrywanej w aspekcie zrównoważonego rozwoju, prowadzonych w Zakładzie Żywienia Roślin i Nawożenia IUNG-PIB w Puławach. W ramach kampanii została opracowana monografia pt. „Dobre Praktyki w Nawożeniu”, Studia i Raporty IUNG-PIB, w której zamieściłam dwa rozdziały: „Nawożenie kukurydzy uprawianej na ziarno” oraz „Racjonalne gospodarowanie nawozami naturalnymi i organicznymi”. Brałam udział w opracowaniu ulotki informacyjnej promującej Dobre Praktyki w Nawożeniu „Stop stratom azotu i fosforu” oraz w przygotowaniu materiałów na

stronę internetową. W ramach tego zadania opracowałam wytyczne bezpiecznego stosowania nawozów naturalnych, które zostały wykorzystane w kampanii. Opracowałam również materiały szkoleniowe pt. Praktyki ograniczające straty azotu i fosforu z rolnictwa.

Za wyżej wymienione prace otrzymałam w **2015 roku Nagrodę Ministra Rolnictwa i Rozwoju Wsi** w zakresie „Racjonalna gospodarka nawozami”.

Dobra praktyka rolnicza, której celem jest ochrona wód przed zanieczyszczeniem azotanami pochodzącymi z rolnictwa, polega na optymalizacji zarządzania azotem ze wszystkich źródeł, a przede wszystkim z nawozów. Aplikacja nawozów w optymalnej ilości, we właściwym czasie i w odpowiedni sposób zapewnia ich dobre wykorzystanie przez rośliny, co decyduje o wysokiej efektywności i opłacalności nawożenia. Wysoka efektywność wykorzystania składników przez rośliny ogranicza również ich straty z rolnictwa. Rozpraszanie składników nawozowych poza agrosystemy pól uprawnych stwarza duże zagrożenie dla środowiska przyrodniczego, a w szczególności środowiska wodnego, powodując jego eutrofizację. Całkowite wyeliminowanie strat składników pokarmowych pochodzących ze źródeł rolniczych nie jest możliwe, ale jest możliwe znaczące ich ograniczenie. W ramach tego zagadnienia realizowałam kolejne zadanie w Programie Wieloletnim IUNG-PIB pt. „Ocena wpływu rolnictwa na jakość wód oraz wspieranie działań mających na celu ochronę zasobów wodnych w Polsce”. Byłam koordynatorem opracowania nowych zaleceń mających na celu ochronę wód przed zanieczyszczeniami azotanami pochodzącymi ze źródeł rolniczych - Zbioru Zaleceń Dobrej Praktyki Rolniczej do dobrowolnego stosowania. Opracowanie zostało przygotowane w związku z wymaganiami art. 103 ustawy z dnia 20 lipca 2017 r. - Prawo wodne. Ponadto zastąpiło Część H (Skrócony zbiór zasad dobrej praktyki rolniczej dla potrzeb wdrażania dyrektywy azotanowej) Kodeksu Dobrej Praktyki Rolniczej z 2004 r. oraz inne wymagania tego kodeksu odnoszące się do zasad stosowania nawozów zawierających azot, wapnowania gleb oraz przechowywania nawozów naturalnych. Dokument został opracowany we współpracy z Instytutem Ogrodnictwa w Skierniewicach, Instytutem Technologiczno-Przyrodniczym w Falentach, Ministerstwem Rolnictwa i Rozwoju Wsi, Ministerstwem Gospodarki Morskiej i Żeglugi Śródlądowej oraz Uniwersytetem Przyrodniczym w Poznaniu.

Od roku 2006 - (do chwili obecnej) prowadziłam i prowadzę nadal różne działania popularyzujące naukę. Prowadziłam wykłady na Lubelskim Festiwalu Nauki, w czasie Dni Otwartych Drzwi IUNG-PIB, na seminariach doktoranckich i studiach podyplomowych oraz szkolenia dla nauczycieli, uczniów i rolników. Jestem też autorem ponad 100 artykułów popularno naukowych, z których najważniejsze zamieściłam w spisie dorobku naukowego.

W ramach promocji unikatowego eksperymentu w Grabowie napisałam rozdział w monografii pt. Eksperymenty wieloletnie w badaniach rolniczych w Polsce. Jestem autorką rozdziału w monografii „Leksykon nawożenia”, dotyczącego racjonalnego stosowania nawozów naturalnych i organicznych. Jestem autorem lub współautorem 7 instrukcji szkoleniowych. Zajmuję się również wydawaniem opinii w zakresie kwalifikacji nawozów i środków poprawiających właściwości gleby do produkcji ekologicznej oraz w zakresie opiniowania nawozów i środków wspomagających uprawę roślin przeznaczonych do stosowania w uprawach polowych, celem wprowadzenia ich do obrotu w Polsce. Opracowuję również ekspertyzy dla Ministerstwa Rolnictwa i Rozwoju Wsi. Wykonuję analizy zawartości substancji humusowych w nawozach i środkach poprawiających właściwości gleby.

W związku z planowanym przez UE ustaleniem nowych limitów metali ciężkich, w tym kadmu, w nawozach fosforowych brałam udział jako ekspert w debacie „Rosyjska ekspansja nawozowa zagrożeniem dla interesów ekonomicznych Polski” w Centrum Bankowo-Finansowym Nowy Świat, w Warszawie, przedstawiając rozwiązania dla przemysłu nawozowego w związku ze zmniejszeniem limitu Cd w nawozach.

Planowane prace badawcze oraz publikacje na etapie przygotowań lub w recenzji

Stopień gromadzenia się materii organicznej, jak już wspomniano zależy od zespołu czynników agroekologicznych w glebie. Akumulacja materii organicznej jest szczególnie ważna dla utrzymania żyzności gleb lekkich. Ważne jest również badanie postępującego wysycenia gleby węglem organicznym w zależności od składu granulometrycznego gleby. Badania nad rozkładem materii organicznej i jej jakością w poszczególnych grupach składu granulometrycznego gleby będą przedmiotem moich dalszych zainteresowań. Z naukowego punktu interesujące jest także dalsze badanie jakości materii organicznej w oparciu o indeks humifikacji $C_{KH}:C_{KF}$ oraz wskaźnik stopnia humifikacji DH (degree of humification), który określa stabilność związków próchnicowych odpornych na działanie mikroorganizmów.

Publikacje poruszające to zagadnienie są w druku (rozdział w monografii) i przygotowania (2 prace), które zostaną wysłane do czasopism znajdujących się w bazie Journal Citation Reports (JRC):

Pikuła D. Kocoń A. Wpływ preparatów z mikroorganizmami pożytecznymi na ilość Corg. i jakość materii organicznej. Rozdział w monografii.

Pikuła D., Rutkowska A. The effect of mineral microbiologically enriched fertilizers on the quantity and quality of soil organic matter (JCR).

Pikuła D., Rutkowska A. Effect of leguminous crop and fertilization on the quantity and of soil organic matter in 36-years field experiment (JCR).

Wskaźniki oceny dorobku naukowego:

Index Hirscha według bazy Web of Science:3

Index Hirscha według bazy Scopus: 3

Sumaryczny Impact Factor (IF): 15,275

Liczba cytowani: 21

Liczba cytowań bez autocytowań: 19 (wg bazy Web of Science)

Punktacja wg komunikatu MNiSW w sprawie wykazu czasopism naukowych z liczbą punktów przyznawanych za publikacje w tych czasopismach (Oryginalne Prace Twórcze i Artykuły Przeglądowe) zgodnie z rokiem wydania: 401