



**RADA NAUKOWA DISCYPLINY
ROLNICTWO I OGRODNICTWO**

ROZPRAWA DOKTORSKA

mgr inż. Małgorzata Moskal

**OCENA ZAWARTOŚCI PIERWIASTKÓW
W UKŁADZIE GLEBA – ROŚLINA
W WIELOLETNIM DOŚWIADCZENIU
NAWOSZOWYM**

*Assessment of the content of elements in a long-term
static experiment in the soil-plant system*

DZIEDZINA: NAUKI ROLNICZE

DYSCYPLINA: ROLNICTWO I OGRODNICTWO

PROMOTOR PRACY

DR HAB. INŻ. TOMASZ KNAPOWSKI, PROF. PBŚ

Bydgoszcz, 2024

Spis treści

1.	WSTĘP.....	4
2.	PRZEGLĄD LITERATURY	6
2.1.	Rola i lokalizacja wieloletnich doświadczeń nawozowych.....	6
2.2.	Wpływ nawożenia na wybrane właściwości edaficzne gleby	9
2.3.	Źródła i toksyczność metali ciężkich.....	19
2.4.	Makro- i mikroelementy w roślinie i ich rola	26
3.	HIPOTEZA BADAWCZA, CEL I ZAKRES BADAŃ.....	32
4.	MATERIAŁY I METODY BADAŃ.....	33
4.1.	Charakterystyka wieloletniego doświadczenia polowego.....	33
4.1.1.	Lokalizacja doświadczenia i warunki glebowe	33
4.1.2.	Stosowane nawożenie i zmianowanie roślin	35
4.1.3.	Charakterystyka odmian badanych gatunków.....	37
4.1.3.1.	Ziemniak jadalny ‘Satina’	37
4.1.3.2.	Jęczmień jary ‘Stratus’	37
4.1.3.3.	Rzepak ozimy ‘Chagall’	38
4.1.3.4.	Pszenica ozima ‘Arkadia’	39
4.1.4.	Warunki pogodowe w okresie prowadzenia badań polowych.....	40
4.2.	Metody badań chemicznych materiału glebowego i roślinnego.....	46
4.3.	Statystyczne metody opracowania wyników.....	47
5.	OMÓWIENIE I DYSKUSJA WYNIKÓW	49
5.1.	Wybrane parametry charakteryzujące glebę.....	49
5.1.1.	Wartości wskaźników zakwaszenia gleby (pH i Hh).....	49
5.1.2.	Zawartość składników mineralnych w glebie.....	51
5.1.2.1.	Zawartość makroelementów.....	51
5.1.2.2.	Zawartość mikroelementów.....	63
5.1.2.3.	Zawartość ołowiu, kadmu, chromu i niklu.....	69
5.1.3.	Kierunki zmian składu mineralnego gleby po kolejnych roślinach w czteroletnim zmianowaniu.....	74
5.2.	Plon główny roślin uprawianych w zmianowaniu i ich skład mineralny.....	82
5.2.1.	Plon roślin.....	82
5.2.2.	Skład mineralny plonu głównego.....	84
5.2.2.1.	Zawartość makroelementów.....	84
5.2.2.2.	Zawartość mikroelementów.....	100
5.2.2.3.	Zawartość ołowiu, kadmu, chromu i niklu	111
5.2.3.	Ocena produktywności płodozmianu.....	122
6.	WNIOSKI.....	127
7.	LITERATURA.....	130

STRESZCZENIE	144
ABSTRACT	149
ANEKS.....	154

1. WSTĘP

Pierwsze teorie i początki doświadczeń rolniczych zapoczątkowane zostały w XVII wieku. Wtedy to rolnictwo zaczęło bazować na podstawach naukowych, pojawili się pierwsi badacze-eksperymentatorzy, próbujący odpowiadać na zagadnienia związane z tą dziedziną. Z kolei rozwój rolniczych stacji doświadczalnych, i jak się później okazało, wieloletnich eksperymentów polowych związany był z ukazaniem się w XIX wieku dzieła Liebiga pt. *Chemia w zastosowaniu do rolnictwa i fizjologii*, przedstawiającego podstawy naukowe odżywiania roślin (teoria mineralnego odżywiania roślin). Poza tym wpływ na powyższe mieli producenci-rolnicy, domagając się odpowiedzi na liczne, nurtujące ich kwestie związane ze stosowaniem nawożenia w uprawie roślin [Antonkiewicz i Łabętowicz, 2016; Łabętowicz, 2020, Viet, 2023].

Wieloletnie statyczne doświadczenia nawozowe stanowią cenne źródło wiedzy rolniczej. Ponadto są punktem wyjścia do wnioskowania na temat zmian zachodzących na skutek oddziaływania różnorodnych czynników [Blecharczyk i in., 2018, Thomas i in., 2019, Viet, 2023]. Mają one również olbrzymią wartość naukową i poznawczą. Jak podają Jaskulska i Urbanowski [2018], dają pełen obraz oddziaływania wielu sposobów nawożenia na poziom plonowania i jakość uprawianych gatunków. Dzięki nim możliwym stało się określenie wieloletnich zmian właściwości fizykochemicznych gleby decydujących o jej żyzności pod wpływem czynników naturalnych i antropogenicznych [Jaskulska i Urbanowski, 2018, Bhatt i in., 2019, Liu i in., 2021,]. Z omawianymi eksperymentami wiąże się wiele celów, które tłumaczą konieczność ich prowadzenia [Kopeć i Gondek, 2016, Thomas i in., 2019]. Dzięki nim możliwe jest poznanie wzajemnych korelacji pomiędzy oznaczanymi parametrami gleby jak i uprawianej na niej roślinami [Kopeć i Gondek, 2016; Blecharczyk i in., 2018; Marks i in., 2018, Bhatt i in., 2019, Liu i in., 2021, Viet, 2023, Bečka i in., 2024]. Problematyka ta poruszana jest w niewielu pracach naukowych, które wymagają dalszej kontynuacji powyższych badań. Według Jaskulskiej i Urbanowskiego [2018], poznanie kierunku zmian w glebie jest niezbędne, by wprowadzić zasady zrównoważonego rolnictwa. Aktualnie na świecie prowadzonych jest ponad 600 wieloletnich doświadczeń nawozowych [Marks i in., 2018].

Stosowanie nawozów i zmianowanie są kluczowymi zabiegami agrotechnicznymi [Jaskulska i Urbanowski, 2018, Bečka i in., 2024]. Intensywna uprawa roślin w połączeniu z uproszczonym zmianowaniem, a co za tym idzie przewagą zbóż w warunkach gleb lekkich, powoduje obniżenie zawartości próchnicy, która ma istotne znaczenie w utrzymaniu jej żyzności, struktury i wilgotności. Bardzo wartościowe źródło materii organicznej stanowią nawozy naturalne, spośród których najcenniejszym jest obornik [Bhatt i in., 2019, Terzić i in., 2019, Viet, 2023]. Zasady aplikacji, zarówno nawozów mineralnych jak i naturalnych oraz organicznych,

są szczegółowo opisane w ustawie o nawozach i nawożeniu z dnia 10 lipca 2007 roku. Ma to bezpośrednie przełożenie na opłacalność produkcji. Wieloletnie doświadczenia nawozowe dają też podstawy do rozważań na temat bezpieczeństwa żywności [Johnston i Poulton, 2018, Terzić i in., 2019].

Składniki mineralne są niezbędne dla prawidłowego wzrostu i rozwoju roślin uprawnych. Jednak ich nadmiar w środowisku jest zjawiskiem niepożądanym. W wyniku intensywnych opadów deszczu w połączeniu z dawkami nawozów, dochodzić może do zanieczyszczenia wód powierzchniowych i podziemnych. Jak podaje Staszewski [2011], przemiany azotu w glebie powodują powstawanie azotanów (V) i azotanów (III), które obok siarki, ołowiu i kadmu uważane są za najbardziej szkodliwe związki dla agrosystemu.

Jak podają Kuziemska i in. [2017], stosunkowo dużym zagrożeniem dla bezpieczeństwa ekologicznego i zdrowia ludzi jest zanieczyszczenie środowiska naturalnego metalami ciężkimi. Ich cechą wspólną, przy dużych stężeniach, jest toksyczność dla biotycznych elementów środowiska. Wśród metali ciężkich należy wymienić, m.in., kadm, ołów, nikiel i chrom. O ich zawartości w środowisku decydują źródła naturalne, ale znacznie większy wpływ ma antropopresja (np. transport, nawożenie).

Wielu autorów [Szulc i in., 2007, Rutkowska i in., 2015, 2007, Blecharczyk i in. 2018, Johnston i Poulton, 2018, Marks i in., 2018, Stępień i in., 2018, Bhatt i in., 2019, Stępień i Kobiałka, 2019, Liu i in. 2021] jest zdania, że wszystkie zagadnienia związane ze statycznymi doświadczeniami nawozowymi nie zostały jeszcze do końca poznane. Podkreślić należy, że firmy wytwarzają i oferują coraz więcej nowych, bardziej ekologicznych preparatów stymulujących czy nowoczesnych nawozów. Są nimi, m. in., takie produkty jak: AzotoPower, Novobakt AzoFosfo czy Multi N, które posiadają zdolność wiązania azotu atmosferycznego, znacznie zwiększają przyswajalność fosforu poprzez rozpuszczanie związków wcześniej zablokowanych czy zawierają stymulatory wzrostu. W związku z powyższym istnieje konieczność ciągłej kontynuacji tego typu doświadczeń w celu określenia ich długofalowego wpływu na uprawiane rośliny, w kontekście uzyskiwanego efektu plonotwórczego i jakości zebranego plonu, oraz na właściwości fizykochemiczne gleb, które determinują ich żyzność. Poza tym doświadczenia takie były i nadal będą podstawą, poprzez wieloletnią obiektywną ocenę stosowanych praktyk agronomicznych w wielu krajach świata, do modelowania technologii rolniczych opierających się na zrównoważonym rolnictwie [Berti i in., 2016, Johnston i Poulton, 2018, Bhatt i in., 2019, Łabętowicz i Niedziński, 2020, Liu i in. 2021]. Zatem, nie budzi wątpliwości fakt, że prowadzenie dalszych wieloletnich nawozowych doświadczeń statycznych jest uzasadnione.

2. PRZEGLĄD LITERATURY

2.1. ROLA I ZNACZENIE WIELOLETNICH DOŚWIADCZEŃ NAWOZOWYCH

Jak podają Berti i in. [2016] oraz Łabętowicz i Niedziński [2020], wieloletnie doświadczenia polowe (long-term field experiments) są eksperymentami statycznymi, w których w sposób trwały, przez więcej niż 20 lat stosuje się te same obiekty badawcze. Przy czym najlepiej, gdyby takie doświadczenia były kontynuowane przez okres 40-50 lat. Pozwalają one na określenie transformacji fizycznych, fizykochemicznych czy też biologicznych gleby w długim okresie czasu. Zmiany te mogą weryfikować żyzność i produktywność rolniczą gleby, które są z kolei determinowane zróżnicowanymi warunkami pogodowymi, glebowymi lub uprawowymi [Lenart i in., 2018, Johnston i Poulton, 2018, Stępień i in., 2018, Suwara i in., 2018, Laamrani, 2020, Viet, 2023].

Wyniki uzyskane na podstawie wieloletnich statycznych doświadczeń nawozowych wskazują na konieczność ich dalszego prowadzenia. Wymagają one dokonania statycznej oceny wieloletniego nakładania i oddziaływania stosowanego nawożenia w zakresie właściwości fizyko-chemicznych gleby, składu chemicznego, a tym samym wielkości plonu roślin, jak również poznania wzajemnych korelacji pomiędzy badanymi cechami [Kopeć i Gondek, 2016, Liu i in., 2021]. Według Blecharczyka i in. [2018], głównym celem wieloletnich eksperymentów jest ocena wpływu zastosowanego sposobu gospodarowania w aspekcie właściwości gleby i plonu roślin. W wyniku prowadzenia długoterminowych doświadczeń nawozowych uzyskuje się liczną ilość próbek, które wymagają dalszych badań naukowych. Tworzą również bardzo liczną, unikalną bazę danych w wymiarze przestrzennym i czasowym. Dzięki temu stało się możliwe monitorowanie mechanizmów, zachodzących w systemie ciągłym [Łabętowicz i Niedziński, 2020, Johnston i Poulton, 2018]. Wieloletnie statyczne doświadczenia nawozowe, z uwagi na długi czas ich prowadzenia, stanowią cenne źródło wiedzy o charakterze poznawczym i praktycznym, dając tym samym pełen obraz efektywności stosowanego nawożenia [Kopeć i Gondek, 2016]. Kierunki zmian określone na podstawie takich doświadczeń są również podstawą do prognozowania skutków postępującej chemizacji w rolnictwie [Murawska i in., 2015, Blecharczyk i in., 2018, Marks i in., 2018, Stępień i in., 2018, Terzić i in. 2019, Viet, 2023]. Stanowią więc podstawę do aktualizacji istniejącej wiedzy na powyższy temat [Marks i in., 2018]. Dzięki wieloletnim doświadczeniom nawozowym możliwym stało się poznanie procesów produkcji roślinnej w makroskali, zmian żyzności gleby i składu chemicznego roślin, zachodzących pod wpływem nawożenia na przestrzeni lat [Małecka-Jankowiak i in., 2018, Liu i in., 2021, Viet, 2023].

Aktualnie na świecie prowadzonych jest ponad 600 wieloletnich

eksperymentów, a większość z nich zlokalizowanych jest w Europie. Najbardziej znanymi i zarazem najstarszymi są prowadzone od 1834 roku we Francji i w Anglii stacje doświadczalne, odpowiednio w: Pechelbronn (założyciel J.B. Boussingault) i Rothamsted (założyciel J.B. Lawes). W tej pierwszej rozpoczęto od badań dotyczących wpływu azotu na plonowanie i jakość roślin oraz analizowano proces asymilacji dwutlenku węgla przez rośliny. Z kolei w Rothamsted pierwotnie oceniano wpływ wapnia, kości, popiołu z kości i apatytu na rośliny. Natomiast od 1843 roku rozpoczęto wieloletnie doświadczenia polowe, znane pod obecną nazwą „classical experiments”. Dotyczyły one oceny wpływu nieorganicznych substancji zawierających N, P, K, Na i Mg, które występują w roślinach i oborniku, na efekt plonotwórczy roślin [Fotyma, 2010, Podlaski i Łabętowicz, 2020]. Należy zwrócić uwagę, jak podają Kopeć i Gonddek [2016], że w archiwum powyższej Stacji (chłodne i ciemne pomieszczenie magazynowe) znajduje się ponad 300 tysięcy zachowanych próbek materiału roślinnego i glebowego. Zarchiwizowany materiał badawczy można było przebadać na zawartość wielu składników, których oznaczenie nie było kiedyś możliwe z uwagi na brak odpowiedniej aparatury oraz wiedzy, co do ich roli i ewentualnej przydatności lub szkodliwości w rolnictwie. Podaje się, że zanalizowano je wieloaspektowo, w tym również pod kątem zawartości WWA (wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych). Pozwoliło to na zaobserwowanie, m.in., zmian zachodzących w środowisku na skutek spalania węgla kamiennego.

W Polsce natomiast najstarszym tego typu doświadczeniem jest eksperyment prowadzony od 1923 roku, zlokalizowany w Stacji Doświadczalnej w Skierniewicach [Marks i in., 2018, Kopeć i Gonddek, 2016, Stępień i in. 2020]. Został on założony przez prof. Mariana Górskiego, który wydzielił 4. duże pola z czterema roślinami, tj. okopowe, zboża jare, motylkowe i żyto. Na każdym z pól wydzielono 10 kombinacji nawozowych w 5. powtórzeniach. Dodatkowo od 1960 roku płodozmian został rozszerzony o pszenicę ozimą. Zatem do chwili obecnej obserwuje i analizuje się bezpośredni wpływ nawozów na 5. polach [Stępień i in., 2020]. Stosowane są na nich różne kombinacje nawozowe, tj.: CaNPK, NPK, PK, PN, KN, Ca, CaNPK, CaPK, CaPN, CaNK, obornik i obiekt kontrolny bez nawożenia. Przy czym w zmianowaniu, np. 5. polowym uprawia się ziemniaki (obornik - $30 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$), jęczmień jary, koniczyna czerwona, pszenica ozima i żyto a azot wysiewa się pod rośliny tylko w postaci saletry amonowej. Poza tym na innych polach stosuje się dowolne zmianowanie bez obornika, z lub bez udziału roślin motylkowatych, prowadzi monokulturę ziemniaków czy żyta i stosuje azot w formie saletry amonowej lub siarczanu amonu. Jak podają Stępień i in. [2020] duże znaczenie dla praktyki rolniczej miały doświadczenia, w których stosowano nawóz naturalny (obornik) badając jego wpływ na działanie podstawowych makroskładników (NPK).

Omawiając wieloletnie eksperymenty polowe nie można pominąć doświadczenia na temat wpływu różnych systemów nawożenia na jakość

środowiska, które prowadzone są od 1957 roku w Stacji Doświadczalnej w Brodach. Dotyczą one głównie zmian zawartości azotu i węgla organicznego w glebie. Uprawa w monokulturze, zwłaszcza jęczmienia i ziemniaka, skutkowała ubytkiem zawartości N-org. i C-org. w warstwie 0–20 cm w porównaniu z obiektem, na którym była lucerna. Ugorowanie gleby determinowało obniżenie poziomu azotu ogółem i węgla organicznego, w porównaniu z obiektami trwale pokrytymi roślinnością. Z kolei systematyczna aplikacja obornika skutkowała zwiększeniem ilości przyswajalnych form magnezu, fosforu i potasu oraz azotu ogółem i węgla organicznego w porównaniu z poletkami, na których zastosowano nawozy mineralne [Blecharczyk i in., 2018]. Podobne wyniki uzyskali również Triberti i in. [2016], Suwara i in. [2018], a także Laamrani i in. [2020]. Po 38. latach założono kolejne wieloletnie, dwuczynnikowe doświadczenie nawozowe, którego głównym celem było określenie reakcji roślin na uproszczenie uprawy. Pierwszym czynnikiem było następstwo roślin, drugim natomiast - system uprawy roli [Małecka-Jankowiak i in., 2018].

Cennym źródłem wiedzy na temat skutków uprawy roślin, tym razem w monokulturze, jest także 50. letnie doświadczenie, które założono w 1967 roku w Rolniczym Zakładzie Doświadczalnym w Bałcynach. Celem eksperymentu było, m.in.: ocenienie reakcji roślin na uprawę w długotrwałej monokulturze i jej wpływ na plon, poznanie interakcji między obecnością chorób, chwastów i szkodników a wielkością plonu, określenie wpływu czynników na właściwości fizyko-chemiczne gleby, a także transfer uzyskanych wyników do nauki [Marks i in., 2018].

Kolejnym wieloletnim doświadczeniem, które decydowało o istotnej roli w procesie poznania wpływu rodzaju nawożenia na właściwości gleby i plon roślin jest doświadczenie założone w 1955 roku w Chylicach. Prowadzono je na glinie zwałowej, kompleksu pszenego dobrego, klasy bonitacyjnej III a, w układzie losowanych bloków. Czynnikiem były dawki nawożenia mineralnego i/lub naturalnego [Suwara i in., 2018]. Ponadto w 1967 roku założono również doświadczenie, którego celem było określenie wpływu wieloletniego siewu bezpośredniego na plon, ilość chwastów w łanie oraz właściwości chemiczne i fizyczne gleby zaliczanej do piasku gliniastego mocnego [Lenart i in., 2018].

Długotrwałym doświadczeniem nawozowym, którego nie można pominąć jest prowadzone w Stacji Badawczej Politechniki Bydgoskiej w Mochelku, założone w 1948 roku. Jednym z badanych czynników był sposób rekultywacji, drugim natomiast dawki nawożenia (NPK, naturalne – obornik).

Wieloletnie doświadczenie nawozowe prowadzono również od 1979 roku w Rolniczym Zakładzie Doświadczalnym w Grabowie. Eksperyment zlokalizowano na glebie bielcowej zaliczanej do kompleksu pszenego dobrego i żytniego. Czynnikiem pierwszego rzędu było zmianowanie, natomiast drugiego rzędu - dawki nawożenia obornikiem. Nawożenie obornikiem stosowano co cztery lata pod ziemniaki, a następnie pod kukurydzę uprawianą

na ziarno. W zmianowaniu A zastosowano rośliny zubażające glebę w materię organiczną, a w B - wzbogacające glebę w materię organiczną [Pikuła i Rutkowska, 2020].

Piętnaście lat później (1994 r.) w Stacji Doświadczalnej w Osinach rozpoczęto prowadzenie kolejnego wieloletniego doświadczenia w Polsce. Założono je na glebie płowej, kompleksu żytniego dobrego i bardzo dobrego oraz pszennego dobrego o wartości pH od 4,4 do 5,4, i średniej zawartości przyswajalnych form potasu i fosforu. Czynnikiem w omawianym eksperymencie polowym były: płodozmian, dawki nawożenia, rodzaj zastosowanych środków ochrony roślin, a także mechaniczna pielęgnacja [Kuś i Jończyk, 2018].

W latach 1996-2017 w Górskiej Stacji Doświadczalnej, w Czyrnej koło Krynicy (południowo-zachodnia część Beskidu Niskiego) prowadzono wieloletnie doświadczenie nawozowe. Hipoteza badawcza eksperymentu zakładała, że zastosowane nawożenie w różnych systemach uprawy (ekologiczny, tradycyjny) oraz płodozmian, będą determinowały wielkość plonu oraz zawartości przyswajalnych form makroskładników w glebie [Klima i in., 2018].

2.2. WPŁYW NAWOŻENIA NA WYBRANE WŁAŚCIWOŚCI EDAFICZNE GLEBY

Wieloletnie stosowanie zróżnicowanego nawożenia naturalnego lub mineralnego wywiera istotny wpływ na skład chemiczny gleby, w tym również na jej właściwości fizyczne [Johnston i Poulton, 2018, Terzić i in., 2019, Laamrani i in., 2020, Pikuła i Rutkowska, 2020, Balik i in., 2022]. Jednym ze skutków jego stosowania na obiektach niewapnowanych jest wzrost zakwaszenia gleby w profilu do głębokości 70 cm, pomimo dwukrotnie większej zawartości wapnia w poziomie Bt w porównaniu z poziomem Eet [Stępień i in., 2018]. W badaniach przeprowadzonych przez Kozłowską-Strawską [2007], nad uprawą pszenicy jarej w doświadczeniu wazonowym, na glebie płowej o wartości pH 5,56, największe zakwaszenie gleby odnotowano po zastosowaniu roztworu saletrzano-mocznikowego z dodatkiem siarki. Było to prawdopodobnie spowodowane zakwaszającym oddziaływaniem mocznika. Z kolei według Podleśnej i in. [2017] na glebach alkalicznych, w celu poprawy właściwości gleby, powszechnie stosowaną praktyką jest aplikowanie siarki elementarnej. Przedłużone działanie zakwaszające omawianego pierwiastka w początkowym okresie jest spowodowane stopniowym utlenianiem kwasu siarkowego.

Zawartość wyżej wymienionego pierwiastka wywiera istotny wpływ na dostępność azotu w glebie, który jest uważany za główny pierwiastek plonotwórczy. Dla roślin szczególnie ważną jest forma azotanowa, która w glebie charakteryzuje się dużą mobilnością. W warunkach gleby

lekkiej, w połączeniu z wysokim poziomem opadów, dochodzi do przemieszczania się tej formy azotu w głąb profilu glebowego, co skutkuje stratami omawianego składnika i stwarza zagrożenie dla środowiska [Podleśna, 2015]. Jak podaje Serpil [2012] wykorzystanie azotu z nawozów przez rośliny uprawne wynosi około 50%. Pozostała część przedostaje się zarówno do wód gruntowych jak i powierzchniowych, powodując ich zanieczyszczenie. Ponadto w nawozach azotowych znajdują się szkodliwe azotany i azotyny, a także nitrozoamina, wykazująca właściwości kancerogenne i odpowiadająca za rozwój nowotworów wątroby, trzustki, nerek, płuc, przełyku i języka. Stosowanie wieloletniego, zarówno naturalnego jak i mineralnego, zróżnicowanego nawożenia wpływa na zawartość azotu ogółem w glebie [Stępień i in., 2018]. Z przeprowadzonych przez tych autorów badań wynika, że na nawożonym mineralnie, wapnowanym obiekcie z obornikiem, była ona największa ($0,68 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$). Badania Blecharczyka i in. [2018] potwierdzają również, że zmiany zawartości azotu ogółem obserwowano już po pierwszej rotacji 7. letniego zmianowania. Natomiast Thomas i in. [2019], stosując obornik, odnotowali wzrost zawartości azotu ogółem w glebie po 5. latach prowadzenia eksperymentu. Z badań przeprowadzonych przez Suwarę i in. [2018] wynika, że największą zawartość azotu ogółem odnotowano na obiekcie nawożonym naturalno-mineralnie oraz mineralnie.

Stosowanie nawożenia wywiera również wpływ na zawartość przyswajalnych form fosforu w glebie. Aktywność mikrobiologiczna i biochemiczna gleby jest uzależniona od ilości tego pierwiastka. Jednak zbyt wysokie dawki nawozów fosforowych mogą doprowadzić do zanieczyszczenia środowiska [Sapek, 2014]. Z badań przeprowadzonych przez Skwierawską i in. [2008] wynika, że zastosowanie siarki siarczanowej w dawce 120 kg skutkuje istotnym wzrostem omawianego składnika w warstwie $0\text{-}40 \text{ cm}$. Łabętowicz i in. [2010] po aplikacji gipsu na glebach kwaśnych, stwierdzili obniżenie przyswajalnych form fosforu, w stosunku do obiektu kontrolnego, na którym go nie stosowano. Może to wynikać z chemicznej sorpcji fosforu na skutek niskiej wartości pH na omawianym obiekcie. Mendra i Ducka [2013] odnotowali, że nawożenie mineralne istotnie różnicuje poziom fosforu w glebie, a największą zawartość tego składnika odnotowali na obiektach nawożonych NPK w dawce $240 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$. Stwierdzili również, że stosowanie azotu skutkuje uwolnieniem anionów z materii organicznej. Wyżej wymienione aniony uczestniczą w rozpuszczaniu fosforu nieorganicznego w kwasach wytwarzanych przez żyjące w glebie mikroorganizmy. Omawiany proces przebiega głównie w ryzosferze, a potwierdzeniem tej zależności jest mniejsza zawartość fosforu w stosunku do głębszych warstw. Na podkreślenie zasługuje fakt, że w warstwie $0\text{-}10 \text{ cm}$ proces mineralizacji fosforu przebiega bardziej intensywnie. Jest to spowodowane większą aktywnością mikrobiologiczną. Badania Suwary i in. [2018] potwierdzają, że wpływa to pozytywnie na ilość przyswajalnych form fosforu w glebie.

Zastosowanie nawożenia naturalnego lub mineralnego różnicuje zawartość

potasu w glebie. Jak podają Stępień i in. [2018], najmniejszą jego zawartość odnotowano na obiektach nienawożonych. Z kolei najczęściej przyswajalnych form potasu oznaczono w próbkach gleb pochodzących z obiektów nawożonych mineralnie z dodatkiem wapnia. Jednak powyżsi autorzy, porównując obiekty doświadczalne, gdzie aplikowano obornik lub nawozy mineralne, stwierdzili większą zawartość omawianego makroskładnika po zastosowaniu nawozu naturalnego. Zależności te potwierdzają badania innych autorów [Blecharczyk i in., 2018, Suwara i in., 2018; Thomas i in., 2019]. Natomiast na odmiennie wyniki wskazują dane zawarte w pracy Jaskulskiej i Urbanowskiego [2018], z których wynika, że łączna aplikacja obornika i nawozów mineralnych doprowadziła do większego wzrostu zawartości przyswajalnych form potasu w glebie w porównaniu do obiektów nawożonych wyłącznie obornikiem lub nawozami mineralnymi.

Według Stępnia i in. [2018], zawartość przyswajalnych form magnezu w glebie był istotnie determinowana rodzajem zastosowanego nawożenia. Najniższą zawartością w/w pierwiastka cechowały się obiekty niewapnowane, gdzie nie stosowano obornika. Natomiast istotnie większą jego zawartość zaobserwowano na obiektach nawożonych naturalnie. Większa ilość magnezu na obiektach wapnowanych może być spowodowana wnoszeniem go do gleby wraz z wapniem, który z kolei wpływa na poziom przyswajalnych form makro- i mikroelementów. Na wszystkich obiektach nawozowych odnotowano z kolei najczęściej magnezu w warstwie Bt w stosunku do niżej położonych.

Jak podają Jaskulska i Jaskulski [2003], Murawska i in. [2017], Bhatt i in. [2019], Terzić i in. [2019] oraz Laamrani i in. [2020] zastosowane w ich doświadczeniach różne rodzaje nawożenia różnicowały istotnie zawartość pierwiastków w glebie. Regularne stosowanie obornika skutkowało nagromadzeniem w niej C_{org} , oraz materii organicznej, a to z kolei oddziaływało na poziom plonowania. Odpowiednio dobrane nawożenie mineralne w połączeniu z wapnowaniem także pozwala na utrzymanie odpowiedniej produktywności gleby. Łączne stosowanie nawożenia mineralno-naturalnego prowadzi do wzrostu poziomu węgla organicznego w glebie. Natomiast całkowita rezygnacja z nawożenia determinuje silny spadek odczynu gleby i zawartości w niej węgla organicznego oraz mniejszą ilość przyswajalnych składników pokarmowych dla roślin. Według Korzeniowskiej i in. [2020, 2021], aplikowane nawożenie mineralne wywiera wysoce istotny wpływ na odczyn gleby, a co za tym idzie przyswajalność mikroelementów, w tym metali ciężkich. Wiadomo, że monitoring gleb w Polsce, pod względem ich ilości w gruntach uprawnych, nie jest prowadzony. Na podkreślenie zasługuje również fakt, że brak w dawce nawozów naturalnych i organicznych skutkować może niedoborem omawianych składników w glebie. Do określenia ich ilości niezbędne jest zatem badanie gleby. Niedobór wyżej wymienionych składników może występować na glebach lekkich, niedawno wapnowanych.

Obornik uważany jest za podstawowy nawóz naturalny w gospodarce rolnej, stanowiąc źródło wielu składników odżywczych dla roślin [Gajewska

i Krysztoforski, 2019]. Jak podaje Waławowicz [2008], ten odzwierzęcy nawóz jest najlepiej działającym na wskaźniki jakościowe gleby, przy czym spadek pogłowia zwierząt gospodarskich prowadzi do jego braków. Według Kalinowskiego [2018ab] obornik to najtańszy nawóz, który pomimo że nie zastąpi nawozów mineralnych, pozwala ograniczyć ich stosowanie, zmniejszając tym samym koszty produkcji i jednocześnie zanieczyszczenie środowiska przyrodniczego. Jego aplikowanie skutkuje wzrostem zawartości materii organicznej w glebie i poprawą właściwości sorpcyjnych oraz struktury gleby [Wachowski, 2018]. W wyniku zastosowania obornika zwiększeniu ulega namnażanie bakterii glebowych, a większa aktywność mikroorganizmów glebowych przyspiesza rozkład materii organicznej [Brodowska, 2021]. Zastosowanie obornika prowadzi do wzrostu zawartości próchnicy oraz makro- i mikroelementów w glebie. Z kolei kwasy huminowe są lepiszczem dla cząstek gleby. Dzięki temu poprawia się jej struktura, co przekłada się na prawidłowy rozwój korzeni, a w konsekwencji rośliny uprawne są zdolne do pobierania odpowiedniej ilości składników pokarmowych. Efektem końcowym jest uzyskanie optymalnego efektu plonotwórczego. Wzrost wartości pH gleby, który następuje na skutek zastosowania omawianego nawozu naturalnego, przyczynia się do zwiększenia wchłaniania wapnia oraz wody opadowej. Obornik stosuje się co 4 lata, ponieważ składniki odżywcze w nim zawarte są uwalniane stopniowo. Aby zapobiec stratom azotu z tego nawozu konieczne jest jego przyoranie, które powinno nastąpić nie później niż w ciągu 12 godzin od jego rozprowadzenia na polu. Roślinami, które najlepiej wykorzystują substancje odżywcze z obornika są kukurydza, burak a także ziemniak [Wachowski, 2018].

Zgodnie z Rozporządzeniem Rady Ministrów z dnia 5 czerwca 2018 r. w sprawie przyjęcia programu działań mających na celu zmniejszenie zanieczyszczenia wód azotanami pochodzącymi ze źródeł rolniczych oraz zapobieganie dalszemu zanieczyszczeniu, obornik można stosować na gruntach ornych w okresie od 1 marca do 31 października. Z kolei na trwałych użytkach zielonych i uprawach wieloletnich termin ten wydłużono do 30 listopada. Zawartość azotu w oborniku wynosi średnio 0,5%. Zgodnie z w/w rozporządzeniem dopuszczalna dawka azotu wniesiona do gleby z nawozem naturalnym nie może przekraczać $170 \text{ kg N}\cdot\text{ha}^{-1}$ w czystym składniku w ciągu roku. Nawozu tego nie wolno stosować na glebach zalanych, zamrzniętych oraz tych z pokrywą śnieżną. Na glebach ciężkich powinien on być stosowany jesienią, a na lekkich - wiosną. Na trwałych użytkach zielonych zalecana dawka waha się w przedziale od 20 do $30 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$, a za optymalny termin do jego zastosowania uważa się koniec okresu wegetacyjnego. Pod jęczmień browarny nie wskazane jest stosowanie obornika. Wynika to z tego, że zawartość białka w ziarnie tego zboża nie może przekraczać 11%. Pod uprawę lnu i gryki także nie zaleca się tego nawozu naturalnego, ponieważ wymienione rośliny mają niewielkie potrzeby pokarmowe oraz tendencję do wylegania. Obornik najlepiej rozprowadzać na polu przy

pochmurnej, dżdżystej pogodzie i niewielkim wietrze [Wachowski, 2018]. Na glebach lekkich głębokość przyorania tego nawozu wynosi od 15 do 25 cm. Jak podają Gajewska i Krysztoforski [2019] z uwagi na szybką mineralizację na glebach lekkich, zalecane jest stosowanie go co 2 lata w ilości od 15 do 20 t·ha⁻¹. Obornik stanowi cenne źródło azotu i potasu. Zawartość azotu w tym naturalnym nawozie, według Ciesielskiej i in. [2011], jest determinowana, m.in. miejscem w jakim jest on składowany. Jego straty, w przypadku przechowywania na gnojowniku, sięgają niekiedy 50%, ale średnio wynoszą 38%. Bardziej korzystnym sposobem przechowywania jest składowanie w chlewie, a co za tym idzie utrzymywanie zwierząt na głębokiej ściółce. Jednak wymaga to sprawnej wentylacji, zarówno w czasie chowu zwierząt, jak i podczas jego usuwania. Odpowiednim sposobem na ograniczenie strat azotu z obornika jest staranne ubicie przyzmy oraz nakrycie jej folią i warstwą gleby lub kompostu. Przy składowaniu obornika na zewnątrz pomieszczeń dochodzi także do strat węgla organicznego.

W ciągu pierwszego roku po zastosowaniu, rośliny uprawne wykorzystują od 20 do 40% azotu zawartego w oborniku, a w kolejnych latach ilość ta waha się w zakresie od 20 do 40%. Do czynników wywierających wpływ na wykorzystanie azotu zaliczamy termin zastosowania, rodzaj gleby, gatunek uprawianej rośliny a także rozkład opadów. Obok azotu obornik zawiera także fosfor, którego wykorzystanie w pierwszym roku po zastosowaniu wynosi od 20 do 25%, a w kolejnych latach od 5 do 10%. Wykorzystanie potasu po zastosowaniu obornika dochodzi do około 60% w pierwszym roku. Za optymalny termin stosowania obornika uważa się letni i wczesnojesienny. Według Kalinowskiego [2018ab] obornik zastosowany na użytkach zielonych poprawia skład gatunkowy runi oraz wartość odżywczą zebranego pokosu. Jego następcze działanie, w zależności od rodzaju gleby, trwa od 3 do 4 lat. Szczególnie cenne badania nad następczym wpływem obornika na zawartość pierwiastków w glebie i jej właściwości fizyczne przeprowadził Waclawowicz [2008]. Wynika z nich, że nawożenie tym naturalnym nawozem skutkowało zmniejszeniem gęstości gleby o 4,7%. Statystycznie udowodniono także jego wpływ na porowatość ogólną gleby, która w pierwszym, drugim i trzecim roku po zastosowaniu zwiększyła się o 3,2% w porównaniu do gleby, na której go nie stosowano. Podobne wyniki w swych badaniach uzyskali Suwara i in. [2005] oraz Zimny i Waclawowicz [2007]. Jak podaje Waclawowicz [2008] aplikacja obornika wpłynęła również istotnie statystycznie na poprawę warunków wilgotnościowych w warstwie 5–10 cm (o 1,7%). Ponadto w wyniku zastosowania omawianego nawozu naturalnego wzrosła zawartość węgla organicznego i potasu w glebie (o 36,6%). Podobne wyniki w swoich badaniach uzyskali Puła i Łabza [2004], Rabikowska i Piszcz [2005], Murawska i in. [2017], Bhatt i in. [2019] oraz Thomas i in. [2019].

Aplikowanie obornika w uprawie roślin ma istotny wpływ na zawartość materii organicznej w glebie. Jak podają Marks i in. [2018], długotrwały brak obornika w dawce skutkuje obniżeniem ilości tej substancji w glebie, zarówno

na obiektach uprawianych w zmianowaniu jak i w monokulturze. Podobne wyniki uzyskała Pikuła [2018]. Z przeprowadzonych przez nią badań wynika, że zawartość materii organicznej jest istotnie różnicowana, zarówno sposobem nawożenia, jak i zastosowanym zmianowaniem. Najmniejszą zawartość materii organicznej stwierdziła ona na obiekcie, gdzie nie stosowano obornika. Materia organiczna jest podstawowym i najważniejszym składnikiem gleby [Ukalska-Jaruga i in., 2015] decydującym o jej żyzności i jakości, który podlega ciągłym przemianom [Kończak-Konarska i Kuziak, 2018; Kołacz, 2020]. Jej zawartość w glebie nie jest stała [Pikuła, 2019]. W ogólnej zawartości materii organicznej w glebach, które są użytkowane rolniczo, największy udział ma humus (próchnica) - powyżej 85%. Z kolei mikroorganizmy i żywe korzenie roślin stanowią odpowiednio 5% i 10% [Allen-King i in., 2002]. Znaczący wpływ na zawartość materii organicznej w glebie ma nawożenie, zmianowanie, a także sposób zagospodarowania słomy. Zawiera ona pierwiastki, takie jak azot, fosfor, magnez itp., które stopniowo przechodzą w formy przyswajalne, a ich ilość powinna zaspokajać potrzeby pokarmowe roślin [Maziarek, 2015].

Materia organiczna wpływa w istotny sposób na właściwości fizyczne i chemiczne gleby, decyduje o jej zdolności buforowej i sorpcyjnej oraz aktywności biologicznej [Kołacz, 2020]. Składa się z obumarłych szczątków roślinnych i zwierzęcych, a także produktów ich rozkładu. Stanowi źródło pożywienia dla organizmów żyjących w glebie oraz wpływa na żyzność i strukturę gleby [Kończak-Konarska i Kuziak, 2018]. Według Pikuły [2015] zawarta w glebie próchnica uczestniczy w powstawaniu kompleksów z wielowartościowymi kationami, w retencji wody, tworzeniu agregatów w glebie oraz powstawaniu jej barwy i gęstości. Odpowiada również za wzrost i rozwój roślin. Dzięki niej zwiększeniu ulega glebowa bioróżnorodność. Z badań przeprowadzonych przez Murawską i in. [2017] wynika, że wieloletnie nawożenie mineralne skutkowało spadkiem zawartości węgla organicznego ogółem o 26% i jednocześnie wzrostem zawartości azotu ogółem o 13%, w stosunku do ich ilości przed rozpoczęciem tego doświadczenia. Jak podaje Kołacz [2020] przy wysokiej zawartości próchnicy gleba jest mniej podatna na erozję wodną i wietrzną. Ukalska-Jaruga i in. [2015] podają, że materia organiczna immobilizuje (unieruchamia) zanieczyszczenia organiczne. Poza tym spełnia rolę ochronną spowalniającą ich rozprzestrzenianie i zmniejszającą ich dostępność, a także wykazuje zdolność do zatrzymywania metali ciężkich i pestycydów, co w efekcie ogranicza ich bioprzyswajalność przez rośliny uprawne [Pikuła, 2015]. Na zawartość materii organicznej w profilu glebowym wpływają bezpośrednio uziarnienie oraz stosunki wodne. W glebach lekkich, gdzie wody gruntowe nie przepływają, charakteryzują się mniejszą zasobnością w materię organiczną. Z kolei gleby torfowe czy czarne ziemie, o dużej zawartości wody, charakteryzują się największą jej zawartością [Kołacz, 2020]. Wśród czynników wpływających na jej ilość wymienia się również poziom intensywności uprawy, zmianowanie, nawożenie organiczne,

stosowanie poplonów i sposób użytkowania (leśne, łąkowe, rolnicze).

Ponieważ gleby w Polsce charakteryzują się niewielką zawartością próchnicy istotne znaczenie ma odpowiedni dobór roślin i sposób zagospodarowania plonu ubocznego. Z badań przeprowadzonych przez Domagałę [2017], na podstawie prób gleby pobranych na terenie województwa świętokrzyskiego wynika, że najmniejszą zawartością próchnicy charakteryzowały się gleby brunatne i bielcowe powstałe z piasków, natomiast największą mady, rędziny, czarnoziemy i czarne ziemie. Jej ilość mieściła się w przedziale od 1 do 7%. Średnia zawartość w glebach województwa świętokrzyskiego wynosiła około 1,83%. Jak podaje Pikuła [2015], ilość próchnicy w warstwie próchnicznej w Polsce waha się w przedziale od 31 do 96 t·ha⁻¹. W glebach brunatnych wynosi ona od 42 do 109 t·ha⁻¹, a w czarnoziemach mieści się w przedziale od 220 do 270 t·ha⁻¹. W Polsce gleby o niskiej zasobności w omawiany składnik nie przekraczają 1%, co stanowi około 6% użytków rolnych. Średnia ilość próchnicy mieszcząca się w przedziale od 1,1 do 2,0% występuje na połowie gleb użytkowanych rolniczo. Tereny, na których zawartość przekracza 2% stanowią 43% powierzchni użytków rolnych w Polsce.

W pracy Kołacza [2020] odnotowano, że zawartość materii organicznej w Polsce w 2015 roku kształtowała się średnio na poziomie 2,2%. Województwem o największej zasobności w omawianą materię, wynoszącą 3,04%, było dolnośląskie. Najmniej materii organicznej (1,83%) zawierały gleby województwa świętokrzyskiego. Średnia zawartość substancji organicznej w glebach naszego kraju wynosi około 2%. Areał gleb, na których ilość materii organicznej nie przekracza 2%, charakteryzuje się niewielką żyznością i nieodpowiednimi stosunkami wodno-powietrznymi. W tym przypadku niezbędne jest regularne stosowanie wapnowania i nawożenia takich gleb. Jak podaje Domagała [2017] do roślin, których uprawa skutkuje zmniejszeniem ilości substancji organicznej zaliczamy kukurydzę i okopowe. Gatunkami wzbogacającymi glebę w omawianą materię są bobowate i ich mieszanki z różnymi gatunkami traw. Zastosowanie obornika również determinuje wzrost zawartości materii organicznej. Wraz ze spadkiem jej zawartości obniża się żyzność gleby, co w konsekwencji prowadzi do zmniejszenia efektu plonotwórczego i pogorszenia jego jakości. Zatem przez odpowiedni dobór nawozów i roślin w płodozmianie oraz technikę uprawy, rolnik może wpływać na zawartość w glebie omawianej substancji [Pikuła, 2015]. Według Kołacza [2020], poza czynnikami antropogenicznymi, na zawartość materii organicznej wpływ wywierają także czynniki naturalne, np. temperatura i opady. W rejonach cieplejszych rozkład materii organicznej jest szybszy w porównaniu do tych o niższej temperaturze. Ponadto gleby w chłodniejszym klimacie charakteryzują się mniejszą jej zawartością. Na poziom materii organicznej wpływa również ilość opadów. Długotrwała susza prowadzi do zamierania mikroorganizmów glebowych, co skutkuje obniżeniem ilości próchnicy w glebie. Za optymalne uważa się wypełnienie

porów glebowych w 60%. W takich warunkach wzrasta produkcja biomasy, dzięki temu w glebie jest więcej fauny i flory. Rodzaj gleby i skała macierzysta to kolejne czynniki weryfikujące ilość materii organicznej. Pomiedzy zawartością frakcji ilastej, a zawartością materii organicznej w glebie występuje korelacja dodatnia. Na podkreślenie zasługuje fakt, że zawartość materii organicznej w glebach ilastych jest od dwóch do czterech razy większa od jej zawartości w glebach piaszczystych. Z kolei gleby wytworzone z materiału macierzystego o wysokiej zasobności w składniki pokarmowe, którego przykładem jest bazalt, charakteryzują się większą zawartością substancji organicznej w porównaniu do gleb powstałych z materiału granitowego. Ponadto na glebach o wyższej zawartości substancji organicznej plon roślin uprawnych jest wyższy, a co za tym idzie na polu pozostaje więcej resztek poźniwnych. Poza wyżej wymienionymi czynnikami na ilość substancji organicznej w glebie wpływa ukształtowanie terenu. U podnóży stoków i w zagłębieniach terenu dochodzi do gromadzenia próchnicy. Przyczyną tego zjawiska jest nagromadzenie spływającej wody i przenoszonej wraz z nią materii organicznej z nachylonych stoków na skutek procesu erozji i spływu. Zbocza północne charakteryzują się wyższą zawartością omawianego związku, w stosunku do tych o wystawie południowej, ponieważ panuje na nich niższa temperatura. Zasolenie gleby także wywiera istotny wpływ na poziom omawianej materii. Nieodpowiednia wartość pH, podobnie jak zasolenie i zawartość metali ciężkich, prowadzi do uzyskania niewielkiego plonu biomasy, co w konsekwencji prowadzi do obniżenia ilości resztek poźniwnych. Zarówno obszary silnie zakwaszone jak i silnie alkaliczne charakteryzują się niewielkim tempem rozkładu resztek organicznych z uwagi na niewielki poziom mikroorganizmów glebowych. Ponadto przy kwaśnym odczynie gleby zmniejsza się pobór makroelementów przez rośliny a wzrasta mikroelementów, w tym metali ciężkich. Zakwaszenie gleby wywiera zatem negatywny wpływ na wielkość plonu, obniżając pobranie azotu z gleby, który jest głównym pierwiastkiem plonotwórczym [Kołac, 2020]. Gatunek uprawianej rośliny to kolejny czynnik istotnie determinujący kumulowanie materii organicznej w glebie i powstawanie próchnicy. Do takich roślin zaliczyć można zboża i trawy. Jak podaje Pikuła [2019], według Międzynarodowego Zespołu ds. Zmian Klimatu, utrzymanie ilości substancji organicznej w glebie na dotychczasowym lub większym poziomie ma kluczowe znaczenie nie tylko ze względu na ochronę gleb, ale również z uwagi na zawartość w niej węgla organicznego. Na jego ilość kluczowy wpływ wywiera tempo procesu mineralizacji i dopływu nowego materiału organicznego. Od 40 do 70% substancji organicznej ulega procesowi mineralizacji w ciągu pierwszego roku od jej wprowadzenia. Pozostałe trudno rozkładalne resztki ulegają humifikacji w następnych latach. Według Kołacza [2020] poziom substancji organicznej w glebie jest uzależniony ilości zastosowanych nawozów, zwłaszcza azotowych. Dzięki ich użyciu następuje wzrost plonowania, a na polu pozostaje więcej resztek poźniwnych. Jak podaje Rusnak [2017] od 70 do 80% materii

organicznej w glebie stanowi próchnica, nazywana również humusem. Jej zawartość w glebach naszego kraju mieści się w przedziale od 0,6 do 6%, a wpływ na to ma, między innymi, uprawa roślin okrywowych. Rośliny te chronią glebę zarówno przed erozją wodną jak i wietrzną. Poza tym stanowią również pożytek dla owadów zapylających. Dzięki zwartemu łanowi zapobiegają nadmiernemu wzrostowi temperatury w glebie, chroniąc tym samym organizmy w niej występujące. Stosowanie obornika, podobnie jak gnojowicy, osadów ściekowych i kompostu, skutkuje wzrostem ilości substancji organicznej w glebie. Z kolei Kołacz [2020] zauważa, że zabieg ściółkowania determinuje zwiększenie ilości materii organicznej w glebie oraz zapobiega rozwojowi chwastów i erozji. Natomiast Rusnak [2017] wskazuje, że zawartość tego związku jest istotnie weryfikowana zmianowaniem. Powinno ono uwzględniać, tak jak przed laty, od 5 do 7 gatunków roślin. Jednak rosnący w Polsce, na przestrzeni ostatnich lat, udział wyspecjalizowanych gospodarstw w uprawie określonych gatunków roślin spowodował ograniczenie zmianowania do dwóch gatunków lub nawet uprawę zbóż po sobie. Prowadzi to w efekcie do zmniejszenia zawartości próchnicy w glebie. Zatem niezmiernie ważnym jest taki dobór gatunków roślin uprawnych, który zapewni wzrost ilości materii organicznej. Jej dodatni bilans w danym gospodarstwie rolnym świadczy o ułożeniu przez rolnika prawidłowego zmianowania. W przypadku gleb lekkich za optymalną uważa się uprawę co najmniej trzech gatunków. Na glebach ciężkich ilość uprawianych gatunków powinna wynosić od 4 do 5.

Jak podają Jaskulska i Urbanowski [2018], zastosowanie wieloletniego zróżnicowanego nawożenia naturalnego lub/i mineralnego weryfikuje istotnie odczyn gleby. Ochal [2015] podaje, że zakwaszenie gleby może być spowodowane stosowaniem nawozów fizjologicznie kwaśnych. Z badań przeprowadzonych przez tych pierwszych autorów wynika, że 53. letnie stosowanie nawożenia mineralnego w połączeniu z brakiem wapnowania doprowadziło do zmniejszenia wartości pH na ośmiu obiektach do poziomu poniżej 4. Przy tak niskiej wartości pH prawidłowy wzrost i rozwój roślin nie jest możliwy. Powodem tego, na co zwracają uwagę Petrosyan i Ślusarczyk [2019], może być stosowanie wysokich dawek nawozów azotowych w formie amonowej i saletrzanej oraz nawozów wieloskładnikowych z pominięciem wapnowania. Z czasem prowadzi to do zakwaszenia lub też zasolenia gleby. Podobnie jak zakwaszenie, zasolenie także wywiera na rośliny niekorzystny wpływ. Może ono utrudniać roślinie pobieranie wody oraz hamować fotosyntezę, prowadząc w efekcie do jej obumarcia [Korobko i Volkov, 2013].

Odczyn gleby jest ważnym parametrem informującym o jej jakości i wywiera istotny wpływ na zachodzące w niej procesy. Według Szczepaniaka [2022] cecha ta determinuje właściwości fizyczne, chemiczne i biologiczne gleby. Ujawnienie potencjału plonotwórczego roślin uprawnych jest możliwe wyłącznie przy optymalnym odczynie, który zapewnia ich prawidłowy wzrost i rozwój [Liu i in., 2010, Sisay i Sisay, 2019, Barłóg i in., 2020]. Poza tym przy wartości pH mieszczącej się w przedziale od 5,5 do 7,2 łatwiej jest

uzyskać strukturę gruzelkową gleby [Krysztoforski, 2019]. Wpływ na nią ma także rozwój systemu korzeniowego uprawianych roślin, a ten jest silniejszy po zastosowaniu wapnowania. Na podkreślenie zasługuje również fakt, że zabieg wapnowania oddziałuje pozytywnie na zwiększenie ilości przyswajalnych form fosforu, dla którego optymalne wartości pH gleby powinny mieścić się w przedziale od 5,6 do 7,2. Na glebach lekkich największa przyswajalność fosforu występuje przy wartości pH 5,6, a na ciężkich za optimum uznaje się wartość pH na poziomie 7,0 [Ochal, 2019]. Ponadto wnoszony do gleby wapń tworzy związki z kwasami huminowymi, które oddziałują pozytywnie na cechy agregatów glebowych, takich jak porowatość, pojemność wodna oraz wodoodporność. Według Górskiego [2020] powstawaniu agregatów glebowych sprzyja duża zawartość kationów magnezu i wapnia w kompleksie sorpcyjnym. Odpowiednia struktura gleby determinuje z kolei łatwiejszą jej uprawę mechaniczną. Wpływa także korzystnie na stosunki wodno-powietrzne, a dostęp tlenu do korzeni uprawianych roślin jest łatwiejszy. Zapobiega również tworzeniu się zastoisk wody odprowadzając jej nadmiar. Gleba o optymalnej strukturze charakteryzuje się dużą zdolnością do magazynowania wody. Spoiwem dla agregatów glebowych są kwasy próchniczne, śluz bakteryjny, minerały ilaste oraz mineralno-organiczne koloidy wysyczone wapnem. Przy optymalnej strukturze gleby agregaty są trwałe, a pod wpływem sił zewnętrznych ulegają rozpadowi na mniejsze gruzelki [Szczepaniak, 2022]. Według tego autora odczyn gleby determinuje także jej właściwości chemiczne, takie jak toksyczność glinu, którego zawartość w skorupie ziemskiej wynosi 7,96%. Pierwiastek ten jest obecny w glebie w formie glinokrzemianów, muskowitu, kaolinitu, montmorylonitu, alunitu, kriolitu, korundu, gipsytu i boksytu. Jego najbardziej toksyczną formą jest Al^{3+} . Toksyczność tej formy zaczyna się ujawniać przy wartości pH mieszającej się w przedziale od 5,8 do 5,5. Przy spadku wartości pH gleby do 4,7 dochodzi do gwałtownego wzrostu toksyczności wyżej wymienionego pierwiastka.

Zakwaszenie gleb, występujące w przeważającej części naszego kraju, jest efektem dominacji opadów nad parowaniem. Stanowi ono główny czynnik ograniczający produktywność gleb w Polsce [Ochal, 2015]. Według Krysztoforskiego [2019] klimat przejściowy występujący w Polsce sprzyja zakwaszaniu gleby, które skutkuje obniżeniem dostępności składników pokarmowych niezbędnych dla roślin. Wraz ze wzrostem kwasowości maleje przyswajalność makroelementów a wzrasta mikroelementów, w tym metali ciężkich. Odczyn gleby wywiera również istotny wpływ na formę, w jakiej metale ciężkie występują w glebie. Wszystkie metale ciężkie stają się toksyczne, gdy występują w nadmiarze w formie przyswajalnej. Po przekroczeniu dopuszczalnych zawartości działają toksycznie na rośliny, kumulują się w nich, a w konsekwencji wraz z pożywieniem przedostają się do organizmu ludzkiego, stanowiąc dla niego duże zagrożenie [Rosada i Przewocka, 2016, Górka i in., 2017, Kuziemska i in., 2017, Ławcewicz, 2017].

Na zawartość składników pokarmowych w glebie, a co za tym idzie

ich przyswajalność dla roślin, oprócz wyżej wymienionych, mają również wpływ inne czynniki. Wśród nich wymienić można, m.in. rodzaj skały macierzystej, gatunek i rodzaj gleby, zabiegi agrotechniczne stosowane na polu, płodozmian, gatunek uprawianych roślin, dawkę i rodzaj aplikowanego nawożenia, a także sposób zagospodarowania resztek poźniwnych. Z kolei nawożenie mineralne wywiera istotny wpływ na skład chemiczny gleby, liczebność mikroorganizmów glebowych, a także odczyn gleby [Stępień i in., 2018]. Według Bilskiego i Pikosza [2020], od rodzaju płodozmianu zależy zawartość składników pokarmowych w glebie, zwłaszcza azotu uważanego za główny pierwiastek plonotwórczy. Dzięki obecności gatunków posiadających zdolność wiązania azotu atmosferycznego możliwe jest wzbogacenie gleby w ten składnik. Ponadto odpowiednio ułożony płodozmian daje możliwość zredukowania ilości nawozów mineralnych [Cwojdzński i Nowak, 2002, Bilski i Pikosz, 2020, Laamrani i in., 2020]. Kolejną zaletą jest ograniczenie występowania chorób roślin wynikających z wieloletniej uprawy w monokulturze. Jak podają Bleharczyk i in. [2018], długoletnia uprawa jęczmienia jarego w monokulturze skutkowałą zwiększeniem porażenia roślin przez zgorzel podstawy źdźbła i korzeni o 52% w stosunku do obiektów, na których stosowano zmianowanie. W wyżej wymienionych badaniach zaobserwowano również obniżenie o 20,6% plonu jęczmienia jarego w stosunku do plonu pochodzącego z obiektów zmianowanych. W przypadku ziemniaka plon na obiektach uprawianych w wieloletniej monokulturze był o 41,8% niższy od uzyskanego na obiektach, gdzie zastosowano zmianowanie. Jak podają Marks i in. [2018], monokulturę należy uznać za skrajne odstępstwo od racjonalnego uprawiania roślin. Tylko dzięki płodozmianowi możliwe jest utrzymanie produktywności gleby na odpowiednim poziomie. Ilość i rodzaj zastosowanych zabiegów agrotechnicznych nie tylko wpływa na skład chemiczny, poziom materii organicznej, ale również opłacalność produkcji. Dzięki uprawie bezorkowej zwiększeniu ulega ilość mikroorganizmów glebowych. Kolejną zaletą tego systemu gospodarowania jest poprawa struktury i porowatości gleby oraz zmniejszenie jej przesuszania. Resztki poźniwne stanowią nie tylko źródło materii organicznej w glebie, ale również dostarczają makro- i mikroelementów niezbędnych roślinom następczym dla prawidłowego wzrostu i rozwoju. Jak podaje Kukwa [2016], odpowiednikiem 1,55 tony suchej masy słomy jest 1 tona suchej masy obornika.

2.3. ŹRÓDŁA I TOKSYCZNOŚĆ METALI CIĘŻKICH

Według Żurka i Prokopiuka [2011], Kuziemskiej i in. [2017] oraz Yoboueta i in. [2010] do metali ciężkich występujących najczęściej w środowisku glebowym zaliczamy arsen, cynk, kadm, miedź, ołów i rtęć. Źródłem wymienionych zanieczyszczeń są głównie samochody, ponieważ paliwa

używane w Unii Europejskiej charakteryzują się wysoką zawartością chromu, kadmu i ołowiu. Z badań próbek gleby pobranych wzdłuż dróg wynika, że 32% zanieczyszczeń stanowią tlenki siarki, 22,2% tlenki azotu, 20,2% organiczne związki chemiczne, a tlenki węgla i pyły to 18,7%. Jednym z czynników wpływających na wzrost przyswajalności metali ciężkich są kwaśne deszcze [Kabata-Pendias, 2000, Franco-Uría i in., 2009, Barłóg i in., 2020]. Głównymi czynnikami ich powstawania są przenikające do atmosfery tlenki siarki i azotu. Źródłem kwaśnych deszczy są zanieczyszczenia atmosfery, które tworzą się w wyniku rozpuszczania siarki i tlenków azotu w powietrzu w wodzie deszczowej. Z SO_2 powstaje ostatecznie kwas siarkowy - H_2SO_4 . W Polsce tego typu zanieczyszczenia występują w glebie lokalnie, głównie na obszarach przemysłowych w pobliżu źródeł emisji.

Jak podają Kończak-Konarska i Kuziak [2018] metale ciężkie trafiają do gleby z opadami atmosferycznymi, środkami ochrony roślin i nawozami, głównie mineralnymi. Do najbardziej zanieczyszczonych należą nawozy fosforowe, wapniowe, potasowe i azotowe. Czynnikiem decydującym o ich zawartości w nawozie jest surowiec, z którego są one wytwarzane a także proces technologiczny, prowadzący do ich powstania [Ochal i Smreczak, 2020]. Według Petrosyan i Ślusarczyk [2019] nawozy zawierają także pierwiastki promieniotwórcze, takie jak uran 238 oraz polon 210. Aby zapobiec kumulacji metali w plonie głównym konieczne jest wapnowanie, które w naszym kraju jest potrzebne na około 74% gleb uprawnych [Ochal i Smreczak, 2020].

Do metali ciężkich zaliczamy pierwiastki, których masa właściwa wynosi powyżej $4,5 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-1}$, a ich cechą charakterystyczną jest zdolność do oddawania elektronów, co w konsekwencji skutkuje powstaniem prostych kationów [Górka i in., 2017, Terzić i in., 2019]. Glebami najbardziej wrażliwymi na ten rodzaj zanieczyszczeń są te ubogie w wodę i składniki pokarmowe. Wprowadzenie do gleby azotu i siarki skutkuje jej zakwaszeniem, a to z kolei prowadzi do wzrostu dostępności metali dla roślin. Podobne wyniki uzyskali Rutkowska i in. [2015] stwierdzając, że długotrwała aplikacja nawozów azotowych i potasowych jest przyczyną wzrostu zawartości rtęci w glebie.

Nagromadzenie się metali ciężkich w roślinach przeznaczonych do konsumpcji stanowi zagrożenie dla ludzi i zwierząt. Według Wiechuły i in. [2012] na przestrzeni ostatnich lat coraz więcej uwagi poświęca się badaniu składu chemicznego roślin używanych w przemyśle kosmetycznym i farmaceutycznym oraz przeznaczonych do spożycia. Badania te prowadzi się w celu zapobieżenia przenikaniu metali ciężkich do organizmu ludzkiego. W ostatnim czasie odnotowuje się wzrost skażenia gleby metalami ciężkimi. Do najbardziej toksycznych spośród nich zaliczamy m.in.: ołów, kadm, chrom i nikiel, które kumulując się zmniejszają jej rolniczą przydatność. Z uwagi na niewielką podatność wymywania niezbędnym jest monitorowanie ich zawartości w glebie [Kończak-Konarska i Kuziak, 2018]. Zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Środowiska w sprawie standardów jakości gleby i standardów jakości ziemi z dnia 9 września 2002 roku z późniejszymi

zmianami, wyróżniamy 6 stopni zanieczyszczenia gleby metalami ciężkimi. Do stopnia 0 zaliczmy gleby niezanieczyszczone, o naturalnej zawartości metali ciężkich, które można dowolnie wykorzystywać. Stopień I stanowią gleby, w których zawartość ta jest podwyższona. Można przeznaczać je pod uprawę, za wyjątkiem produkcji warzyw dla dzieci. Stopień II stanowią gleby słabo skażone, nie można uprawiać na nich warzyw, takich jak sałata, szpinak czy kalafior. Ustawodawca dopuszcza na nich uprawę zbóż, a także roślin okopowych i pastewnych. Stopień III stanowią gleby o średnim poziomie zanieczyszczenia. Roślinami zalecanymi do uprawy na tych glebach są trawy i rośliny przemysłowe. Możliwa jest na nich także uprawa zbóż i okopowych, ale wyłącznie pod warunkiem kontroli stężenia ich zawartości w częściach przeznaczonych do spożycia. Stopień IV to grunty silnie skażone i tego typu tereny powinny być z produkcji wyłączone i przeznaczane pod zalesienie. Na glebach o wyższej klasie bonitacyjnej dopuszczalna jest uprawa wikliny, konopi i lnu. Można na nich wytwarzać również materiał siewny traw i zbóż.

Jak podają Górka i in. [2017], ołów i kadm ze względu na wpływ jaki wywierają na środowisko, zaliczane są do grupy o najwyższym stopniu zagrożenia. Naturalna zawartość ołowiu w glebach Polski wynosi średnio $18 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, natomiast na gruntach rolnych - $14 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ [Szymoniak, 2016]. Według Wikarek-Paluch i Rosik-Dulewskiej [2020] obecny w glebie ołów pochodzący z minerałów i skał nazywamy „pierwotnym”. Z kolei „wtórny ołów” powstaje na skutek przekształcenia pierwiastków radioaktywnych, takich jak tor i uran. Zarówno utwory ilaste jak i skały magmowe o kwaśnym odczynie charakteryzują się większą zawartością omawianego pierwiastka w porównaniu do ilości w osadach węglanowych i skałach magmowych cechujących się odczynem zasadowym. Cechą charakterystyczną ołowiu jest jego duże powinowactwo do siarki. W glebie obecny jest jako trwałe związki dwuwartościowy oraz silny czterowartościowy utleniacz. Źródłami tego metalu ciężkiego w glebie są pożary, erupcje wulkanów, ruch uliczny, hutnictwo, górnictwo i rolnictwo. Jak podaje Szymoniak [2016], toksyczne działanie ołowiu ujawnia się przy dużej zawartości tego pierwiastka w glebie, czyli powyżej $500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. Polega ono na blokowaniu rozwoju mikroorganizmów, a to z kolei prowadzi do zaburzenia procesu rozkładu materii organicznej. Obniżona aktywność drobnoustrojów oddziałuje negatywnie na odporność roślin. Jak podają Wróblewska-Borek [2015], a także Górka i in. [2017] czynnikiem, który istotnie wpływa na ilość pobranych metali ciężkich jest gatunek rośliny. Najwięcej metali ciężkich kumulują te z nich, które charakteryzują się krótkim okresem wegetacji. Metale ciężkie pobierane są pod postacią wolnych jonów. Na podkreślenie zasługuje fakt, że poszczególne części rośliny różnią się ich zawartością. Nasiona uważane są za tę część, która gromadzi ich najmniej w przeciwieństwie do liści i korzeni. Wysoka ilość ołowiu zaburza fotosyntezę prowadząc do obniżenia plonu [Kończak-Konarska i Kuziak, 2018]. Do pierwiastków hamujących pobieranie tego metalu ciężkiego należy wapń, fosfor i siarka [Szymoniak, 2016]. Ołów

jest toksyczny dla człowieka, przenika do krwi a stamtąd do kości i tkanek miękkich. Do organizmu ludzkiego pierwiastek ten trafia przez układ pokarmowy i oddechowy. W organizmie łączy się z DNA i RNA oraz enzymami zaburzając procesy, które w nim zachodzą. Poza tym utrudnia wchłanianie jodu i wapnia, prowadzi do uszkodzenia mózgu i nadciśnienia [Ławcewicz, 2017]. By zmniejszyć ilość ołowiu w pożywieniu należy myć dokładnie owoce i warzywa, nie konsumować produktów z nieznanego źródła, obrywać liście znajdujące się na powierzchni warzyw [Szymonik, 2016]. Gleby różnią się między sobą zawartością omawianego pierwiastka. Z badań przeprowadzonych przez Górkę i in. [2017] wynika, że największą zawartość ołowiu, wynoszącą $0,0088 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$, odnotowano przy ulicy. W próbach glebowych pobranych z terenów leśnych Doliny Kluczwoły zawartość tego metalu ciężkiego była niższa od odnotowanej w próbach pobranych w sąsiedztwie jezdni. Na podkreślenie zasługuje fakt, że na roślinach pobranych z terenu o podwyższonej ilości omawianego metalu ciężkiego nie zaobserwowano zmian. Zatem zawartość ołowiu nie wywierała wpływu na rozwój roślin.

Zawartość kadmu w glebach Polski wynosi około $0,2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ [Kończak-Konarska i Kuziak, 2018]. Jak podają Wikarek-Paluch i Rosik-Dulewska [2020], omawiany pierwiastek występuje w przyrodzie zarówno pod postacią dwuwartościową, jak i jonów kompleksowych takich jak CdOH^+ , CdCl , $\text{Cd}(\text{OH})_4^{2-}$ a także CdHCO_3 . Jest to pierwiastek, który nawet w niskim stężeniu wykazuje właściwości toksyczne [Kaczyńska i in., 2015]. Jego źródła w glebie podzielić można na naturalne i antropogeniczne. Do naturalnych należą m.in.: wybuchy wulkanów, erozja skał a także pożary lasów. Antropogeniczne to pyły z przemysłu oraz składowanych odpadów, a także osady ściekowe używane w nawożeniu. Z badań przeprowadzonych przez Górkę i in. [2017] wynika, że zawartość kadmu w glebie pobranej przy niezbyt ruchliwej ulicy wynosiła ($0,0158 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$). Największą mobilność wykazuje on przy wartości pH mieszczącej się w granicach od 4,5 do 5,5. Przystawalność kadmu jest odwrotnie proporcjonalna do alkaliczności gleby. Ten ciężki metal jest łatwo pobierany przez rośliny [Kończak-Konarska i Kuziak, 2018, Wikarek-Paluch i Rosik-Dulewska, 2020] i wchłaniany zazwyczaj pod postacią jonu Cd^{2+} [Górka i in., 2017]. Organem, który jako pierwszy styka się z występującymi w glebie zanieczyszczeniami jest korzeń. Konsekwencją tego są zaburzenia w jego wzroście i rozwoju. Jak podaje Szymoniak [2016] na tę część rośliny przypada zazwyczaj 95% całkowitej zawartości zanieczyszczeń. Kaczyńska i in. [2015] wskazują, że gdy wartość pH gleby przekracza 7,0 pierwiastek ten tworzy kompleks niedostępny dla roślin. Kadm zaburza działanie błon komórkowych i gospodarkę wapnia, uszkadza także DNA. W pobliżu terenów zurbanizowanych dużą jego zawartością charakteryzują się szpinak, warzywa korzeniowe, zboża i sałata. Zgodnie z Rozporządzeniem Komisji (UE) NR 488/2014 z dnia 12 maja 2014 r. (WE) nr 1881/2006, w odniesieniu do ziemniaków i roślin bulwiastych nie może być większa niż $0,1 \text{ mg kg}^{-1}$ św.m.

Według Wikarek-Paluch i Rosik-Dulewskiej [2020], roślinami o największej wrażliwości na toksyczne działanie kadmu są motylkowe. Do organizmu ludzkiego kadm dostaje się zarówno drogą pokarmową, jak i oddechową, a jego działanie jest kancerogenne [Kaczyńska i in., 2015]. W obecności miedzi, białka czy cynku jego kumulacja w organizmie jest mniejsza.

Chrom jest pierwiastkiem, którego zawartość w glebie wynika zazwyczaj z jego naturalnej zawartości w skale macierzystej, która waha się w granicach od 7 do 150 mg·kg⁻¹. W gliniastych glebach Polski średnia zawartość tego pierwiastka wynosi 40 mg·kg⁻¹, w piaszczystych to około 30 mg·kg⁻¹ [Kończak-Konarska i Kuziak 2018]. Według Wikarek-Paluch i Rosik-Dulewskiej [2020], glebami o największej zawartości omawianego pierwiastka są rędziny, które zawierają średnio 83 ppm. W gliniastych zawartość ta wynosi około 40 ppm. Najmniejszą ilością chromu odznaczają się gleby piaszczyste. Gleby ciężkie zawierają średnio 24 ppm wymienionego metalu ciężkiego, średnie 15 ppm a piaszczyste około 7 ppm. Pierwiastek ten obecny jest w glebie jako Cr³⁺ i Cr⁶⁺. Pierwszy z wymienionych charakteryzuje się niewielką rozpuszczalnością. Dla porównania Cr⁶⁺ łatwo rozpuszcza się zarówno w środowisku zasadowym jak i kwaśnym. Do naturalnych źródeł zanieczyszczeń tym pierwiastkiem zaliczamy wybuchy wulkanów a także wietrzenie skał. Do antropogenicznych zaliczamy m.in.: spalanie paliw kopalnych, przemysł metalurgiczny, odpady z produkcji farb, skór oraz galwanizerni [Kończak-Konarska i Kuziak, 2018]. Oprócz wymienionych, źródłami chromu w glebie mogą być także opady oraz coraz częściej stosowane do nawożenia osady ściekowe. Największe stężenie omawianego metalu ciężkiego występuje w warstwie od 0 do 20 cm [Wikarek-Paluch i Rosik-Dulewska, 2020]. Jak podają Dębski i in. [2016] zawartość chromu w zbożach uzależniona była od odmiany. W świeżej masie rutwicy wschodniej wynosiła ona średnio 0,16 mg·kg⁻¹. Czynnikiem różnicującym zawartość tego metalu ciężkiego była faza rozwojowa rutwicy. Z kolei średnia zawartość tego pierwiastka w świeżej masie zielonki z kukurydzy wynosiła 1,57 mg·kg⁻¹ a w liściach buraka pastewnego to 1,22 mg·kg⁻¹. Według Wikarek-Paluch i Rosik-Dulewskiej [2020] korzenie, liście i łodygi charakteryzują się największą ilością tego metalu ciężkiego. Na podkreślenie zasługuje fakt, że mimo obecności w roślinie nie gromadzi się on w nasionach i ziarnie. Największe ilości kumulują się w wegetatywnych częściach nadziemnych oraz w korzeniu. W roślinach zbożowych nie jest transportowany do nasion i ziarna zbóż. W przypadku roślin wrażliwych na jego obecność już przy zawartości w glebie na poziomie 2 ppm dochodzi do więdnienia, chlorozy oraz zaburzeń wzrostu korzeni. Za bardziej szkodliwy uważa się chrom, który trafia do organizmu podczas procesu oddychania. Do charakterystycznych symptomów zatrucia Cr (IV) należą alergię skórne a także zaburzenia oddychania i pracy układu krążenia.

Podobnie jak w przypadku chromu, ilość niklu w glebie często wynika z jego naturalnej zawartości w skale macierzystej [Majchrowska-Safaryan,

2015]. Rośliny uprawne pobierają go z łatwością [Brodowska, 2021]. Ilość pobranego niklu jest uzależniona także od gatunku, odmiany, zawartości w glebie, odczynu oraz zastosowanego nawożenia [Ociepa, 2011]. Według Kalembasy i in. [2014] kation Ni^{2+} uważany jest za formę najbardziej toksyczną. Według Wikarek-Paluch i Rosik-Dulewskiej [2020], w środowisku pierwiastek ten jest obecny pod postacią od pierwszego do czwartego stopnia utlenienia. Największą zawartością niklu, wynoszącą od 1400 do 2000 ppm, charakteryzują się skały ultrazasadowe. W glebach zasadowych waha się ona w przedziale od 130 do 160 ppm. W utworach skalistych o kwaśnym odczynie, takich jak granit, jego ilość wynosi od 5 do 15 ppm, a w ilastych nie przekracza 90 ppm. Na skutek wietrzenia dochodzi do przekształcenia niklu w jego najbardziej toksyczną formę Ni^{2+} , która w glebie może przemieszczać się na duże odległości lub tworzyć związki z manganem i żelazem. Gleby lekkie zawierają około 5 ppm tego metalu ciężkiego, średnie około 11 ppm, a ciężkie około 22 ppm. Jak podają Kończak-Konarska i Kuziak [2018], na gruntach o wysokiej zawartości kobaltu i żelaza ilość tego metalu ciężkiego jest wysoka. Zawartość niklu w polskich glebach waha się w granicach od 1 do 50 $mg \cdot kg^{-1}$ [Majchrowska-Safaryan, 2015]. Kończak-Konarska i Kuziak [2018], na podstawie wyników przeprowadzonych badań podają, że mieści się ona w przedziale od 4 do 50 $mg \cdot kg^{-1}$ gleby a jego średnia zawartość wynosi 7,4 $mg \cdot kg^{-1}$. Antropogenicznymi źródłami niklu są nawozy, spalanie kopalni a także przemysł metalurgiczny [KOBiZE 2019]. Według Kończak-Konarskiej i Kuziak [2018] wpływ niklu na rośliny nie został jeszcze w pełni poznany. Jego toksyczne działanie przejawia się nieprawidłowościami w procesie transpiracji, fotosyntezy oraz wiązania azotu. Według Wiechuły i in. [2012] omawiany pierwiastek jest konieczny roślinom do prawidłowego funkcjonowania. Jest jednym ze składników budujących centrum aktywne ureazy. Bez niego pobieranie mocznika przez rośliny jest niemożliwe ponieważ stanowi budulec enzymu, który jest odpowiedzialny za hydrolizę mocznika oraz metabolizm jego pochodnych. Nikiel uczestniczy także w procesie wiązania azotu atmosferycznego. Jest także składnikiem hydrogenazy. Objawami jego niedoboru są nekroza wierzchołków liści i nagromadzenie mocznika w komórkach. Podobnie jak w przypadku niedoboru, nadmiar także szkodzi roślinom. Na ilość obecnych w glebie przyswajalnych form tego pierwiastka wpływa wiele czynników, do których zaliczyć można odczyn gleby, ilość materii organicznej oraz obecność innych pierwiastków. Efektem nadmiaru omawianego metalu ciężkiego jest chloroza wynikająca z zablokowania enzymów, takich jak katalaza czy peroksydaza, w skład których wchodzi żelazo. Poza tym zauważalny jest spadek ilości chlorofilu i zaburzenia w procesie fotosyntezy, wywołane negatywnym wpływem niklu na transport elektronów. Zbyt duża zawartość niklu determinuje niedorozwój korzeni i zahamowanie ich wzrostu, przedwczesne zrzucanie liści a także nekrozę oraz brak wschodów [Kalembasa i in., 2014]. Jak podaje Brodowska [2021] ilość tego pierwiastka w organach roślin mieści się w przedziale od 0,1 do 1

mg·kg⁻¹ s.m. Roślinami charakteryzującymi się stosunkowo dużym jego zapotrzebowaniem są bobowate a także te, które są nawożone azotem w formie amidowej. Najwyższą jego zawartością, dochodzącą do 3%, odznaczają się hiperakumulatory. Stosunkowo niedawno, bo w latach 80-tych stwierdzono, że ten mikroelement jest niezbędny dla roślin. Zbyt wysoka zawartość niklu w organizmie człowieka wykazuje działanie kancerogenne, może doprowadzić do zaburzenia pracy mózgu, wątroby i nerek, reakcji alergicznych, do zwłóknienia płuc oraz uszkodzenia układu sercowo-naczyniowego [Wiechuła i in., 2012]. Pierwiastek ten charakteryzuje się dużą ruchliwością, co prowadzi do jego nagromadzenia się zarówno w owocach jak i nasionach. Szereg koncentracji niklu w roślinach uprawnych przedstawiono w następujący sposób: zboża < fasola < kukurydza < burak cukrowy. Jak podają Kluk i Steliga [2016], aby oczyścić glebę z nadmiernej ilości niklu wykorzystuje się gatunki roślin wykazujące zdolność fitoremediacji. Roślinami, które są hiperakulatorami i naftofitami to nostrzyk lekarski, sałata lodowa i kostrzewa trzcinowa. Z badań przeprowadzonych przez Wiechułę i in. [2012] nad kumulacją niklu w roślinach pokrzywy wynika, że największą zawartością omawianego pierwiastka charakteryzowały się próby pochodzące z lasu w Pstrążnej. Zawartość ta wynosiła 6,71 µg·g⁻¹ s.m. Natomiast najmniejszą ilość odnotowano w pokrzywach zebranych na terenach przemysłowych w Czechowicach-Dziedzicach i było to 4,54 µg·g⁻¹ s.m. Statystycznie potwierdzono istotność różnic, które prawdopodobnie były spowodowane zakwaszeniem gleby leśnej. Wartość pH na tym terenie wynosiła 5,27. Dla porównania w Czechowicach-Dziedzicach było to 6,89. Tak wysoka zawartość tego metalu ciężkiego w pokrzywach z dala od źródła emisji na terenach leśnych jest bardzo niepokojąca. Długotrwałe spożywanie skażonego surowca może prowadzić do zwiększenia się zawartości niklu w organizmie. Wikarek-Paluch i Rosik-Dulewska [2020] podają, że największą zawartość omawianego pierwiastka wykryto w roślinach uprawianych w rejonie zakładów hutniczych. Z badań przeprowadzonych przez Wiechułę i in. [2012] w Czechowicach-Dziedzicach wynika, że naturalna całkowita zawartość niklu w glebie wynosiła 25 mg·kg⁻¹ s.m. Natomiast ilość przyswajalnych form tego pierwiastka na terenie badanej miejscowości wynosiła 5,74 µg·g⁻¹ s.m.. Wynika to z emisji zanieczyszczeń przez przemysł. Na terenach leśnych w pobliżu wymienionego miasta wartość ta była niższa i osiągnęła poziom 4,56 µg·g⁻¹ s.m.. Prawdopodobnie było to spowodowane sąsiedztwem pól uprawnych.

Omawiając temat zawartości metali ciężkich w glebie nie można zapomnieć o roślinach wykazujących zdolność fitoremediacji. Jak podają Astel i in. [2019] pojęcie to jest stosunkowo nowe. Po raz pierwszy zostało użyte przez Ilya Raskina z Rutgers University w 1991 roku. Pochodzi ono od greckiego słowa „phyton”, czyli roślina i łacińskiego „remedium” - naprawiać. Sadzenie takich gatunków na terenach zanieczyszczonych stanowi sposób na usunięcie zanieczyszczeń z gleby przy niewielkich nakładach finansowych. Według Kutrowskiej i in. [2016], proces fitoekstrakcji zachodzi

dzięki naturalnym lub stymulowanym zdolnościom gatunku do pobierania z gleby metali ciężkich. Cechą charakterystyczną omawianych roślin jest zdolność pochłaniania dużej ilości zanieczyszczeń z gleb zdegradowanych i szybki przyrost biomasy. Obecnie prowadzonych jest wiele badań nad przydatnością różnych gatunków roślin w procesie fitoremediacji. Rosnąca liczba ludności, a także postępujący rozwój produkcji przemysłowej wywierają negatywny wpływ na środowisko, prowadząc do nagromadzenia w nim toksycznych substancji. Postępujące zanieczyszczenie środowiska wywiera niekorzystny wpływ zarówno na ludzi jak i zwierzęta, zmuszając do poszukiwania alternatywnych sposobów usuwania zanieczyszczeń. Dzięki fitoremediacji możliwe jest usunięcie z gleby wielu zanieczyszczeń. Kapustne, trawy a także rośliny motylkowate wykazują zdolność akumulacji zanieczyszczeń. W omawianym procesie kluczowe znaczenie odgrywa usunięcie biomasy z pola, aby nie doszło do emisji wtórnej. Roślinami przydatnymi do usuwania z gleby metali ciężkich są także kukurydza oraz perz zwyczajny. Do oczyszczania gleby można również stosować wykę, łubin i peluszkę. Metodą powszechnie używaną do oczyszczania skażonych gruntów jest fitoekstrakcja. Dzięki zastosowaniu w/w techniki można usunąć z gleby nie tylko metale ciężkie, ale również pierwiastki radioaktywne i związki nieorganiczne. Jak podają Grobelak i in. [2010], gromadzenie zanieczyszczeń u gatunków wykazujących zdolność hiperakumulacji jest od 100 do 1000 razy większe w porównaniu do rosnących na terenach nie zdegradowanych i od 10 do 100 razy większe, w porównaniu z gatunkami rosnącymi na gruntach skażonych. Gatunki, które mające zostać zastosowane do rekultywacji zdegradowanej gleby muszą charakteryzować się intensywnym wzrostem, odpornością na zanieczyszczenia, a także zdolnością do ich hiperakumulacji. Gatunkiem wykazującym dużą zdolność do gromadzenia cynku jest tasznik. Dzięki fitoekstrakcji w ciągu jednego roku można usunąć z gleby od 180 do 530 kg Pb·ha⁻¹. Stwierdzono również, że dodatek rizobakterium i chelatorów, a także uprawa współrzędna prowadzą do zwiększenia efektywności procesu fitoekstrakcji [Kutrowska i in., 2016]. Największe pobranie ołowiu, kadmu i cynku odnotowano przy współrzędnej uprawie lucerny i gorczycy. Według Mierek-Adamskiej i in. [2009], dzięki inżynierii genetycznej możliwe jest stworzenie rośliny idealnej do fitoekstrakcji (np. transfer genu MT z rzodkiewnika pospolitego do wyki skutkuje wzrostem jej tolerancji na kadm).

2.4. MAKRO- I MIKROELEMENTY W ROŚLINIE I ICH ROLA

Efekt plonotwórczy i jakość uzyskanego surowca w uprawie roślin jest determinowana wieloma czynnikami, w tym zawartością składników pokarmowych w glebie. Ich niedobór lub nadmiar może skutkować naruszeniem równowagi jonowej w środowisku glebowym, a w konsekwencji również w roślinach. Zawartość składników odżywczych w glebie może być

regulowana poprzez nawożenie naturalne, organiczne i mineralne. Wprowadza się z nimi niezbędne makro- i mikroelementy oraz materię organiczną, które mają duże znaczenie plonotwórcze dla uprawianych roślin jak i uzyskanej, pożądanej przez producenta-rolnika, optymalnej wartości cech jakościowych zebranego surowca [Dick i in., 2016, Barczak i in., 2017, Bečka i in., 2024]. Zapewniając zatem roślinom uprawnym w trakcie wegetacji odpowiednią ilość składników mineralnych, można się spodziewać wysokiego plonu i odpowiedniej jego jakości. Wśród niezbędnych pierwiastków odżywczych można wyróżnić makroskładniki, tj.: azot, fosfor, potas, siarka, wapń, magnez oraz mikroskładniki (często niedoceniane, choć są, m.in., niezastąpione w wielu procesach metabolicznych), tj.: żelazo, mangan, miedź, cynk, bor i molibden [Szulc i in., 2007, Kocoń, 2014, Pikula, 2020, Ochal, 2015, Wach, 2020, Korzeniowska i in., 2020, 2021].

Głównym składnikiem plonotwórczym jest azot, którego zawartość w glebach Polski waha się w granicach od 0,02 do 0,35%. Najłatwiej przyswajalny jest azot amonowy (NH_4^+), na glebach o obojętnym odczynie, czyli typowa forma przedsiwina [Kalinowski, 2018b]. Do roślin, które lepiej wykorzystują tę formę zaliczamy głównie kukurydzę i ziemniaki [Kalinowski, 2018a]. Jon amonowy wchodzi w skład chlorofilu, kwasu nukleinowego i białek oraz odgrywa istotną rolę w procesie krzewienia, a także rozwoju systemu korzeniowego [Kalinowski, 2018a]. Wykorzystywany jest przez rośliny uprawne w około 50%. Pozostała jego część może ulec denitryfikacji, czyli utlenieniu i trafić do atmosfery lub przedostać się w głąb gleby, poza zasięg systemu korzeniowego, powodując zanieczyszczenie wód gruntowych. Azot ten wykorzystują również mikroorganizmy bytujące w glebie. Według Gaj [2013] o przyswajalności omawianego jonu przez rośliny uprawne decydują zawartości potasu i wapnia w glebie. Obserwowane malejące ich zużycie w dalszej perspektywie może doprowadzić do braku stabilności plonowania głównych roślin uprawnych. Stosowanie nadmiernej ilości azotu nie przekłada się na wzrost plonu, lecz prowadzi w konsekwencji do zanieczyszczenia wód gruntowych i atmosfery lub kumulacji w glebie. Zatem oczywistym jest, że nawożenie należy dawkować w taki sposób, by ograniczyć do minimum straty składników pokarmowych, nie tylko ze względu na środowisko, ale także koszty. Można to osiągnąć dokonując bilansu składników nawozowych.

Na plonowanie i jakość roślin uprawnych w dużej mierze decyduje fosfor. Jego zawartość w wierzchniej warstwie gleby wynosi od 0,01 do 0,20%. Uczestniczy on w procesach metabolicznych zachodzących w roślinie, jest składnikiem DNA (kwasu deoksyrybonukleinowego) i ATP (adenozynotryfosforanu). Z uwagi na fakt, że zasoby tego składnika nie są odnawialne, może on w przyszłości stać się głównym pierwiastkiem ograniczającym plonowanie [Ochal, 2015]. Fosfor pobierany jest przez rośliny głównie w postaci kwasu ortofosforowego H_2PO_4^- . Z badań przeprowadzonych przez Rutkowską i Rusaka [2020] w latach 2008-2016 wynika,

że województwami o najwyższej zawartości fosforu w glebie są wielkopolskie, śląskie, opolskie i kujawsko-pomorskie. Za wyjątkiem województwa małopolskiego, w którym dominowały gleby o niskiej i bardzo niskiej zawartości w omawiany składnik, na terenie pozostałej części kraju średnia ilość fosforu, w latach 2008-2016, mieściła się w wysokiej klasie zawartości. Jak podaje Klaczyński [2015] ponad 90% fosforu pochodzi ze złóż w Maroku, na Sacharze, w Chinach i USA. W Polsce znajdują się niewielkie złoża tego pierwiastka, jednak nie są one wykorzystywane ze względów ekonomicznych. Jeśli w Stanach Zjednoczonych nie zostaną odnalezione nowe złoża, obecnie eksploatowane wyczerpią się za około 30-50 lat. Niestety omawiany pierwiastek wykorzystywany jest w pierwszym roku po zastosowaniu przez rośliny uprawne zaledwie w ilości od 5 do 10% [Ochal, 2015]. Ponadto problem stanowi także zawartość kadmu w złożach, która waha się w granicach od 25 do 150 mg w jednym kilogramie P_2O_5 [Klaczyński, 2015]. Balast wprowadzany do gleby wraz z dawką nawozu fosforowego stanowi niebezpieczeństwo, ponieważ nagromadzony w glebie przy nieodpowiedniej wartości pH, może być wynoszony z plonem głównym i stanowić zagrożenie dla zdrowia ludzi.

Potas, obok azotu, wymieniany jest jako główny składnik, którego niedobór skutkuje obniżeniem efektu plonotwórczego. Jego zawartość w glebach naszego kraju waha się w przedziale od 0,1 do 2,5%. Jak podaje Ochal [2015], 42% gleb w Polsce charakteryzuje się niską lub bardzo niską zawartością tego makroelementu. Natomiast wysoką lub bardzo wysoką zasobnością w przyswajalne formy potasu charakteryzuje się zaledwie 24% gleb. Uczestniczy on w procesie fotosyntezy i oddychania, decyduje istotnie o wielkości i jakości plonu. Ponadto chroni roślinę przed stresem i oddziałuje na uwodnienie tkanek [Ochal, 2015; Klaczyński, 2015]. Rośliny pobierają potas w postaci jonu K^+ . Jak podaje Wach [2020] od 90 do 98% całkowitej jego formy stanowi frakcja nieprzyswajalna, od 1 do 2% frakcja przyswajalna. O ilości pobranego przez roślinę uprawną potasu decyduje ilość towarzyszącego jonu azotanowego(V). Szacuje się, że wniesiony z nawozem K^+ , w pierwszym roku po zastosowaniu, wykorzystywany jest w około 50-60%. Jak wynika z danych zawartych w Roczniku Statystycznym Rolnictwa [2023] w sezonie 2019/20 średnie zużycie tego pierwiastka w nawozie, w przeliczeniu na czysty składnik, wynosiło $37,4 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$. Na podkreślenie zasługuje fakt, że ujemny bilans potasu w glebie oddziałuje niekorzystnie na środowisko, a także na wielkość uzyskiwanego plonu [Gaj, 2013].

Składnikiem odgrywającym dużą rolę w procesie aktywacji enzymów jest magnez. Jon ten stanowi również podstawowy składnik chlorofilu. Zawartość magnezu w glebach naszego kraju waha się w przedziale od 0,05 do 0,6% [Ochal, 2021]. Stwierdzono, że 42% gleb w Polsce, to gleby o wysokiej lub bardzo wysokiej klasie zasobności. Z kolei na 29% powierzchni naszego kraju gleby charakteryzują się niską lub bardzo niską zasobnością w magnez [Ochal, 2015]. Jak podaje Kocoń (2014) zawartość magnezu

w roślinie mieści się w zakresie od 0,12% do 0,8% s.m. rośliny i jest ona determinowana gatunkiem uprawianej rośliny oraz wiekiem analizowanego organu. Pierwiastek ten łatwo przemieszcza się w roślinie. Stanowi składnik chlorofilu, reguluje procesy fotosyntezy i przemiany energetyczne w roślinie, aktywator wielu enzymów (np. uczestniczy w przenoszeniu reszt fosforanowych). W warunkach jego niedoboru ograniczeniu ulega potencjał rośliny do produkcji asymilatów i ich transportowania do części generatywnych lub korzeni. Magnez bierze udział w regulacji wartości pH komórki roślinnej, jest antagonistą w stosunku do jonów K^+ i NH_4^+ , stymuluje rozwój systemu korzeniowego [Kopcewicz i Lewak, 2007; Kocoń, 2014]. Poza tym determinuje lepsze wykorzystanie pobranego przez rośliny N, P i K, poprawia jakość białka, ogranicza zawartość NO_3 , wpływa pozytywnie na transport i gromadzenie P w nasionach. Rośliny dobrze zaopatrzone w Mg pobierają więcej azotu, co skutkuje uzyskaniem większego plonu roślin uprawnych i wyższą jego jakością [Pikuła, 2017; 2020].

Wapń to pierwiastek ważny dla wzrostu i rozwoju roślin, ponieważ bierze udział w regulowaniu wzrostu komórek, w budowaniu błon i ścian komórkowych, warunkuje wytrzymałość i spójność tkanek budujących ściany komórkowe, zapewnia stabilność roślinie. Poza tym reguluje odporność roślin na uszkodzenia mechaniczne, choroby i szkodniki, pozwala na odpowiednie ukorzenianie się roślin oraz pobieranie wody i składników pokarmowych, wpływa na dobrą kondycję i odporność roślin na stesy (np. suszę) [Pikuła, 2023]. Z danych zawartych w Roczniku Statystycznym Rolnictwa [2011, 2023] wynika, że ilość stosowanych nawozów wapniowych na glebach uprawnych w Polsce w ciągu ostatnich 20. lat była zróżnicowana. W 2003 roku wynosiło ono $93 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$, a w 2011 roku obniżyło się do poziomu $36,8 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ (spadek o ponad 60%), ale w sezonie 2019/20 wynosiło już $89,6 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$.

W celu pełnego wykorzystania potencjału produkcyjnego roślin konieczne jest także dostarczenie im mikroelementów, które uczestniczą w wielu procesach enzymatycznych. Jednym z niezbędnych mikroskładników jest miedź. Objawami niedoboru tego mikroskładnika w glebie jest zahamowanie wzrostu roślin, a także obecność białych plam na liściach. Zawartość omawianego składnika w glebach Polski waha się w przedziale od 1 do $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. Ruchliwość miedzi w glebie jest niewielka, pomimo tego jego ubożenie przebiega stosunkowo szybko [Lipiński, 2013, Korzeniowska i in., 2019, 2021].

Kolejny niezbędny dla roślin mikroelement to cynk, pobierany przez rośliny w formie jonu Zn^{2+} , a jego ilość w glebach naszego kraju wynosi nawet $200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. Optymalne wartości pH, gwarantujące odpowiednie pobieranie tego mikroskładnika mieszczą się w granicach od 5,5 do 7. Omawiany mikroelement jest katalizatorem około 300 enzymów obecnych w roślinach, biorąc udział we wszystkich najważniejszych procesach. Warunkuje syntezę związków białkowych czy wiązanie cukrów, co spełnia nadrzędną rolę w procesie wzrostu upraw. Jest również odpowiedzialny

za pobieranie i wykorzystywanie azotu, pozytywnie determinując skuteczność jego aplikacji [Murawska i in., 2015, Korzeniowska i in., 2020].

Obok wyżej wymienionych, niezbędnym mikroelementem dla roślin jest mangan. Pobierany przez rośliny w postaci Mn^{2+} , a jego zawartość w glebach naszego kraju wynosi od 20 do 5000 $mg \cdot kg^{-1}$. Czynnikiem determinującym jego dostępność, podobnie jak innych mikrośladników, jest odczyn gleby. Mangan jest aktywatorem licznych procesów metabolicznych zachodzących w roślinie, m.in. bierze udział w cyklu Krebsa. Jest również niezbędny dla prawidłowego przebiegu procesu fotosyntezy uaktywniając enzymy istotne w syntezie chlorofilu [Kopcewicz i Lewak, 2007]. Aktywnie działa przy regulacji gospodarki hormonalnej i tworzeniu chloroplastów oraz zwiększa odporność na choroby.

Niezbędne dla roślin jest również żelazo, ponieważ bierze udział w przenoszeniu elektronów podczas procesu oddychania i fotosyntezy, a także w procesie powstawania chlorofilu [Kopcewicz i Lewak, 2007]. O jego dostępności w glebie decyduje odczyn i wzrasta ona wraz z jego obniżaniem. Jak podaje Dalaszczyński [2018], do wyprodukowania 1 tony zboża potrzeba 270 $g \cdot ha^{-1}$ żelaza.

Ważnymi dla wzrostu i rozwoju roślin uprawnych są również bor i molibden. Pierwszy z nich odpowiada za prawidłowy wzrost części generatywnych, determinuje kwitnienie, procesy oddychania, ma wpływ na gospodarkę wodną oraz reguluje przemiany cukrów. Z kolei podstawową rolą molibdenu jest jego udział w metabolizmie azotowym roślin. Uczestniczy w procesie redukcji NO_3 , wiązania N atmosferycznego, w gospodarce fosforowej oraz w przemianach siarki w organizmach roślinnych [Kopcewicz i Lewak, 2007].

Warto również zwrócić uwagę, że na poziom przyswajalnych dla roślin wyżej wymienionych makro- i mikroelementów w glebie ma jej odczyn. Jest to jeden z głównych czynników ograniczających potencjał produkcyjny gleby. Jak podaje Krysztoforski [2013] do roślin bardzo wrażliwych na odczyn gleby zaliczamy kukurydzę, groch, soję, burak cukrowy, koniczynę i lucernę. W przypadku omawianych roślin optymalna wartość pH gleby powinna wahać się w granicach od 6,6 do 7,0. Według Gaj [2013] dla większości roślin uprawnych, optymalny odczyn gleby dla ich wzrostu i rozwoju, powinien być od obojętnego do lekko kwaśnego. Można to osiągnąć poprzez wapnowanie. Z badań przeprowadzonych przez Okręgową Stację Chemiczno-Rolniczą w Poznaniu wynika, że około 50% gleb województwa wielkopolskiego wymaga wapnowania. Według Gaj [2013] rosące zużycie nawozów zawierających azot, przy bardzo niskim zużyciu nawozów wapniowych, prowadzi do wzrostu zakwaszenia gleby i negatywnie oddziałuje na jej strukturę, co powoduje degradację gleby. Na podkreślenie zasługuje fakt, że celem wapnowania jest również unieruchomienie w glebie toksycznych form glinu, które mogą prowadzić do obniżenia zdolności wchłaniania wody i składników pokarmowych przez roślinę. Dostępność pierwiastków dla roślin w glebie

uzależniona jest także od ich formy [Ochal, 2015, Kalinowski, 2018a]. Według Gaj [2013] zakwaszenie gleby sprawia, że nawet stosowanie wysokich dawek nawozów mineralnych nie zaspokaja potrzeb pokarmowych roślin. Autorka podaje, że województwa naszego kraju różnią się znacząco między sobą pod względem ilości stosowanych nawozów, a tym samym zawartością składników pokarmowych w glebie (w zakresie od 70 do 200 kg NPK·ha⁻¹). Największe zużycie nawozów zaobserwowano na obszarach o dużej intensywności produkcji roślinnej (wielkopolskie, kujawsko-pomorskie, lubuskie, łódzkie, opolskie i dolnośląskie). W latach 2010-2014 Polsce średnie łączne zużycie azotu, fosforu i potasu wynosiło 122,6 kg·ha⁻¹. W sezonie wegetacyjnym 2019/2020 ilość ta nieco wzrosła (o 6,5%) i wynosiła 130,5 kg·ha⁻¹ [Rocznik Statystyczny Rolnictwa, 2023].

Czynnikiem wywierającym duży wpływ na zawartość pierwiastków w glebie jest również gatunek rośliny uprawianej w zmianowaniu, ponieważ różnią się one między sobą ilością składników pokarmowych wynoszonych z gleby z plonem głównym i ubocznym. Według Sułek i Leszczyńskiej [2016] ilość azotu pobrana z 1 toną plonu jęczmienia jarego wynosi 21 kg, fosforu - 9,6 kg, potasu - 16 kg, 7 kg wapnia, 4,5 kg magnezu, 3,5 kg siarki. Cechą charakterystyczną jęczmienia jest jego duża wrażliwość na niedobór miedzi oraz średnia na niedobór manganu. Zbyt mała koncentracja w glebie przyswajalnych form ostatniego z omawianych składników może występować, gdy wartość pH gleby wzrasta powyżej 6,5. Jak podaje Gniewowska [2016] ilość azotu pobrana wraz z plonem 10 ton ziemiaka z odpowiadającą im masą łącin wynosi 40 kg, fosforu - 15 kg, potasu - 60 kg, wapnia - 6 kg, magnezu - 7 kg a siarki - 6 kg. Pobranie azotu wraz z 1 toną rzepaku i odpowiadającą mu masą słomy waha się w granicach od 50 do 60 kg. Ilość fosforu pobrana przez omawianą roślinę to 24 kg, potasu od 50 do 60 kg, wapnia - 55 kg, magnezu - 9 kg, a siarki od 8 do 12 kg. Z kolei średnie pobranie azotu wraz z 1 toną pszenicy ozimej i odpowiadającą jej ilością słomy wynosi 23 kg, fosforu - 10 kg, potasu - 20 kg, magnezu i wapnia - 5 kg. Wykorzystanie azotu wnoszonego do gleby wraz z nawozem stanowi około 50%. Czynnikiem wywierającym istotny wpływ na pobranie azotu jest obecność w glebie składników pokarmowych wchodzących w interakcje z azotem. Jak podaje Gaj [2013] przy niskiej zawartości potasu pobranie azotu przez roślinę znacznie maleje. Natomiast niedobór magnezu skutkuje nie tylko ograniczeniem włączania azotu do struktur białek, ale także zmniejszeniem wiązania tego składnika przez bakterie z rodzaju *Rhizobium*. Z kolei zbyt niska zawartość siarki w glebie prowadzi również do spadku pobrania azotu przez rośliny uprawne.

3. HIPOTEZA I CEL BADAŃ

Hipoteza badawcza zakładała, że stosowane systematycznie przez 44 lata, nawożenie obornikiem, mineralne - NPK oraz łączne (obornik + NPK) mogą korzystnie lub negatywnie oddziaływać i kształtować podstawowy skład mineralny gleby, a tym samym wpływać na wielkość plonu i determinować jego jakość, w tym skład chemiczny (pierwiastkowy). Zakładała również, że może decydować o zawartości metali ciężkich w glebie, a tym samym w plonie głównym testowanych roślin i negatywnie determinować przydatność uzyskanego surowca roślinnego w kontekście bezpieczeństwa dla przemysłu rolno-spożywczego.

Głównym celem badań było oszacowanie zmian wartości wybranych parametrów gleby i wskaźników jakościowych plonu głównego badanych roślin uprawnych w 11. rotacji zmianowania, pod wpływem nakładającego się nieprzerwanie od 44. lat nawożenia (obornik, nawożenie mineralne NPK, obornik+NPK).

Na podstawie celu głównego sformułowano następujące cele szczegółowe:

- określenie zmian wartości wskaźników zakwaszenia gleby pod wpływem wieloletniego nakładającego się nawożenia,
- oszacowanie wpływu długotrwałego, nakładającego się nawożenia, szczególnie obornika, na zawartości N-ogółem i C-organicznego w glebie,
- określenie zmian w zawartości makro- i mikroelementów oraz metali ciężkich w glebie pod wpływem badanego nawożenia,
- ustalenie, który z aplikowanych rodzajów nawożenia będzie decydował/świadczył o uzyskaniu największego efektu plonotwórczego plonu głównego roślin uprawianych w zmianowaniu,
- oszacowanie zmian w zawartości wybranych makro- i mikropierwiastków (N, P, K, Mg, Cu, Zn, Mn i Fe) oraz zawartości Pb, Cd, Cr i Ni w plonie głównym roślin uprawianych w zmianowaniu (ziemniak, jęczmień jary, rzepak ozimy, pszenica ozima).

4. MATERIAŁY I METODY BADAŃ

4.1. CHARAKTERYSTYKA WIELOLETNIEGO DOŚWIADCZENIA NAWOZOWEGO

Wieloletnie doświadczenie nawozowe zlokalizowane zostało w Stacji Badawczej Wydziału Rolnictwa i Biotechnologii Politechniki Bydgoskiej (poprzednio Wydziału Rolniczego Akademii Techniczno-Rolniczej) w Wierzchucinku (gmina Sicienko). Założył je w 1973 roku Pan prof. dr hab. inż. Wojciech Cwojdzński.

4.1.1. Lokalizacja doświadczenia i warunki glebowe

Stacja Badawcza w Wierzchucinku (fot. 1), na terenie której prowadzone było doświadczenie, oddalona jest od Bydgoszczy około 28 kilometrów w kierunku północno-zachodnim. Doświadczenie zlokalizowano na działce numer 57/20, obręb ewidencyjny 0021, gmina Sicienko, powiat bydgoski [geoportal.gov.pl, 2022].



Fot. 1 Fragment mapy Wierzchucinka z zaznaczonym polem doświadczalnym [geoportal.gov.pl, 2022]

Wyżej wymieniony obiekt stanowił główne miejsce eksperymentów polowych prowadzonych przez pracowników Pracowni Chemii Rolnej. Teren ten wchodzi w skład Pojezierza Krajeńskiego, które z kolei stanowi część Pojezierza Południowo Pomorskiego [geoportal.gov.pl, 2022]. Obszar wyniesiony jest

około 98 m n.p.m. Pod względem ukształtowania jest to równina płaska. Doświadczenie prowadzono na glebie płowej typowej, klasy bonitacyjnej III a, wytworzonej z gliny zwałowej falistej moreny dennej, zaliczanej do kompleksu żytniego bardzo dobrego. Zgodnie z klasyfikacją FAO-UNESCO to Typic Hapludalfs. Powstawaniu omawianych gleb sprzyja umiarkowanie wilgotny klimat. Dochodzi w nich do wymywania węglanów, a także częściowego wymywania niektórych związków próchnicy, glinu i żelaza. Ponadto poziom powierzchniowy na skutek migracji frakcji ilastej w głąb profilu ulega zubożeniu, zwłaszcza w cząstki o średnicy 0,2 μm . Po przemieszczeniu z omawianych frakcji powstaje poziom Bt. Jego charakterystyczną cechą jest zwiększona zwięzłość, a także obecność cząstek ilastych na agregatach i w kanałach glebowych oraz występowanie połączeń między cząsteczkami pyłu i piasku.

Według aktualnie obowiązującej systematyki gleb, klasyfikacja gleboznawcza w rejonie doświadczenia przedstawia się następująco [Systematyka Gleb Polski, 2019]:

Rząd: Gleby płowoziemne

Typ: Gleby płowe

Podtyp: Gleby płowe typowe

Rodzaj: Wytworzone z gliny zwałowej

Gatunek: Piasek gliniasty mocny na glinie lekkiej pylastej.

Według Szymańskiego i Skiby [2012], do powstania gleb płowych dochodzi na skutek migracji tlenków żelaza, kwasów próchnicznych i minerałów ilastych w głąb profilu glebowego. Cechą charakterystyczną omawianego rzędu jest wysoki stopień wysycenia kationami zasadowymi, szczególnie w dolnej i środkowej części profilu. Obecność ziaren gliny i pyłu skutkuje dużą zdolnością zatrzymywania wody, która jest łatwo dostępna dla roślin [Systematyka Gleb Polski, 2019]. Jak podaje Paluszek [2013], gleby płowe powstałe z glin zwałowych charakteryzują się trwałą strukturą agregatów glebowych, dzięki czemu ilość kapilarnych porów o średnicy od 0,2 do 20 μm jest odpowiednia by magazynować wodę pobieraną następnie przez rośliny. Ilość omawianych porów wywiera istotny wpływ na przepływ wody i przepuszczalność powietrza. Opisane cechy sprawiają, że gleby płowoziemne uważane są za te, o najwyższej wartości rolniczej. Dzięki dużej aktywności biologicznej w glebach płowoziemnych obecna jest próchnica w typie mull. Trwałość agregatów glebowych wywiera istotny wpływ na kiełkowanie, wschody, wzrost roślin, długość korzeni, ilość roślin w łanie i mikroorganizmów w glebie, a także jej aktywność biologiczną. Ich struktura zapobiega zasklepieniu się wierzchniej warstwy gleby, co przeciwdziała erozji wodnej. Według Krawczyka [2016] procentowa zawartość poszczególnych frakcji w glinie lekkiej pylastej przedstawia się następująco: piasek o średnicy od 0,1 do 1,0 mm stanowi w niej od 25 do 48%, pył o średnicy od 0,1 do 0,02 mm (26-40%), frakcja ilasta (26-35%). Z kolei zawartość frakcji w piasku

gliniastym mocnym, na którym zlokalizowane było doświadczenie, przedstawia się następująco: piasek o średnicy od 0,1 do 1,0 mm (55-84%), pył o średnicy od 0,1 do 0,02 mm (0- 25%), frakcja ilasta (16-20%).

4.1.2. Stosowane nawożenie i zmianowanie roślin

Badanym czynnikiem w omawianym eksperymencie (11. rotacja wieloletniego doświadczenia, lata 2014-2017) był rodzaj nawożenia. Poletka doświadczalne miały powierzchnię 50 m², na których stosowano nawożenie:

1. naturalne w postaci obornika (OB) w dawce 40 t·ha⁻¹ w ciągu jednej rotacji zmianowania, co stanowiło 424 kg·ha⁻¹ NPK
2. mineralne (NPK), tj. NPK w ilości 1339 kg·ha⁻¹ w ciągu jednej rotacji zmianowania,
3. naturalno-mineralne w postaci obornika w dawce 40 t·ha⁻¹ i nawozów mineralnych (OB+NPK), co stanowiło 1763 kg·ha⁻¹ NPK w ciągu jednej rotacji zmianowania.

W doświadczeniu uprawiano cztery rośliny w płodozmianie, obejmującym w jednej rotacji następujące gatunki: ziemniak jadalny, jęczmień jary, rzepak ozimy oraz pszenicę ozimą [Cwojdzński i Majcherczak, 1996]. Ustalając dawki nawożenia mineralnego, zgodnie z zaleceniami obowiązującymi w latach 70. ubiegłego wieku, zakładano plon odpowiadający 45 jednostkom zbożowym z 1 ha [Nowak i Majcherczak, 2002]. Dawki NPK pod ziemniaka jadalnego wynosiły odpowiednio 150, 52 i 249 kg·ha⁻¹. Co 4 lata pod ziemniaki stosowano obornik w dawce około 40 t·ha⁻¹ (w zależności od zawartości w nim azotu). W uprawie jęczmienia jarego aplikowano dawki NPK, odpowiednio 70, 24 i 83 kg·ha⁻¹. Z kolei pod rzepak ozimy dawki NPK zastosowano w ilości odpowiednio: 200, 70 i 166 kg·ha⁻¹. W przypadku pszenicy ozimej, kończącej analizowaną w pracy 11. rotację zmianowania, aplikowano NPK w ilościach odpowiednio: 120, 39 i 116 kg·ha⁻¹ [Barczak i in., 1999].

Jak wspomniano powyżej w przeprowadzonym doświadczeniu uprawiano ziemniaka jadalnego, pod który aplikowano obornik. Po jego zastosowaniu wykonywana była orka zimowa na głębokość 20 cm. Wiosną, przed sadzeniem ziemniaka, wykonano zabieg bronowania. Z kolei po nim przeprowadzono sadzenie średniowczesnej odmiany '*Satina*' (w II dekadzie kwietnia). Szerokość międzyrzędzi była dostosowana do rozstawy kół ciągnika i współpracujących z nim maszyn. Odległość roślin w rzędzie wynosiła od 30 do 32 cm, a ich ilość na hektarze około 43000. Zbiór plonu został wykonany we wrześniu 2014 roku. Po nim ponownie wykonywano orkę zimową na głębokość 20 cm, by przygotować pole pod siew jęczmienia.

Przed siewem jęczmienia jarego (w 11. rotacji zmianowania była to odmiana '*Stratus*') wykonano uprawki wiosenne przy użyciu bron lub agregatu uprawowo-siewnego. W trzeciej dekadzie marca 2015 roku (26.03.) przeprowadzono siew jęczmienia jarego (na terenie województwa kujawsko-

pomorskiego za optymalny uważa się termin od 26 marca do 5 kwietnia). Norma wysiewu dla zastosowanej w doświadczeniu odmiany wynosiła 150 kg·ha⁻¹. Zbiór ziarna, przy pomocy kombajnu poletkowego, został przeprowadzony w pierwszej dekadzie sierpnia 2015 roku.

Po zbiorze jęczmienia jarego, a przed wysiewem rzepaku ozimego (w 11. rotacji zmianowania była to odmiana 'Chagall'), wykonywano uprawy późnoliczne przy użyciu brony talerzowej. Wysiew rzepaku w omawianym doświadczeniu wykonano na koniec sierpnia 2015 roku (28.08.), na głębokość 2,5 cm. Za optymalną normę wysiewu przyjęto 50 roślin na metr kwadratowy. Zbiór nasion omawianej odmiany dokonano jednoetapowo w miesiącu lipcu 2016 roku. Po zbiorze rzepaku wykonywano uprawki późnoliczne, czyli orkę siewną i bronowanie. Orka siewna wykonywana była na około 3 tygodnie przed siewem kolejnej rośliny w zmianowaniu, którą była pszenica ozima.

Siew pszenicy ozimej (w 11. rotacji była to odmiana 'Arkadia'), został wykonany w III dekadzie września 2016 roku. Norma wysiewu wynosiła 190 kg·ha⁻¹. Z kolei zbiór zboża w omawianym eksperymencie odbył się w II. dekadzie sierpnia 2017 roku.

Azot stosowano pod wszystkie rośliny pogłównie, również ozime, zawsze dzieląc dawkę na dwie równe części ($\frac{1}{2} + \frac{1}{2}$). Terminy nawożenia tym składnikiem pokarmowym uzależnione były od gatunku uprawianej rośliny. Nawozy mineralne we wszystkich sezonach wegetacyjnych stosowano w formie saletry amonowej, superfosfatu potrójnego granulowanego oraz 60% soli potasowej. W doświadczeniu z zasady nie stosowano herbicydów, insektycydów, fungicydów, regulatorów wzrostu, itp., z wyjątkiem chemicznej walki ze stonką ziemniaczaną oraz zarazą ziemniaczaną w sytuacji, gdy istniała taka potrzeba.

Do badań, których wyniki znajdują się w niniejszej dysertacji, wykorzystano trzy próbki zbiorcze uzyskane z każdego obiektu doświadczalnego (jedna próbka zbiorcza uzyskana z trzech ze sobą zmieszanych próbek). Materiał glebowy pobierano z warstwy ornej (0-20 cm), a materiał roślinny w postaci plonu głównego z lat: 2014, 2015, 2016 i 2017 (11. rotacja zmianowania). Tak uzyskane próbki poddano analizom chemicznym.

Wyniki badań własnych odnotowane w 11. rotacji zmianowania, dotyczące materiału glebowego oraz roślinnego, porównywano odpowiednio do: zawartości określonych przed założeniem doświadczenia, po zakończeniu 6. i 10. rotacji zmianowania (Aneks, tab. 38-42) oraz zawartości odnotowanych w 6. rotacji zmianowania (Aneks, tab. 43-46). Wyniki te zebrano z prac opublikowanych przez pracowników Katedry Chemii Rolnej (później Pracowni Chemii Rolnej, a obecnie Pracowni Chemii Środowiska i Chemii Rolnej), z prac magisterskich wykonywanych w Jednostce oraz wyników znajdujących się w zasobach wyżej wymienionej Jednostki [Cwojdzński i in., 1993; Cwojdzński i Majcherczak, 1996; Cwojdzński i Szychaj-Fabisiak, 1996; Barczak i in., 1999; Cwojdzński i Nowak, 2000ab; Cwojdzński i Nowak,

2002; Nowak i Majcherczak, 2002; Jakubowski, 2015]. Taki układ analizy uzyskanych wyników związany był również z oceną zmian oznaczonych wartości parametrów, który wymagał obliczenia indeksów absolutnych jednopodstawowych, gdzie niezbędny był wynik pochodzący z pomiaru cech po zakończeniu, m. in. 10. rotacji zmianowania.

4.1.3. Charakterystyka odmian badanych gatunków roślin

4.1.3.1. Ziemniak jadalny '*Satina*'

W przeprowadzonym wieloletnim doświadczeniu nawozowym (2014-2017) uprawiano odmianę ziemniaka średniowczesnego '*Satina*'. Jak podaje COBORU, badania nad uprawą tej odmiany rozpoczęto w 2001 roku. Została ona wpisana na listę odmian zalecanych do uprawy w województwie kujawsko-pomorskim w 2013 roku [LOZ, 2019]. Z informacji zawartych na Liście Opisowej Odmian Roślin Rolniczych (LOORR) wynika, że plon ogólny tej jadalnej odmiany ziemniaka w 2019 roku stanowił 44,37 t·ha⁻¹, czyli 102% wzorca, z czego 96% stanowiła frakcja handlowa [LOORR, 2020]. Zawartość skrobi wynosiła 13,2%. '*Satina*' zaliczana jest do typu konsumpcyjnego ogólnoużytkowego – B, o żółtej barwie skórki i miąższu, nie ciemniej, charakteryzuje się bardzo dobrym smakiem a także dużą odpornością na choroby wirusowe, bakteryjne oraz przechowalnicze. Jest to odmiana odporna na mątwika, o kwiatach barwy białej. Bulwy charakteryzują się regularnym, okrągłoidalnym kształtem i płytkimi oczkami. Ponad 70% bulw stanowi frakcja o wielkości powyżej 50 mm, a zatem może być ona przeznaczona do produkcji frytek, sałatek, konserw, placków, itp. [LOORR, 2020]. Za optymalny termin sadzenia w województwie kujawsko-pomorskim uważa się II i III dekadę kwietnia. Bulwy tej odmiany odporne są na uszkodzenia mechaniczne. Wymagania wodne i glebowe powinny być na poziomie od średnich do dużych. Gleba pod uprawę powinna być dobrze spulchniona. Korzystny wpływ na plonowanie ma zastosowanie obornika, który przyczynia się do wzrostu zawartości węgla organicznego, próchnicy i azotu w glebie. Po jego aplikacji zalecane jest wykonanie orki jesiennej. Wiosną z kolei niezbędne jest bronowanie [Gniewkowska, 2016]. Za najlepszy przedplon dla tego gatunku uważa się wieloletnie rośliny motylkowe, dobrym są również zboża.

4.1.3.2. Jęczmień jary '*Stratus*'

Z danych Rocznika Statystycznego Rolnictwa (RST) [2023] wynika, że powierzchnia uprawy zbóż w Polsce w 2020 roku wynosiła 7,3 mln ha. Jęczmień jary jest czwartym najczęściej uprawianym zbożem w Polsce, a jego powierzchnia zasiewów dominuje wśród zbóż jarych. Województwami, w których procentowa ilość omawianego gatunku w strukturze zasiewów jest największa, są kujawsko-pomorskie, świętokrzyskie i małopolskie. Z kolei

najmniej jęczmienia uprawia się w województwach, takich jak: podkarpackie, mazowieckie, lubelskie i podlaskie. W 2018 roku powierzchnia uprawy omawianego gatunku wynosiła 0,77 mln ha, a po kolejnych dwóch latach zmalała do 0,70 mln ha [RST, 2023].

Ziarno omawianego gatunku używane jest do produkcji kasz, paszy dla zwierząt oraz słodu jęczmiennego. Do bezpośredniego spożycia nadaje się także młody jęczmień, który stanowi bogate źródło witamin z grupy B, witamin A, K, E i C oraz beta-karotenu.

W doświadczeniu uprawiano jęczmień jary odmiany '*Stratus*'. Jest to odmiana typu browarnego i jej ziarno powinno spełniać określone wymogi jakościowe, tj. zawierać od 9,5 do 11,5% białka, charakteryzować się plonem o wysokiej wartości technologicznej. Dwurzędowa odmiana '*Stratus*' została wpisana do Krajowego Rejestru Odmian w 1999 roku. Zalecana jest do uprawy na terenie całego kraju. Rośliny osiągają wysokość około 75 cm. Cechuje się wysokim plonem ($6,44 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$), bardzo dużą masą tysiąca ziaren ($52,7 \text{ g}$), wysokim wyrównaniem a także odpornością na wyleganie oraz na mączniaka prawdziwego, rdzę jęczmienia, rynchosporiozę oraz na plamistość siatkową i czarną. Norma wysiewu wynosi od 140 do 160 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$. Opisywana odmiana charakteryzuje się średnią wartością browarną i małą zawartością białka. Zboże to odznacza się wczesnym terminem kłoszenia i średnim dojrzewania, a także dużą gęstością ziarna w stanie zsypanym. Odmiana '*Stratus*' cechuje się średnim poziomem odporności na niską wartość pH gleby. Stosując przeciętny poziom agrotechniki w trzyletnim doświadczeniu możliwe jest osiągnięcie plonu odpowiadającego 101% wzorca, a przy wysokim poziomie agrotechniki - 102% [Paczyńska 2012]. Za optymalny termin siewu jęczmienia jarego na terenie województwa kujawsko-pomorskiego uważa się termin od 20 marca do 5 kwietnia. Jest to beznakładowy czynnik plonotwórczy. Opóźnienie terminu tego zabiegu prowadzi do zmniejszenia ilości kłosów i liczby zawartych w nich ziaren. W połączeniu z niewielką ilością opadów i wysokimi temperaturami plon ulega dalszemu zmniejszeniu. Za najbardziej odporne na opóźnienie terminu siewu uważa się odmiany pastewne i kaszarskie. W przypadku odmian browarnych opóźniony siew skutkuje zwiększeniem zawartości białka w ziarnie, co w efekcie prowadzi do pogorszenia parametrów słodu. Według COBORU [2019ab] zalecana norma wysiewu jęczmienia mieści się w granicach od 110 do 180 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$. Siew powinien być wykonany na głębokość 3 cm, a zalecana rozstawa rzędów od 11 do 15 cm. Za odpowiednią do wysiewu temperaturę gleby uważa się taką, która mieści się w przedziale od 3 do 4°C.

4.1.3.3. Rzepak ozimy '*Chagall*'

Polska jest trzecim co do wielkości producentem rzepaku w Unii Europejskiej, odpowiadając za 13% jego produkcji. Z danych Rocznika Statystycznego Rolnictwa [2023] wynika, że powierzchnia uprawy tej rośliny w 2021 roku w naszym kraju, wyniosła około 1 mln ha. Wielkość uzyskanego

plonu nasion rzepaku różniła się między sobą w poszczególnych latach. Przyczyną było wymarzenie, a także niedobór opadów. Województwem, w którym w 2018 roku uprawiano największą ilość omawianego gatunku było dolnośląskie, z arealem na poziomie 120 tys. ha oraz lubelskie, w którym pod uprawę przeznaczono 114 tys. ha.

W doświadczeniu własnym w 11. rotacji zmianowania uprawiano rzepak odmiany '*Chagall*', wpisany do krajowego rejestru w 2009 roku. Plon nasion stanowi około $5,06 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$. Jest to odmiana średniowczesna o wysokiej zimotrwałości i przeciętnych wymaganiach glebowych. Jej cechą charakterystyczną jest wysoka odporność na wyleganie oraz twardzikową i suchą zgniliznę kapustnych, a także wczesne kwitnienie, a tym samym także dojrzewanie [COBORU, 2019a]. Optymalnym terminem siewu rzepaku ozimego dla większości województw jest 15 - 25 sierpnia. Głębokość siewu powinna mieścić się w przedziale od 1,5 do 3,5 cm. Termin siewu należy tak dobrać, aby przed zimą roślina wytworzyła od 8 do 10 liści właściwych. Proces ten w przypadku omawianego gatunku trwa od 10 do 12 tygodni.

Za optymalną normę wysiewu odmian hybrydowych uważa się od 40 do 50 roślin na metr kwadratowy. W przypadku populacyjnych jest to od 50 do 60 roślin. Obecnie w uprawie są wyłącznie odmiany podwójnie ulepszone, tj. dwuzerowe, czyli niezawierające glukozyolanów i kwasu erukowego.

Obecnie prowadzone są prace hodowlane nad stworzeniem rzepaku o składzie chemicznym przydatnym w produkcji biopaliw. Powstałe odmiany różnić się będą składem chemicznym od rzepaku przeznaczonego na cele spożywcze, w którym zawartość tłuszczu waha się w przedziale od 43 do 49%, a białka od 21 do 24%. Pierwiastkiem, który wywiera największy wpływ na ilość tłuszczu i białka w rzepaku jest azot. Siarka z kolei modyfikuje poziom glukozyolanów. Za optymalny poziom siarki uważana jest dawka $30 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$.

4.1.3.4. Pszenica ozima '*Arkadia*'

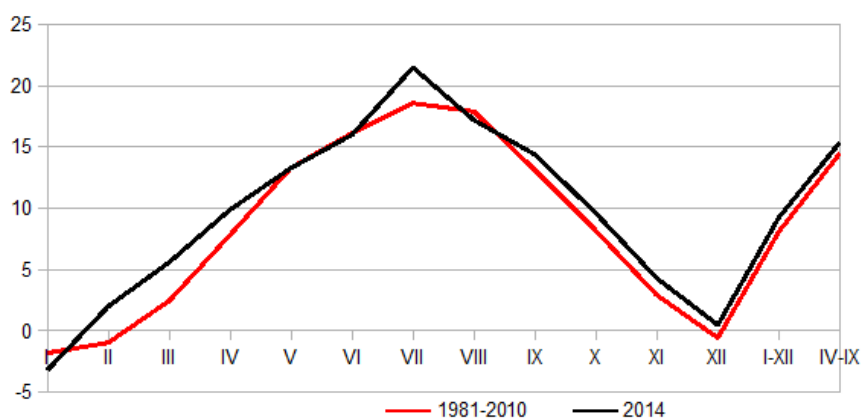
Pszenica ozima jest głównym zbożem chlebowym uprawianym w Polsce. Z danych Rocznika Statystycznego Rolnictwa [2023] wynika, że krajowa powierzchnia uprawy pszenicy w 2021 roku wynosiła 2,4 mln ha. Ziarno omawianego gatunku jest powszechnie stosowane do produkcji mąki, chleba, kasz, płatków śniadaniowych a także paszy dla zwierząt. Mąka pszenna znajduje szerokie zastosowanie, m.in. do produkcji ciast, pierogów, naleśników, klusek, bułek itp. W skład pszenicy wchodzi również gluten, który szkodzi wyłącznie osobom uczulonym na ten składnik. Województwami, w których pod uprawę omawianego gatunku przeznacza się największą powierzchnię są kujawsko-pomorskie, wielkopolskie, lubelskie i podkarpackie. W doświadczeniu uprawiano wczesną pszenicę ozimą odmiany '*Arkadia*'. Uważana jest ona za najlepszą w naszym kraju. Zmieniające się warunki klimatyczne i długotrwałe susze zmuszają rolnika do poszukiwania odmian na nią odpornych. '*Arkadia*' z uwagi na swoją wczesność dobrze wykorzystuje

zapas wody glebowej po zimie, co powoduje, że jest ona bardziej odporna na suszę. Wymieniona jakościowa odmiana chlebowa została wpisana do krajowego rejestru w 2011 roku. Charakteryzuje się ona, w całym kraju, wysokim poziomem plonowania wynoszącym $7,68 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$, dużą odpornością na niskie temperatury, a także niewielkimi wymaganiami glebowymi. Cechą charakterystyczną jest również bardzo dobra zdolność do krzewienia i krótkie źdźbła oraz wysoka odporność na wyleganie. Zawiera dużo białka. Masa tysiąca ziaren wynosi średnio 46,1 g. Opisywana pszenica ozima odznacza się odpornością na choroby podstawy źdźbła, fuzariozę kłosa, rdzę brunatną a także na mączniaka prawdziwego i septoriozę liści [COBORU, 2019b].

4.1.4. Warunki pogodowe w okresie prowadzenia badań polowych

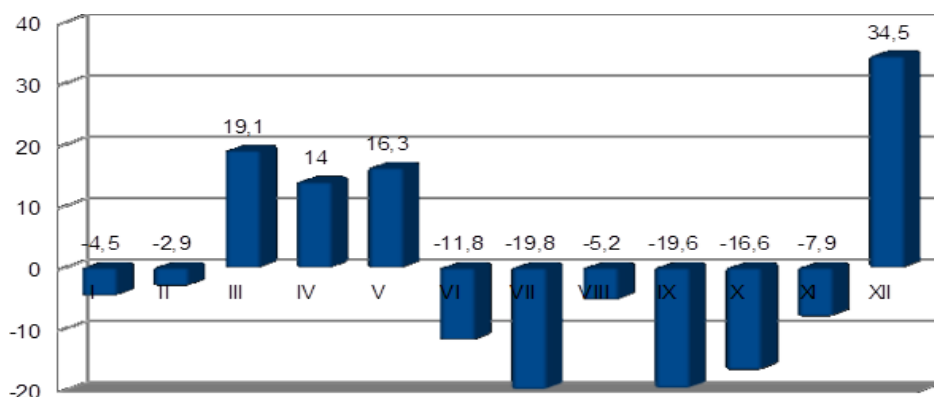
Z Punktu Meteorologicznego zlokalizowanego w Rolniczym Zakładzie Doświadczalnym w Mochelku otrzymano dane dotyczące przebiegu warunków pogodowych w sezonach wegetacyjnych (2014, 2015, 2016 i 2017) w Wierzchucinku, w których uprawiano testowane rośliny (ziemniak, jęczmień jary, rzepak ozimy, pszenica jara) oraz obejmujące wielolecie 1981-2010. W celu prześledzenia warunków pogodowych w czasie prowadzenia eksperymentu polowego przedstawiono je na klimatogramach (rys. 1-10).

W pierwszym roku prowadzenia doświadczenia, gdy uprawiano ziemniaki stwierdzono, że średnia miesięczna temperatura od lutego do kwietnia oraz od września do grudnia 2014 roku przewyższała średnią z wielolecia (rys. 1). Najcieplejszymi miesiącami były czerwiec i lipiec, przy czym w tym ostatnim temperatura przewyższała średnią z wielolecia o około 5°C . Z kolei najzimniejszym miesiącem tego roku był styczeń.



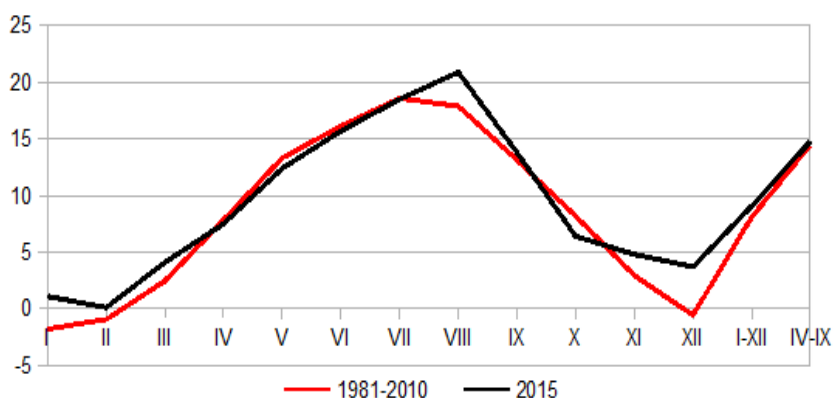
Rys. 1 Odchylenie średnich temperatur miesięcznych w 2014 roku, w odniesieniu do średnich temperatur miesięcznych z wielolecia 1981-2010, wg danych meteorologicznych opracowanych w Pracowni Melioracji i Agrometeorologii WRiB PBS w Bydgoszczy na podstawie pomiarów dokonanych w Mochelku

W marcu, kwietniu i maju 2014 roku suma opadów miesięcznych przewyższała średnią z wielolecia (rys. 2). Największą różnicę wynoszącą 34,5 mm odnotowano jednak w grudniu. Najbardziej suchymi miesiącami w 2014 roku, okazały się lipiec i wrzesień.



Rys. 2 Odchylenie [mm] sum opadów miesięcznych w 2014 roku od średnich miesięcznych opadów z wielolecia 1981-2010, według danych meteorologicznych opracowanych w Pracowni Melioracji i Agrometeorologii WRiB PBS w Bydgoszczy na podstawie pomiarów dokonanych w Mochelku

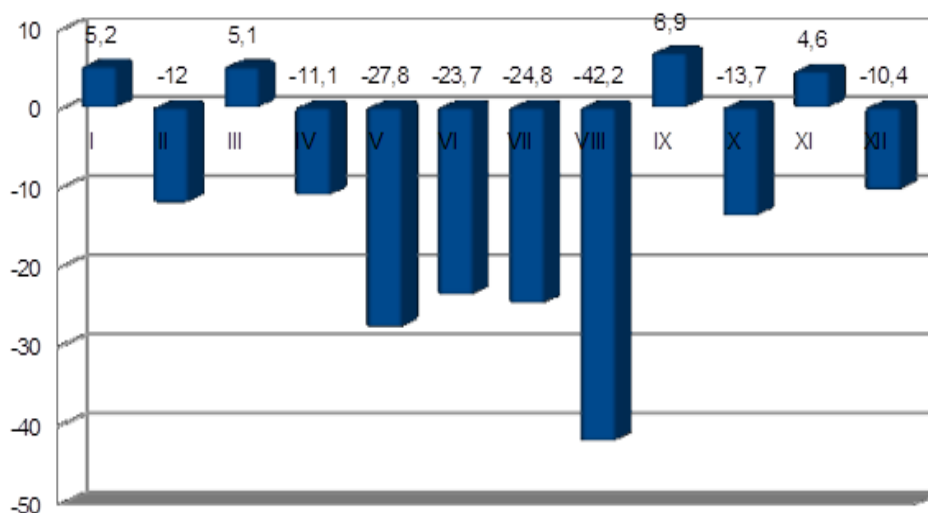
W sezonie wegetacyjnym uprawy jęczmienia jarego zauważono, że w lutym i marcu, a zwłaszcza w sierpniu 2015 roku średnia temperatura miesięczna była większa od średniej z wielolecia 1981-2010 (rys. 3). W tym ostatnim miesiącu różnica ta wynosiła około 3^oC. Pozostałe miesiące wegetacji charakteryzowały się zbliżonymi średnimi wartościami temperatury powietrza.



Rys. 3 Odchylenie średnich temperatur miesięcznych w 2015 roku, w odniesieniu do średnich temperatur miesięcznych z wielolecia 1981-2010 według danych meteorologicznych opracowanych w Pracowni Melioracji i Agrometeorologii WRiB PBS w Bydgoszczy na podstawie pomiarów dokonanych w Mochelku

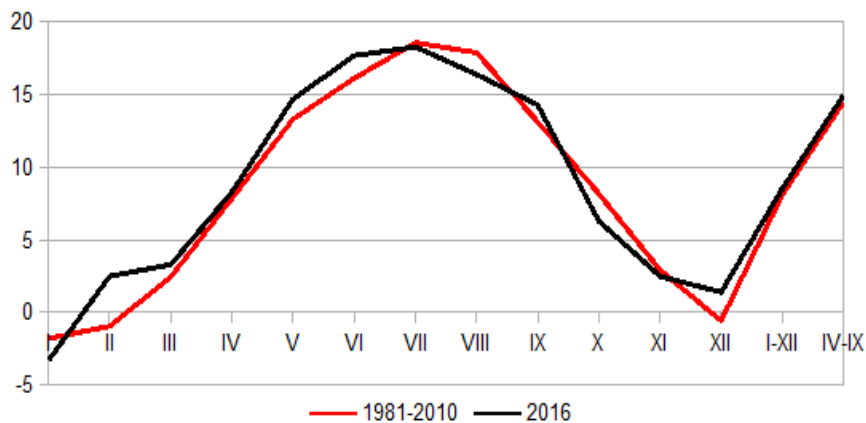
W styczniu, marcu, wrześniu i listopadzie 2015 roku, średnia miesięczna suma opadów nieznacznie (w graniach od 4,6 do 6,9 mm) przewyższała średnią z wielolecia (rys. 4). W pozostałych miesiącach 2015 roku opady były niższe, przy czym najbardziej suchymi miesiącami okazały się maj i sierpień. W omawianym roku niskie opady przypadały na okres intensywnego wzrostu roślin, co w konsekwencji doprowadzić mogło do spadku plonowania. Cały rok charakteryzował się średnio niższymi o około 29% opadami w stosunku do średniej z lat 1981-2010 (rys. 10).

Podczas wegetacji rzepaku ozimego w lutym, marcu, maju, czerwcu 2016 roku średnia miesięczna temperatura przewyższała średnią z wielolecia. Z kolei styczeń był chłodniejszy od średniej z wielolecia (rys. 5).

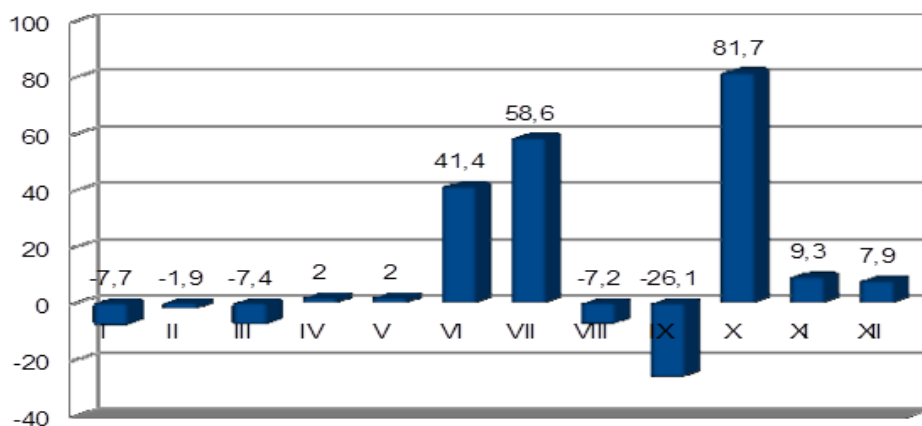


Rys. 4 Odchylenie [mm] sum opadów miesięcznych w 2015 roku od średnich miesięcznych opadów z wielolecia 1981-2017 według danych meteorologicznych opracowanych w Pracowni Melioracji i Agrometeorologii WRiB PBS w Bydgoszczy na podstawie pomiarów dokonanych w Mochelku

W przypadku opadów (rys. 6) stwierdzono, że po wysianiu testowanej rośliny (IX.2015 r.) były one wyższe o 6,9 mm od średniej z wielolecia, ale w kolejnym miesiącu odnotowano mniejszą ich ilość i to o 13,9 mm w porównaniu do średniej z lat 1981-2010 (rys. 4). Z kolei od stycznia do marca 2016 roku zauważono niższe opady od średniej z lat, natomiast kwiecień i maj charakteryzowały się wyższymi jedynie o 2 mm opadami w stosunku do danych z wielolecia (rys. 6). Zdecydowanie wyższa ilość opadów deszczu miała miejsce dopiero w czerwcu i lipcu, odpowiednio: 41,4 i 58,6 mm.

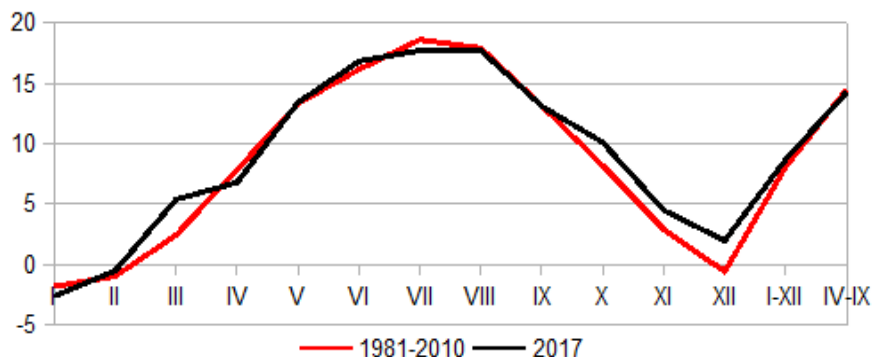


Rys. 5 Odchylenie średnich temperatur miesięcznych w 2016 roku, w odniesieniu do średnich temperatur miesięcznych z wielolecia 1981-2010 według danych meteorologicznych opracowanych w Pracowni Melioracji i Agrometeorologii WRiB PBS w Bydgoszczy na podstawie pomiarów dokonanych w Mochełku



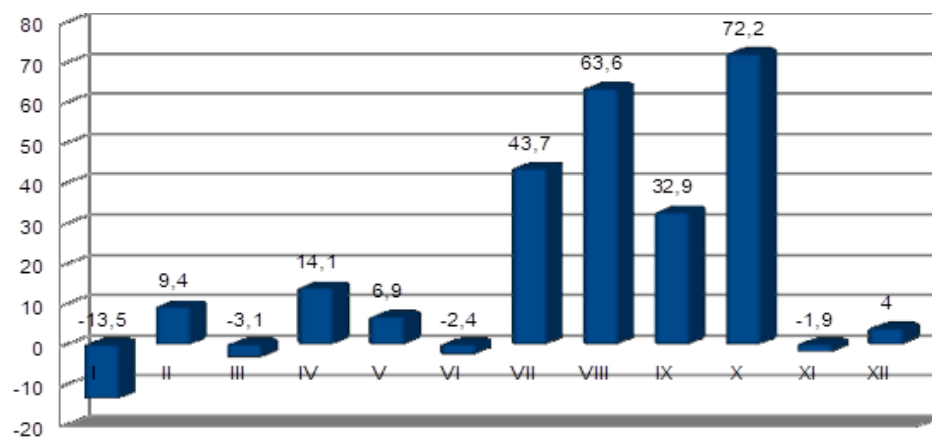
Rys. 6 Odchylenie sum opadów miesięcznych [mm] w 2016 roku od średnich miesięcznych opadów z wielolecia 1981-2010 według danych meteorologicznych opracowanych w Pracowni Melioracji i Agrometeorologii WRiB PBS w Bydgoszczy na podstawie pomiarów dokonanych w Mochełku

W sezonie wegetacyjnym pszenicy ozimej średnia temperatura miesięczna powietrza w lutym, a zwłaszcza w marcu 2017 roku przewyższała średnią temperaturę średnią miesięczną z wielolecia (rys. 7). Natomiast od kwietnia do zbioru zboża (sierpień) temperatury były zbliżone do średniej z lat 1981-2010.



Rys. 7 Odchylenie średnich temperatur miesięcznych w 2017 roku, w odniesieniu do średnich temperatur miesięcznych w wieloleciu 1981-2010 według danych meteorologicznych opracowanych w Pracowni Melioracji i Agrometeorologii WRiB PBS w Bydgoszczy na podstawie pomiarów dokonanych w Mochelku

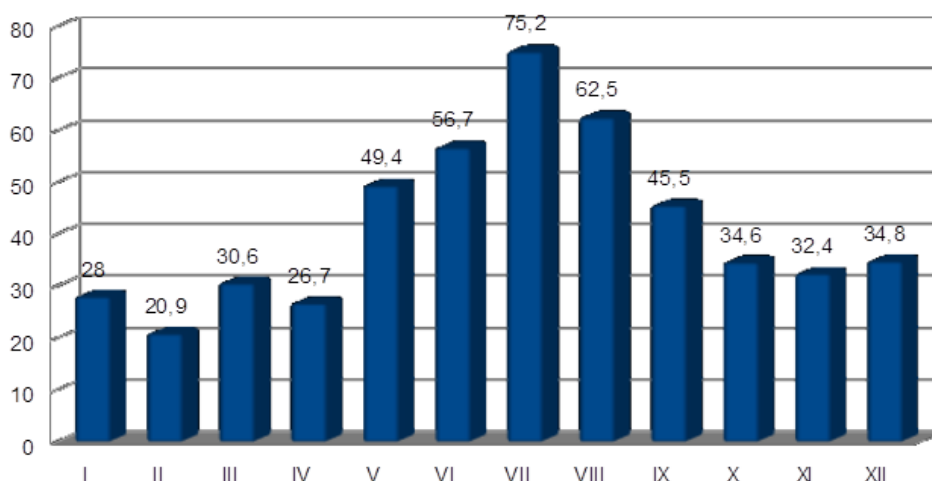
W 2017 roku było bardzo dużo opadów (rys. 8). Za najbardziej mokry podczas wegetacji pszenicy można uznać lipiec i sierpień, w którym średnie miesięczne sumy opadów przewyższały te z wielolecia odpowiednio aż o: 43,7 i 63,6 mm. Wyższe opady były również w lutym, kwietniu i maju, natomiast niższe od wielolecia w marcu i czerwcu.



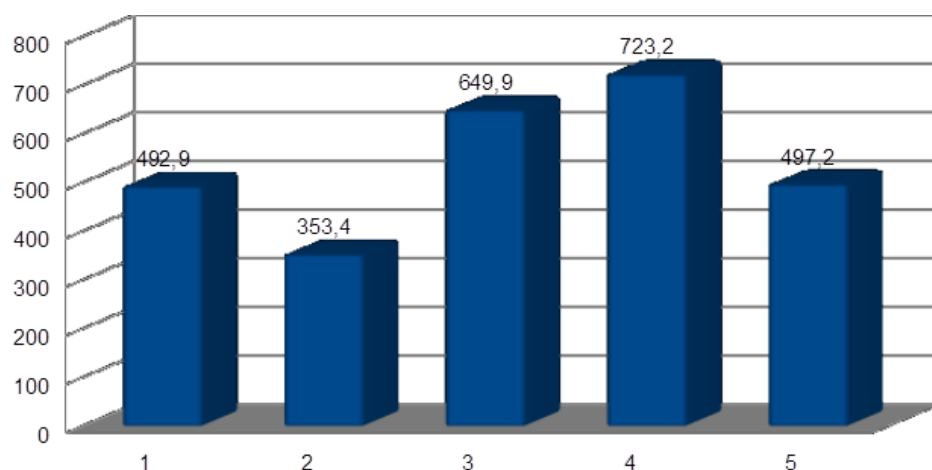
Rys. 8 Odchylenie [mm] sum opadów miesięcznych w 2017 roku od średnich miesięcznych opadów z wielolecia 1981-2010 według danych meteorologicznych opracowanych w Pracowni Melioracji i Agrometeorologii WRiB PBS w Bydgoszczy na podstawie pomiarów dokonanych w Mochelku

Na rysunkach 9 oraz 10 pokazano odpowiednio: średnie miesięczne sumy opadów z wielolecia 1981-2010 oraz średnie roczne sumy opadów z lat prowadzenia doświadczenia i z wielolecia 1981-2010. Należy zwrócić uwagę,

że średnie roczne sumy opadów w 2014 roku były porównywalne, w 2015 niższe o 30%, a w 2016 i 2017 roku wyższe o ponad odpowiednio: 30 i 45% w stosunku do średniej wieloletniej.



Rys. 9 Średnie miesięczne sumy opadów [mm] z wielolecia 1981-2010 według danych meteorologicznych opracowanych w Pracowni Melioracji i Agrometeorologii WRiB PBŚ w Bydgoszczy na podstawie pomiarów dokonanych w Mochelku



Rys. 10 Średnie roczne sumy opadów [mm] z 2014 (1), 2015 (2), 2016 (3), 2017 (4) i z wielolecia 1981-2010 (5) według danych meteorologicznych opracowanych w Pracowni Melioracji i Agrometeorologii WRiB PBŚ w Bydgoszczy na podstawie pomiarów dokonanych w Mochelku

4.2. METODY BADAŃ CHEMICZNYCH MATERIAŁU GLEBOWEGO I ROŚLINNEGO

W każdym roku prowadzenia badań 11. rotacji zmianowania, po zebraniu plonu głównego z poletek doświadczalnych, pobrano próbki glebowe z warstwy ornej (0-20 cm) do analiz chemicznych. W zgromadzonym materiale glebowym oznaczono:

- kwasowość hydrolityczną (Hh) - zmodyfikowaną metodą Kappena,
- wartość pH w 1 M KCl·dm³ (zgodnie z PN-ISO 10390:1997) metodą potencjometryczną z wykorzystaniem pH-metru,
- azot ogółem przy użyciu analizatora Vario Max NCS,
- węgiel organiczny przy użyciu analizatora Vario Max,
- przyswajalne formy fosforu i potasu – metodą Egnera–Riehma (DL) za pomocą spektrofotometru XION 500 oraz fotometru płomieniowego Flapho 4 (PN-R-04023:1996 dla fosforu, PN-R-04022:1996 dla potasu),
- przyswajalne formy magnezu – metodą Schachtschabela - przy użyciu aparatu Varian AA240FS, wykorzystując metodę atomowej spektrometrii absorpcyjnej,
- przyswajalne formy wapnia i sodu – metodą fotometryczną przy użyciu fotometru płomieniowego Flapho 4,
- przyswajalne formy miedzi, cynku, manganu i żelaza po ekstrakcji w 1 M HCl·dm⁻³ (wg PN-ISO 11047:2001), metodą atomowej spektrometrii absorpcyjnej przy użyciu aparatu Varian AA240FS,
- zawartości metali ciężkich (Pb, Cd, Cr, Ni) oznaczono metodą emisyjnej spektrometrii atomowej w plazmie indukcyjnie sprzężonej ICP-OES po mineralizacji w wodzie królewskiej. Metoda ta pozwala na bardzo precyzyjne oznaczenie ilości pierwiastków w analizowanym materiale z dokładnością do dziesiątych części µg/L.

Natomiast w materiale roślinnym oznaczono skład mineralny plonu głównego, tj. zawartości:

- azotu metodą Kjeldahla za pomocą Tecatora KJELTEC SYSTEM 1026,
- fosforu (metodą kolorymetryczną z molibdenianem amonu, wykorzystując analizator przepływowy San++ firmy Skalar),
- potasu, wapnia i sodu (metodą fotometrii płomieniowej – aparatem Flapho 4 - po uprzedniej mineralizacji materiału roślinnego w stężonym kwasie H₂SO₄),
- magnezu (metodą absorpcyjnej spektrometrii atomowej, wykorzystując aparat Varian AA240FS – po uprzedniej mineralizacji materiału roślinnego w stężonym kwasie H₂SO₄),
- miedzi, manganu, cynku i żelaza (metodą absorpcyjnej spektrometrii atomowej – aparatem Varian AA240FS – po uprzedniej mineralizacji materiału roślinnego w mieszaninie stężonych kwasów HNO₃ i HCl w stosunku 3:1,
- metali ciężkich (Pb, Cd, Cr, Ni), podobnie jak w glebie, oznaczono metodą emisyjnej spektrometrii atomowej w plazmie indukcyjnie sprzężonej ICP-OES po mineralizacji w wodzie królewskiej.

Z uwagi na potencjalnie niską zawartość metali ciężkich w stosowanych w doświadczeniu nawozach, zdecydowano o przeprowadzeniu analiz chemicznych związanych z ich obecnością w badanych glebach jedynie po 1. i ostatnim roku 11. rotacji zmianowania. Należy również zauważyć, że nie udało się określić precyzyjnej zawartości kadmu ogólnego w glebie oraz ołowiu i kadmu w testowanych roślinach. Zawartości te były poniżej progu detekcji aparatury wykorzystanej do analiz i wynosiły mniej niż $1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$.

4.3. STATYSTYCZNE METODY OPRACOWANIA WYNIKÓW

Wszystkie wyniki eksperymentu poddano analizie wariancji w układzie całkowicie losowym, właściwym dla sposobu założenia eksperymentów w polu. Do oceny różnic między średnimi obiektowymi stosowano wielokrotny test rozstępu Tukey'a. Wyniki badań składu mineralnego gleby pobranej z warstwy ornej z pól płodozmianu po zbiorach oraz materiału roślinnego zebranego w trakcie zbiorów, opracowano jako jednoczynnikowe. Czynnikiem doświadczalnym był rodzaj nawożenia w poszczególnych latach 11. rotacji.

Plonowanie gatunków wyrażone w jednostkach zbożowych oraz plony białka (tab. 34-37), które posłużyły do oszacowania produktywności płodozmianu, poddano dwuczynnikowej analizie wariancji, gdzie pierwszym czynnikiem badawczym był sposób nawożenia ziemniaka, a drugim – gatunki uprawiane w kolejnych latach zmianowania.

Obliczono również macierz współczynników korelacji elementów składu mineralnego plonów roślin na obiektach nawożonych obornikiem, nawozami mineralnymi (NPK) i łącznie obornikiem+NPK. W tabeli podano wartości $r_{\text{obl.}} > r_{\text{tabl.}, p=0,05} = 0,576$. Do wartości zestawionych współczynników korelacji prostych odwoływano się przy omawianiu i dyskusji wyników.

Na podstawie wyników badania składu mineralnego gleby, podczas trwania rozpatrywanego zmianowania, oszacowano kierunki zmian oznaczonych wartości cech. Wykorzystano tu elementy analizy dynamiki, stosując obliczenie indeksów absolutnych jednopodstawowych. Jako pierwszy w łańcuchu (X0) stosowano wynik pochodzący z pomiaru cech sprzed rozpoczęcia 11. rotacji zmianowania (z 2013 roku, po zakończeniu 10 rotacji zmianowania).

Wyniki badania składu mineralnego gleby oraz plonów roślin podsumowano w oparciu o podstawy analizy intraprofilowej, polegającej na porównaniu przebiegu profilów wielocechowych zestawianych w trzy linie odpowiadające zespołom wartości wszystkich cech stwierdzonych na obiektach z różnym sposobem nawożenia ziemniaka w I. roku rotacji. W celu wzajemnej porównywalności wartości cech poddano standaryzacji. Dla zobrazowania położenia poszczególnych profili obliczono ich średnie wartości. Rezultaty tego opracowania przedstawiono w formie graficznej.

Obliczenia wykonano na danych po standaryzacji, zgodnie z formułą:

$$z_i = \frac{x_i - \bar{x}}{s}$$

gdzie:

z _i	–	wartość cechy po standaryzacji,
x _i	–	wartość cechy obserwowana,
–	–	średnia cechy w próbie,
s	–	odchylenie standardowe próby.

Podane w tabelach wyniki oznaczone różnymi literami (a, b, c)
wskazują na statystycznie istotną różnicę, natomiast oznaczenie n.i. informuje
o braku statystycznej istotności.

Wszystkie wymienione wyżej obliczenia oraz prezentację graficzną
wykonano z wykorzystaniem pakietu programów statystycznych STATISTICA
oraz MS Excel.

5. OMÓWIENIE I Dyskusja Wyników

5.1. Wybrane Parametry Glebowe

5.1.1. Wartości wskaźników zakwaszenia gleby (pH i Hh)

W przeprowadzonych badaniach stwierdzono, że wartości pH gleby w trzech latach 11. rotacji zmianowania oraz po uprawie pszenicy ozimej kończącej 6. i 10. rotację, były istotnie determinowane wpływem rodzaju nawożenia uprawianych roślin (tab. 1, tab. 39 - aneks). Liu i in. [2010], Stępień i in. [2018] oraz Bhatt i in. [2019] podają, że na skutek wieloletniego nawożenia mineralnego lub obornikiem, większą wartość pH gleby odnotowano na poletkach, gdzie stosowano nawożenie obornikiem. Potwierdza to, że naturalny nawóz łągodzi zakwaszające oddziaływanie nawozów mineralnych.

Tabela 1. Wartości pH gleby w zależności od rodzaju stosowanego nawożenia

Rotacja/ Lata	Stosowane nawożenie		
	Obornik	NPK	Obornik + NPK
11/2014	5,3 a	5,0 b	5,3 a
11/2015	5,2 a	4,9 a	5,0 a
11/2016	5,1 a	4,9 a	4,4 b
11/2017	5,4 a	5,0 c	5,2 b

Odnotowano, że po 10. rotacji aplikacja obornika oraz łączna obornika i nawozów mineralnych skutkowałą uzyskaniem większych wartości pH w stosunku do obiektu nawożonego wyłącznie mineralnie, odpowiednio o: 0,4 i 0,3 jednostki pH. Taką samą zależność stwierdzono po wcześniejszej, zakończonej w 1998 roku, 6. rotacji. Należy również nadmienić, że wartości pH gleby w tej rotacji dla poszczególnych obiektów badawczych były wyższe od odnotowanych zarówno w 10., jak w przypadku wszystkich lat 11. rotacji.

Na podstawie uzyskanych wyników po zbiorze uprawianych roślin w 11. rotacji zmianowania wynika, że stosowanie obornika w największym stopniu przeciwdziałało zakwaszaniu gleby. Z kolei aplikacja NPK wpływała w największym stopniu na obniżenie wartości pH badanej gleby. Prace Liu i in. [2010], Suwary i in. [2018], oraz Sisay i Sisay [2019] wskazują również, że stosowanie wieloletniego nawożenia mineralnego skutkuje obniżeniem wartości pH gleby na niemal wszystkich obiektach, za wyjątkiem nawożonych obornikiem. Łączne stosowanie nawożenia obornika z nawożeniem mineralnym badali także Jaskulska i Urbanowski [2018], którzy odnotowali na tym obiekcie najwyższy poziom wartości pH gleby w stosunku do innych obiektów

nawozowych. Podobną tendencję stwierdzono w pracy Pikuły [2018], która podaje, że regularna (co 4 lata) aplikacja obornika, zwłaszcza w dawce 40 t·ha⁻¹, potwierdza jego korzystny wpływ na negatywne zmiany odczynu gleby zachodzące pod wpływem wieloletniego nawożenia mineralnego. Jak podają Lenart i in. [2018], stosowanie wieloletniego nawożenia mineralnego przez okres powyżej 33 lat skutkuje obniżeniem wartości pH na wszystkich obiektach nawozowych, przy czym nawet 3. krotne zastosowanie wapnowania w okresie prowadzenia eksperymentu było niewystarczające, aby utrzymać wyjściowy odczyn gleby. Kuś i Jończyk [2018] oraz Drozd [2021] wskazują, że wieloletnia aplikacja w wysokich dawkach nawozów mineralnych prowadzi w konsekwencji do zakwaszenia gleby. Za najbardziej zakwaszające, jak podaje autor, uznaje się siarczan (VI) amonu, mocznik a także saletrę amonową. Natomiast saletra wapniowa, magnezowa, sodowa oraz potasowa działają na glebę odkwaszająco.

Należy również zwrócić uwagę, że przed założeniem wieloletniego doświadczenia nawozowego w RZD w Wierzchucinku gleba charakteryzowała się odczynem obojętnym (wartość pH 6,8; tab. 39 - aneks). Po 6. i 10. rotacji stwierdzono zmianę odczynu gleby. Na obiekcie, gdzie stosowano obornik zmienił się on na lekko kwaśny. Natomiast na poletkach, na których aplikowano nawozy mineralne lub łącznie obornik i NPK, stwierdzono kwaśny odczyn gleby. Z kolei po 11. rotacji zmianowania, niezależnie od stosowanego nawożenia, zauważono zmianę odczynu gleby z obojętnego (1974 r.) do kwaśnego lub bardzo kwaśnego. Należy zauważyć na przykład, że stosowanie łącznie obornika i nawozów mineralnych po uprawie rzepaku ozimego w 11. rotacji, skutkowało największym obniżeniem wartości pH gleby (o 2,4 jednostki pH) w stosunku do wartości oznaczonej przez założeniem wieloletniego doświadczenia polowego.

W przeprowadzonych badaniach zaobserwowano, że wartość kwasowości hydrolitycznej po zbiorze pszenicy ozimej uprawianej w ostatnich latach 6. 10. i 11. oraz pozostałych trzech 11. rotacji była istotnie różnicowana zastosowanym sposobem nawożenia roślin uprawianych w zmianowaniu (tab. 2, tab. 39 - aneks). Według Stępnia i in. [2018] wieloletnia aplikacja nawozów mineralnych lub naturalnych w warunkach braku wapnowania doprowadziła do wzrostu wartości kwasowości hydrolitycznej na obiektach nawożonych obornikiem.

Po 10. rotacji stwierdzono, że na skutek aplikacji obornika zwiększeniu uległa wartość Hh w stosunku do obiektu nawożonego mineralnie oraz mineralno-naturalnie odpowiednio o 0,02 i 0,10 jednostki Hh. Zarówno po zakończeniu 11., jak i w 6. rotacji największe wartości kwasowości hydrolitycznej odnotowano na obiekcie nawożonym łącznie obornikiem i nawozami mineralnymi w stosunku do obiektu z samym obornikiem i były one wyższe o: 1,4 jednostki w 6. rotacji i 0,9 jednostki po zakończeniu 11. rotacji. Na podkreślenie zasługuje fakt, że po 6., 10. i 11. rotacji na wszystkich

objektach nawożonych wyłącznie mineralnie wartość Hh przyjmowała wartości pośrednie. Na podstawie uzyskanych wyników po zbiorze roślin uprawianych w 11. rotacji można stwierdzić, że aplikacja obornika łagodzi negatywne oddziaływanie nawożenia mineralnego w stosunku do kwasowości hydrolitycznej. Potwierdzają to badania Suwary i in. [2018] oraz Bhatta i in. [2019]. Wynika z nich, że aplikacja obornika oddziałuje na ogół pozytywnie na wartość kwasowości hydrolitycznej w glebie. Wyniki Nazarkiewicz i Kaniuczak [2012] wskazują, że wieloletnia aplikacja nawozów mineralnych połączona z brakiem wapnowania prowadzi do wzrostu kwasowości hydrolitycznej gleby.

Tabela 2. Wartości Hh gleby [$\text{cmol}(+)\cdot\text{kg}^{-1}$] w zależności od rodzaju stosowanego nawożenia

Rotacja/ Lata	Stosowane nawożenie		
	Obornik	NPK	Obornik + NPK
11/2014	2,53 c	3,31 b	4,57 a
11/2015	1,60 c	2,37 b	2,60 a
11/2016	1,83 c	2,57 b	3,80 a
11/2017	1,83 c	2,60 b	2,73 a

Na podkreślenie zasługuje fakt, że przed założeniem statycznego eksperymentu wieloletniego w RZD w Wierzchucinku wartość kwasowości hydrolitycznej wynosiła 1,43 [$\text{cmol}(+)\cdot\text{kg}^{-1}$]. Po 6. 10. i 11. rotacji zanotowano wzrost Hh w stosunku do poziomu wyjściowego na wszystkich obiektach nawozowych. Należy zauważyć, że łączna aplikacja obornika i nawozu mineralnego po zakończeniu uprawy ziemniaka w 1 roku 11. rotacji skutkowałą wzrostem poziomu omawianego parametru o 3,14 [$\text{cmol}(+)\cdot\text{kg}^{-1}$] w stosunku do odnotowanego przed założeniem doświadczenia. Najmniejszy wzrost Hh w porównaniu do wartości tej cechy sprzed założenia eksperymentu, stwierdzono w 11. rotacji na obiekcie nawożonym wyłącznie obornikiem po zbiorze jęczmienia jarego. Różnica wynosiła zaledwie 0,17 jednostki.

5.1.2. Zawartość składników mineralnych w glebie

5.1.2.1. Zawartość makroelementów

Zawartość azotu ogółem

Na podstawie przeprowadzonych badań własnych odnotowano, że zawartości azotu ogółem po zakończeniu 6. i 10. rotacji oraz w trakcie i po zakończeniu 11. rotacji były istotnie determinowane zastosowanym badanym nawożeniem roślin uprawianych w zmianowaniu (tab. 3, tab. 40 - aneks). Wieloletnie stosowanie zróżnicowanego nawożenia wpływa istotnie

na zawartość azotu ogółem w glebie [Johnston i Poulton, 2018, Terzić i in., 2019, Laamrani i in., 2020]. Większą jego ilość [$0,66 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$] stwierdzono w warstwie ornej, gdzie aplikowano łącznie obornik i nawozy mineralne. Brak stosowania obornika skutkowało obniżeniem zawartości azotu ogółem o $0,37 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ w stosunku do zawartości uzyskanej po łącznej aplikacji obornika i NPK [Stępień i in., 2018]. Również w doświadczeniu Simona [2008] po łącznym zastosowaniu obornika i NPK odnotowano najwyższą zawartość $N_{og.}$ i to istotnie wyższą w stosunku do obiektów nawożonych NPK i obornikiem. Podobne zależności uzyskali inni autorzy [Liu i in., 2010, Viet i in. 2023].

Tabela 3. Zawartości azotu ogółem w glebie [$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$] w zależności od stosowanego nawożenia

Rotacja/ Lata	Stosowane nawożenie		
	Obornik	NPK	Obornik + NPK
11/2014	0,79 a	0,73 b	0,71 b
11/2015	0,96 a	0,69 c	0,82 b
11/2016	0,87 a	0,76 b	0,75 b
11/2017	0,86 a	0,68 c	0,80 b

Po uprawie pszenicy ozimej kończącej 10. rotację największą zawartość $N_{og.}$ stwierdzono po zastosowaniu obornika [$0,73 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$]. Natomiast aplikacja NPK oraz obornika i NPK wpływała na obniżenie zawartości azotu ogółem odpowiednio o 0,1 i $0,06 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ w porównaniu do stosowania obornika. Taką samą tendencję odnotowano po zakończeniu 6. rotacji. Na podkreślenie zasługuje fakt, że zawartości $N_{og.}$ w glebie zarówno po 6. jak i po 10. rotacji były niższe od uzyskanej po zakończeniu 11. rotacji (tab. 3, tab. 40 - aneks).

Na podstawie uzyskanych wyników po zbiorze roślin uprawianych w 11. rotacji można stwierdzić, że stosowanie obornika w największym stopniu przyczyniło się do wzrostu zawartości azotu ogółem w glebie (tab. 3). Według Stępnia i in. [2018] wieloletnia aplikacja obornika prowadzi do wzrostu ilości azotu ogółem w warstwie ornej w stosunku, gdzie tego nawozu nie stosowano. Zdaniem Blecharczyka i in. [2018], łączna aplikacja nawożenia mineralnego i obornika lub bez obornika skutkowało zmianami zawartości azotu ogółem w glebie. Autorzy odnotowali już po zakończeniu pierwszej rotacji siedmioletniego zmianowania największą ilość azotu ogółem w glebie ($1,22 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) na obiektach, gdzie uprawiano żyto ozime w monokulturze nawożone obornikiem. Natomiast brak obornika skutkowało obniżeniem zawartości omawianego makroskładnika o $0,68 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ w stosunku do zawartości uzyskanej spod uprawy ziemniaka w monokulturze. Jak podają Suwara i in. [2018] długotrwała aplikacja obornika (28 lat), wpływała korzystnie na zawartość azotu ogółem w glebie. Podobne wyniki uzyskali, w trwającym 30 lat

doświadczeniu, Liu i in. [2010], gdzie zawartość N-ogółem na obiekcie z obornikiem była wyższa o ponad 24% w stosunku do kontroli. Według Małeckiej-Jankowiak i in. [2018] o zawartości tego składnika w glebie decyduje również system uprawy. Z przeprowadzonych przez tych autorów badań wynika, że największą zawartością azotu ogółem w warstwie ornej charakteryzowały się próbki gleby, gdzie stosowano siew bezpośredni.

Należy także podkreślić, że przed założeniem wieloletniego eksperymentu polowego w SB PBS gleba charakteryzowała się zawartością azotu ogółem na poziomie $0,99 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (tab. 39 - aneks). Po 6. oraz 10. rotacji stwierdzono, że nawożenie mineralne i mineralno-naturalne skutkowało obniżeniem ilości omawianego składnika w glebie odpowiednio o: $0,28$ i $0,30 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ oraz $0,36$ i $0,32 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, w porównaniu do wartości uzyskanej w 1974 roku (tab. 40 - aneks).

Stwierdzono, że zawartość $N_{og.}$ w glebie zwiększała się wraz ze zmniejszaniem się kwasowości hydrolitycznej gleby, co zauważono w próbkach materiału glebowego pochodzącego z poletek z aplikacją obornika ($r=-0,83$) lub łącznie obornika i nawozów mineralnych (NPK, $r=-0,92$) (tab. 4).

Tabela 4. Macierz współczynników korelacji elementów składu mineralnego warstwy ornej gleby na badanych obiektach. Średnio dla gatunków roślin. W tabeli podano wartości $r_{obl.} > r_{tabl., p=0,05} = 0,576$.

Cecha	pH	Hh	N	C	P	K	Mg	Cu	Zn	Mn
po aplikacji obornika										
Hh	n.i.*									
N	n.i.	-0,83								
C	n.i.	0,60	n.i.							
P	n.i.	-0,61	n.i.	-0,92						
K	n.i.	n.i.	n.i.	0,69	-0,78					
Mg	n.i.	0,58	n.i.	0,93	-0,99	0,81				
Cu	n.i.	-0,96	0,85	-0,69	0,64	-0,06	-0,62			
Zn	n.i.	0,70	-0,68	n.i.	n.i.	-0,30	n.i.	-0,59		
Mn	-0,71	n.i.	n.i.	n.i.	-0,71	0,64	0,69	n.i.	n.i.	
Fe	n.i.	0,97	-0,89	0,65	-0,65	0,04	0,62	-0,98	0,66	n.i.
po aplikacji NPK										
	pH	Hh	N	C	P	K	Mg	Cu	Zn	Mn
Hh	n.i.									
N	n.i.	n.i.								
C	n.i.	0,92	n.i.							
P	n.i.	-0,78	n.i.	-0,60						
K	n.i.	-0,91	n.i.	-0,76	-0,89					
Mg	n.i.	n.i.	n.i.	n.i.	n.i.	n.i.				
Cu	n.i.	-0,59	n.i.	-0,81	n.i.	n.i.	-0,79			
Zn	n.i.	n.i.	0,73	n.i.	n.i.	n.i.	0,62	-0,66		
Mn	n.i.	n.i.	n.i.	n.i.	n.i.	n.i.	0,78	-0,75	n.i.	
Fe	n.i.	n.i.	n.i.	n.i.	n.i.	n.i.	-0,74	0,87	n.i.	-0,96

* n.i. – nie istotne

cd. tabeli 4 na następnej stronie

cd. tabeli 4

po aplikacji obornika + NPK										
	pH	Hh	N	C	P	K	Mg	Cu	Zn	Mn
Hh	n.i.									
N	n.i.	-0,92								
C	0,61	0,65	-0,65							
P	n.i.	n.i.	n.i.	-0,68						
K	n.i.	n.i.	n.i.	n.i.	-0,67					
Mg	n.i.	n.i.	n.i.	n.i.	n.i.	-0,82				
Cu	n.i.	-0,75	0,67	-0,77	0,84	n.i.	n.i.			
Zn	n.i.	n.i.	n.i.	n.i.	n.i.	-0,68	n.i.	n.i.		
Mn	n.i.	n.i.	n.i.	n.i.	n.i.	0,83	n.i.	n.i.	n.i.	
Fe	-0,97	n.i.	n.i.	-0,68	0,67	n.i.	n.i.	n.i.	0,59	n.i.

* n.i – nie istotne

W tabeli 4 podano również inne obliczone istotne macierze współczynników korelacji prostej elementów składu mineralnego warstwy ornej gleby. Wskazują one na największą ilość zależności między parametrami gleby po zastosowaniu w doświadczeniu aplikacji obornika, a w dalszej kolejności łącznie obornika i NPK oraz wyłącznie nawozów mineralnych.

Zawartość węgla organicznego

W przeprowadzonych badaniach zauważono, że po wszystkich latach 11. rotacji oraz po zakończeniu 6. i 10. rotacji aplikowane nawożenie istotnie wpływało na zawartość C_{org} w warstwie ornej gleby (tab. 5, tab. 40 - aneks). Wieloletnia aplikacja nawozów mineralnych i obornika stanowiła przedmiot badań Simona [2008], Stępnia i in. [2018], Bhatta i in. [2019] oraz Pikuły i Rutkowskiej [2020], którzy stwierdzili, że zawartość węgla organicznego w glebie była istotnie determinowana nawożeniem. Największą zawartość tego składnika, po 90. latach badań, stwierdzono w próbkach glebowych pobranych spod uprawy roślin bobowatych nawożonych obornikiem, w porównaniu do obiektów, na których nie stosowano tego nawozu naturalnego [Stępień i in., 2018].

Tabela 5. Zawartości węgla organicznego w glebie [$g \cdot kg^{-1}$] w zależności od rodzaju stosowanego nawożenia

Rotacja/ Lata	Stosowane nawożenie		
	Obornik	NPK	Obornik + NPK
11/2014	10,87 a	9,13 c	9,63 b
11/2015	10,27 a	7,90 c	9,33 b
11/2016	9,27 a	7,93 b	9,27 a
11/2017	9,90 a	7,73 c	9,30 b

Stwierdzono, że po 10. rotacji aplikacja obornika skutkowała uzyskaniem większej zawartości węgla w glebie w porównaniu ze stosowaniem NPK oraz nawożenia naturalno-mineralnego odpowiednio o 2,26 i 1,35 g·kg⁻¹. Podobną tendencję odnotowano po zakończeniu 6. rotacji. Należy podkreślić, że zawartość omawianego składnika w glebie była w tej rotacji mniejsza od stwierdzonej w próbkach glebowych po uprawie pszenicy ozimej kończącej 10. rotację oraz pierwszym roku 11. rotacji (tab. 5, tab. 40 - aneks). W oparciu o uzyskane wyniki po zbiorze uprawianych roślin w 11. rotacji można stwierdzić, że obornik w największym stopniu przyczynił się do wzrostu zawartości węgla organicznego w glebie. Natomiast aplikacja nawozów mineralnych lub obornika i NPK decydowały w największym stopniu o obniżeniu zawartości omawianego składnika. W ostatnim roku tej rotacji spadek wynosił odpowiednio 2,17 oraz 0,60 g·kg⁻¹ w stosunku do obiektów nawożonych obornikiem. Podobną tendencję stwierdzili Bleharczyk i in. [2018], którzy podają, że regularne stosowanie obornika przez okres 60 lat doprowadziło do wzrostu zawartości węgla organicznego (o 62,4%) w stosunku do obiektu nawożonego mineralnie. Jak podają Marks i in. [2018] wieloletnia rezygnacja z aplikacji obornika, zarówno w płodozmianie jak i monokulturze, prowadzi do spadku zawartości węgla organicznego w glebie w porównaniu z obiektami, gdzie był on stosowany. Łączne stosowanie obornika i nawozów mineralnych było również przedmiotem badań Jaskulskiego i Jaskulskiej [2003]. Według tych autorów aplikacja obornika korzystnie wpływała na ilość węgla organicznego w glebie, także na obiektach wapnowanych i nawożonych NPK. Z kolei najmniejszą zawartość C_{org.} stwierdzono w próbkach glebowych nawożonych dużymi dawkami nawozów mineralnych - 426 kg NPK. W kolejnych latach prowadzenia wieloletniego eksperymentu statycznego powyżsi autorzy zaobserwowali ustabilizowanie ilości omawianego składnika, jednak na poziomie niższym od zawartości początkowej. Suwara i in. [2018] wskazują, że wieloletnia aplikacja obornika skutkuje wzrostem poziomu węgla organicznego w warstwie ornej gleby w stosunku do obiektów nawożonych NPK. Potwierdzają to również prace innych autorów [Liu i in., 2010, Piкуła i Rutkowska, 2020, Viet i in., 2023], którzy podają, że ilość węgla organicznego w glebie była istotnie determinowana zastosowaniem obornika.

Stosunek wartości C:N

W przeprowadzonych badaniach własnych stwierdzono, że wartość stosunku C:N w glebie pobranej spod uprawy pszenicy ozimej, która kończyła 6. i 10. rotację, był istotnie determinowany zastosowanym nawożeniem roślin uprawianych w zmianowaniu (tab. 40 - aneks). Po zakończeniu 10. rotacji stwierdzono, że aplikacja obornika oraz łączne stosowanie obornika i NPK skutkowało uzyskaniem większej wartości stosunku C:N w glebie, odpowiednio 15,4 i 14,9, w porównaniu z obiektem nawożonym wyłącznie mineralnie (14,27). Należy również nadmienić, że największą wartość stosunku węgla do azotu w glebie stwierdzono w omawianej rotacji. Z kolei wieloletnie

stosowanie badanego nawożenia nie różnicowało istotnie wartość stosunku C:N po zbiorze pszenicy ozimej, która kończyła 11. rotację. Należy również zaznaczyć, że C:N po zakończeniu tej rotacji był węższy w stosunku do jego wartości po zakończeniu 6. i 10. rotacji, niezależnie od badanego nawożenia (tab. 6; tab. 40– aneks). Jak podają Stępień i in. [2018] długotrwała aplikacja nawozów mineralnych lub obornika doprowadziła do istotnych statystycznie zmian wartości stosunku C:N w glebie, który zawężał się w próbkach glebowych wraz ze wzrostem głębokości ich pobrania. Najszerszy stosunek węgla do azotu, wynoszący średnio 10,5, autorzy odnotowali w warstwie ornej, natomiast najmniejszy w warstwie Bt, czyli głównym poziomie glebowym występującym w glebach płowych, niezależnie od nawożenia i zmianowania.

Tabela 6. Stosunek węgla do azotu w glebie w zależności od rodzaju stosowanego nawożenia

Rotacja/ Lata	Stosowane nawożenie		
	Obornik	NPK	Obornik + NPK
11/2014	13,82 a	12,57 b	13,58 ab
11/2015	10,73 b	11,40 a	11,43 a
11/2016	10,62 b	10,48 b	12,30 a
11/2017	11,52 a	11,43 a	11,63 a

Z doświadczeń przeprowadzonych przez Simona [2010] wynika, że rodzaj nawożenia nie różnicuje istotnie wartości stosunku C:N w warstwie ornej gleby. Badania nad wpływem nawożenia i zmianowania przeprowadziła Pikula [2018], która stwierdziła, że uprawa roślin w zmianowaniu nie różnicuje istotnie wartości stosunku C:N w ornej warstwie gleby. Aplikacja obornika i nawozów mineralnych była przedmiotem badań Bleharczyka i in. [2018]. Podobnie jak w badaniach Simona [2010] autorzy ci stwierdzili, że stosowane nawożenie nie różnicowało istotnie C:N w glebie. Podobnego zdania są również Małecka-Jankowiak i in. [2018]. Natomiast według Kusia [2015] stosunek C:N w glebie jest stały i wynosi na ogół 10:1, niezależnie od zmianowania i nawożenia.

Reasumując należy stwierdzić, wartości stosunku C:N, niezależnie od uprawianych roślin, mieściły się w zakresie od 10,48:1 do 13,82:1, co świadczy o przewadze procesów mineralizacji nad procesami immobilizacji w badanych glebach, a tym samym dostępności składników pokarmowych dla roślin.

Zawartość przyswajalnych form fosforu

W przeprowadzonych badaniach stwierdzono, że zawartość przyswajalnych form fosforu, zarówno we wszystkich badanych latach 11. rotacji, jak i po zakończeniu 6. i 10. rotacji, była istotnie różnicowana

zastosowanym nawożeniem (tab. 7, tab. 41 - aneks). Udowodniono, że po zakończeniu 6. rotacji aplikacja obornika skutkowała uzyskaniem w warstwie ornej gleby większej zawartości fosforu w stosunku do łącznego nawożenia obornika i NPK o 6,40 mg·kg⁻¹ oraz o 3,02 mg·kg⁻¹ po zastosowaniu wyłącznie NPK. Należy również nadmienić, że zawartość tego makroelementu w 6. rotacji dla poszczególnych obiektów badawczych była wyższa od odnotowanej zarówno w 10. rotacji, jak i we wszystkich latach rotacji 11. Według Liu i in. [2010] oraz Stępnia i in. [2018] po stosowaniu długoletniej aplikacji nawozów mineralnych lub obornika, większą zawartość przyswajalnego fosforu stwierdzono w próbkach glebowych pobranych po aplikacji nawozu naturalnego.

Tabela 7. Zawartości przyswajalnych form fosforu w glebie [mg·kg⁻¹] w zależności od rodzaju stosowanego nawożenia

Rotacja/ Lata	Stosowane nawożenie		
	Obornik	NPK	Obornik + NPK
11/2014	44,07 a	29,15 c	34,18 b
11/2015	48,13 a	34,39 c	35,00 b
11/2016	53,93 a	30,95 c	39,45 b
11/2017	53,89 a	30,77 c	39,65 b

Po zakończeniu uprawy pszenicy ozimej kończącej 10. rotację największą zawartość fosforu stwierdzono w próbkach glebowych, gdzie aplikowano nawożenie mineralne (50,90 mg·kg⁻¹) (tab. 41 - aneks). Natomiast po nawożeniu obornikiem oraz łącznym stosowaniu obornika i NPK, zawartości omawianego składnika były niższe odpowiednio o: 18,7 i 18,4%. Z kolei po zbiorze roślin uprawianych w 11. rotacji stwierdzono, że stosowanie obornika w największym stopniu przyczyniło się do wzrostu zawartości przyswajalnych form fosforu w warstwie ornej gleby. Natomiast aplikacja nawozów mineralnych powodowała największe obniżenie zawartości omawianego makroelementu. Na podkreślenie zasługuje fakt, że po zbiorze kolejnych roślin w 11. rotacji zmianowania, na wszystkich obiektach, gdzie aplikowano łącznie nawóz naturalny i NPK ilość przyswajalnych form fosforu osiągała wartości niższe w stosunku do uzyskanych po zastosowaniu obornika, natomiast wyższe - po aplikacji nawozów mineralnych. Badania przeprowadzone przez Bleharczyka i in. [2018] wskazują również, że regularna aplikacja obornika w dawce 30 t·ha⁻¹, prowadzi do wzrostu zawartości omawianego składnika w glebie. Potwierdzają to Budanov i in. [2023], przy czym w ich eksperymencie zastosowano wyższą dawkę obornika, tj. 40 t·ha⁻¹. Łączne stosowanie obornika i nawozów mineralnych lub samego obornika stanowiło przedmiot badań Marksa i in. [2018], którzy stwierdzili, że wieloletnia rezygnacja z aplikacji obornika prowadzi do obniżenia

zawartości fosforu w glebie. Jak podają Suwara i in. [2018] regularne stosowanie nawożenia mineralnego wywierało korzystny wpływ na poziom fosforu przyswajalnego w glebie. Z kolei zróżnicowane wyniki w stosunku do fosforu w glebie, na której nawożono obornikiem i azotem przez 36 lat prowadzenia doświadczenia uzyskały Pikula i Rutkowska [2020]. W rotacji gdzie nie wapnowano gleby, ta uległa większemu zakwaszeniu i charakteryzowała się zmniejszoną zawartością przyswajalnego fosforu w porównaniu do obiektu z wapnowaniem.

Obliczone współczynniki korelacji prostej (tab. 4) wskazują, że zawartość przyswajalnego fosforu w glebie po zastosowaniu wszystkich rodzajów nawożenia była ujemnie skorelowana z ilością przyswajalnego potasu. Przy czym największą zależność między tymi cechami stwierdzono po aplikacji nawozów mineralnych (NPK).

Należy również zwrócić uwagę, że przed rozpoczęciem wieloletniego eksperymentu w Stacji Badawczej w Wierzchucinku gleba charakteryzowała się średnią zasobnością (III klasa) w fosfor przyswajalny ($65,89 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ – tab. 41 - aneks). Po 24 latach prowadzenia doświadczenia klasa zasobności nie uległa zmianie. Natomiast po zakończeniu 10. rotacji stwierdzono zmianę klasyfikacji zawartości przyswajalnego fosforu w glebie do poziomu niskiego (IV klasa zasobności) na obiektach, gdzie stosowano obornik oraz łącznie obornik i NPK. Z kolei po zakończeniu niniejszych badań (po 44 latach) ponownie nastąpiły zmiany klasyfikacji na obiektach nawozowych. W glebie nawożonej obornikiem nastąpił wzrost zawartości przyswajalnych form fosforu, a na obiekcie, gdzie aplikowano NPK spadek zawartości tego składnika, w porównaniu do ilości stwierdzonej po 10. rotacji. Skutkowało to zmianą klas zasobności, odpowiednio do klasy: III i IV. Natomiast w glebie, którą nawożono łącznie obornikiem i NPK nie stwierdzono zmiany jej klasyfikacji.

Zawartość przyswajalnych form potasu

W przeprowadzonych badaniach własnych odnotowano, że zawartość przyswajalnych form potasu, zarówno we wszystkich latach 11. rotacji jak i po zakończeniu 6. i 10. rotacji była istotnie determinowana stosowanym nawożeniem (tab. 8, tab. 41 - aneks). Po ostatnim roku 11. rotacji zmianowania zauważono spadek zawartości przyswajalnych form potasu w glebie na wszystkich obiektach nawozowych do poziomu niskiego w porównaniu do poziomu sprzed założenia doświadczenia. Największą ilością omawianego składnika w omawianej rotacji charakteryzowała się gleba nawożona obornikiem ($43,04 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$). Na poletkach, gdzie aplikowano nawożenie naturalno-mineralne oraz jedynie mineralne zawartość omawianego składnika pokarmowego zmniejszyła się odpowiednio o: o 30,3% oraz 32,5% w stosunku do obiektu nawożonego wyłącznie obornikiem. Takie same tendencje zaobserwowano również w 2014 i 2015 roku. Natomiast po zbiorze rzepaku ozimego (2016 r.) największą zawartość przyswajalnego potasu odnotowano

w glebie nawożonej obornikiem, ale w dalszej kolejności były to obiekty z aplikacją obornika i NPK oraz nawożonego jedynie mineralnie. Po zbiorze pszenicy ozimej kończącej 6. rotację stwierdzono, że aplikacja obornika spowodowała wzrost poziomu przyswajalnych form potasu w glebie o 3,50 mg·kg⁻¹ w stosunku do obiektu nawożonego NPK oraz o 7,21 mg·kg⁻¹ w porównaniu z obiektem nawożonym łącznie obornikiem i NPK.

Tabela 8. Zawartości przyswajalnych form potasu w glebie [mg·kg⁻¹] w zależności od rodzaju stosowanego nawożenia

Rotacja/ Lata	Stosowane nawożenie		
	Obornik	NPK	Obornik + NPK
11/2014	56,79 a	26,15 c	39,93 b
11/2015	65,03 a	32,77 c	59,14 b
11/2016	43,05 a	30,72 c	36,08 b
11/2017	43,04 a	29,03 b	30,02 b

Jest to zgodne z badaniami Liu i in. [2010], Stępnia i in. [2018], Pikuły i Rutkowskiej [2020] oraz Budanova i in. [2023], w których na skutek długotrwałego nawożenia poletek doświadczalnych obornikiem lub nawozami mineralnymi, większą zawartość omawianego makroskładnika stwierdzono na poletkach, gdzie stosowano ten naturalny nawóz. Potwierdza to, że jego aplikacja determinuje wzrost zawartości przyswajalnych form potasu w glebie. Podobnej tendencji w stosunku do tego makroelementu nie stwierdzono po 10 rotacji (tab. 41 - aneks), w której największą zawartością charakteryzowała się warstwa orna gleby, gdzie aplikowano łącznie obornik i NPK (74,80 mg·kg⁻¹). Wartość ta była wyższa w stosunku do uzyskanych w glebach zebranych z poletek nawożonych wyłącznie obornikiem lub NPK, odpowiednio o: 36,8 i 23,6%. Bleharczyk i in. [2018] również potwierdzają że wieloletnia aplikacja obornika skutkuje obniżeniem zawartości przyswajalnych form potasu w glebie w stosunku do poletek nawożonych mineralnie. Łączna aplikacja nawozów mineralnych i obornika była także przedmiotem badań Suwary i in. [2018], którzy stwierdzili, że obiekty na których stosowano nawożenie obornikiem charakteryzowały się większą zawartością przyswajalnych form potasu w glebie w stosunku do obiektów nawożonych mineralnie lub naturalno-mineralnie. Jaskulska i Urbanowski [2018] wskazują, że łączna aplikacja obornika i nawozów mineralnych doprowadziła do wzrostu zawartości omawianego składnika w glebie w porównaniu do obiektów nawożonych wyłącznie obornikiem lub nawozami mineralnymi.

Należy również zwrócić uwagę, że przed założeniem wieloletniego eksperymentu statycznego w RZD w Wierzchucinku, warstwa orna gleby charakteryzowała się średnią zawartością przyswajalnych form potasu (121,3

mg·kg⁻¹, tab. 41 - aneks) – III klasa zasobności. Po 6. i 10. rotacji odnotowano zmianę klasyfikacji zasobności gleby w przyswajalne formy omawianego składnika pokarmowego do poziomu niskiego. Z kolei w 2017 roku, po zakończeniu 11. rotacji, gleby na poletkach, gdzie stosowano NPK lub obornik+NPK zostały zaliczone do V klasy, o bardzo niskiej zasobności w omawiany składnik. Nie zmieniła się natomiast klasyfikacja gleby, którą nawożono obornikiem.

Zawartość przyswajalnych form magnezu

Na podstawie uzyskanych wyników badań własnych stwierdzono, że zawartość przyswajalnych form magnezu w glebie, zarówno we wszystkich latach 11. rotacji, jak i po zakończeniu 6. i 10. rotacji, była istotnie determinowana stosowanym nawożeniem (tab. 9, tab. 41 - aneks). Uzyskane wyniki analiz próbek glebowych zebranych po zbiorze każdej z badanych roślin uprawianych w 11. rotacji zmianowania pozwalają na stwierdzenie, że w największym stopniu do wzrostu zawartości Mg w glebie przyczyniło się, na ogół, nawożenie obornikiem. Natomiast najmniejszą zawartość omawianego składnika w warstwie ornej gleby odnotowano po aplikacji nawozów mineralnych. Długotrwała aplikacja nawozów mineralnych lub obornika na obiektach niewapnowanych wywiera istotny wpływ na zawartość przyswajalnych form magnezu w glebie [Stępień i in., 2018, Viet i in. 2023]. Z przeprowadzonych przez powyższych autorów badań wynika, że większą ilością omawianego składnika, w stosunku do obiektów, gdzie stosowano nawożenie mineralne lub naturalno-mineralne, charakteryzowały się gleby nawożone obornikiem. Potwierdza to, że omawiany nawóz naturalny wpływa korzystnie na zawartość przyswajalnych form magnezu w glebie.

Tabela 9. Zawartości przyswajalnych form magnezu w glebie [mg·kg⁻¹] w zależności od rodzaju stosowanego nawożenia

Rotacja/ Lata	Stosowane nawożenie		
	Obornik	NPK	Obornik + NPK
11/2014	57,18 a	35,54 c	46,56 b
11/2015	52,14 a	36,76 c	39,16 b
11/2016	43,07 a	36,85 c	42,43 b
11/2017	43,83 b	29,69 c	48,67 a

Odnotowano, że po zakończeniu uprawy pszenicy ozimej kończącej 6. i 10. rotację zmianowania aplikacja obornika była również najkorzystniejsza w stosunku do zawartości Mg w glebie. Uzyskane wartości tej cechy były wyższe w porównaniu do odnotowanych w glebach, gdzie stosowano łączne nawożenie obornikiem i NPK oraz wyłącznie nawozy mineralne, odpowiednio

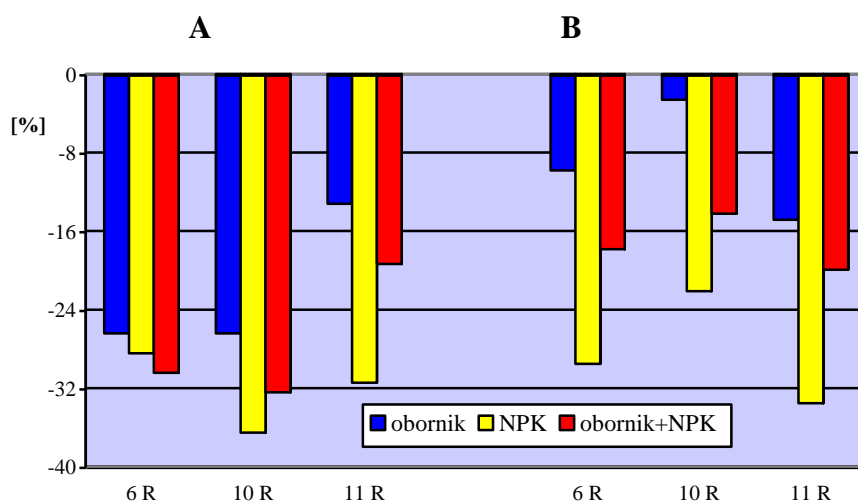
o 33,8 i 14,3% oraz 6,6 i 25,1%. Według Blecharczyka i in. [2018], regularna aplikacja obornika w dawce $30 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$, skutkuje wzrostem zawartości przyswajalnych form magnezu w glebie w porównaniu z obiektami, gdzie stosuje się nawożenie NPK. Łączne stosowanie nawożenia obornikiem z nawozami mineralnymi lub bez NPK badali także Suwara i in. [2018]. Stwierdzili, że systematyczne stosowanie omawianego nawozu naturalnego determinuje zwiększenie zawartości przyswajalnych form magnezu w glebie. Podobną tendencję stwierdzono również w pracy Pikuły [2018], która podaje, że systematyczna aplikacja obornika w dawce $40 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ co 4 lata doprowadziła do wzrostu zawartości przyswajalnych form magnezu w glebie. Wieloletnia aplikacja obornika, przez okres powyżej 33 lat, skutkowałą wzrostem wartości omawianego składnika, o czym informują Lenart i in. [2018]. Autorzy wskazują, że obok nawożenia, również system uprawy wywiera istotny wpływ na zawartość magnezu w glebie. Przy czym większą jego ilość odnotowano na obiektach z siewem bezpośrednim.

Należy również zauważyć, że zawartość przyswajalnych form magnezu w glebie przed założeniem doświadczenia (1974 r.) wynosiła $61,90 \text{ mg Mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ – II klasa zasobności (tab. 40 - aneks). Po 24. latach prowadzenia eksperymentu gleba nawożona obornikiem i NPK zmieniła klasę na średnią (III klasa zasobności). Po 10. rotacji zmianowania, na wszystkich obiektach nawozowych gleby charakteryzowały się III klasą zasobności. Natomiast po 44 latach prowadzenia doświadczenia zmianę klasyfikacji gleby (IV klasa) – niska zasobność, zauważono jedynie na obiekcie, gdzie aplikowano nawozy mineralne (tab. 8).

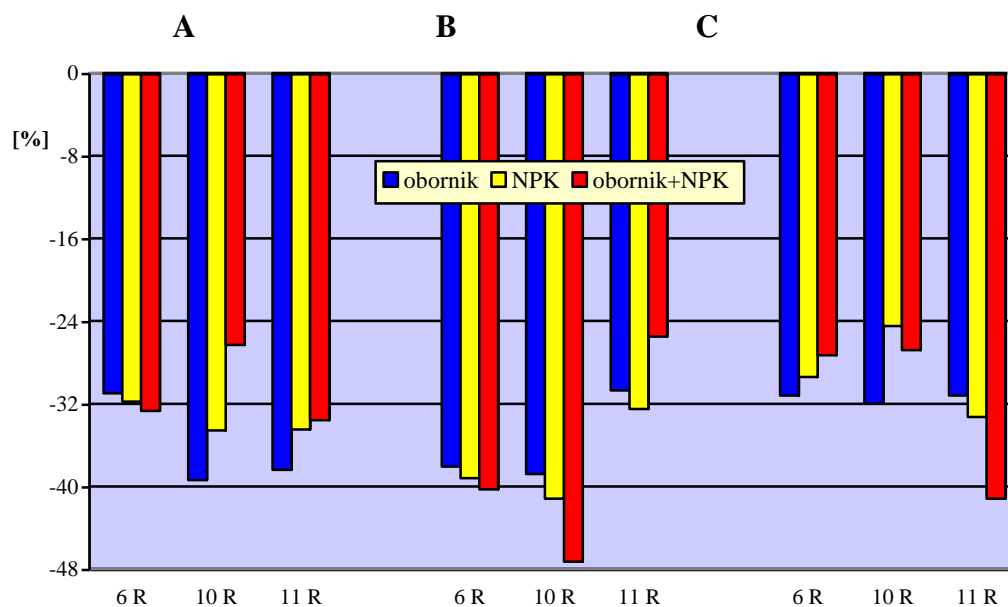
Na rysunku 11 przedstawiono spadek zawartości N-ogółem i C-organicznego w glebie [w %] po 6., 10., i 11. rotacji zmianowania, w zależności od rodzaju stosowanego nawożenia, w porównaniu do wartości wyjściowych z 1974 r., które przyjęto za 100%. Okazało się, że największe, niekorzystne zmniejszenie ilości azotu ogółem i węgla organicznego po wymienionych wyżej rotacjach, odnotowano na glebach, gdzie stosowano nawożenie mineralne (za wyjątkiem ilości C_{org} w 6. rotacji). Z kolei 10. rotacja okazała się tą, po której wystąpił największy spadek zawartości N-ogółem w badanych glebach, a prowadzenie doświadczenia w 11. rotacji zakończyło się uzyskaniem najmniejszej ilości C_{org} .

Rysunek 12 przedstawia spadek zawartości przyswajalnych form fosforu (A), potasu (B) i magnezu (C) w glebie [w %] po 6., 10., i 11. rotacji zmianowania, w zależności od rodzaju stosowanego nawożenia, w porównaniu do wartości wyjściowej z 1974 r., które przyjęto za 100%. Okazało się, że największe, niekorzystne zmniejszenie ilości przyswajalnych form P (rys. 12A), K (rys. 12B) oraz Mg (rys. 12C) po wymienionych wyżej rotacjach, odnotowano na ogół na glebach, gdzie stosowano nawożenie odpowiednio: obornikiem, obornikiem+NPK oraz obornikiem. Z kolei 10. rotacja okazała się tą, po której wystąpił na ogół największy spadek zawartości P i K w badanych glebach, a zakończenie eksperymentu w 11. rotacji zmianowania spowodowało

uzyskanie najmniejszej ilości przyswajalnych form Mg.



Rys. 11. Spadek zawartości N-ogółem (A) i C-organicznego (B) w glebie [w %] po 6., 10., i 11. rotacji zmianowania, w zależności od rodzaju stosowanego nawożenia, w porównaniu do wartości wyjściowej z 1974 r.



Rys. 12. Spadek zawartości przyswajalnych form fosforu (A), potasu (B) i magnezu (C) w glebie [w %] po 6., 10., i 11. rotacji zmianowania, w zależności od rodzaju stosowanego nawożenia, w porównaniu do wartości wyjściowej z 1974 r.

5.1.2.2. Zawartość mikroelementów

Zawartość przyswajalnych form miedzi

W przeprowadzonych badaniach własnych stwierdzono, że zawartość przyswajalnych form miedzi we wszystkich latach 11. rotacji zmianowania była istotnie determinowana zastosowanym rodzajem nawożenia (tab. 10). Takie same zależności odnotowano po uprawie pszenicy ozimej kończącej 6. i 10. rotację (tab. 42 - aneks). Jak podaje Pikula [2014] największą zawartość przyswajalnych form Cu odnotowano na obiektach nawożonych obornikiem. Wskazuje to, że regularna aplikacja tego naturalnego nawozu prowadzi do wzrostu zawartości omawianego składnika w glebie. Jak podaje autorka pierwiastek ten jest niezbędny szczególnie w przypadku roślin wrażliwych na jego niedobór. Z kolei Mazur i Mazur [2016] oraz Rutkowska i in. [2009] odnotowali, że zastosowanie nawozów mineralnych i obornika przez okres wielu lat zwiększyło w największym stopniu zawartość Cu w glebie.

Na podstawie uzyskanych wyników po zbiorze roślin uprawianych w trzech latach 11. rotacji zmianowania (2014-2016) stwierdzono, że stosowanie obornik w największym stopniu przyczyniło się do wzrostu zawartości przyswajalnych form miedzi w warstwie ornej gleby (tab. 10). Natomiast po zakończeniu eksperymentu (2017 r.) najwyższą wartością omawianego składnika mineralnego charakteryzowała się gleba, gdzie aplikowano nawozy mineralne. Murawska i in. [2015] podają, że stosowanie wysokich dawek nawożenia mineralnego skutkuje obniżeniem wartości pH gleby, co w efekcie prowadzi do wzrostu pobierania przyswajalnych form miedzi przez większość uprawianych gatunków, a tym samym do obniżenia się ilości omawianego pierwiastka w glebie. Łączne stosowanie obornika i nawozów mineralnych badali w swoim doświadczeniu Suwara i in. [2018], którzy stwierdzili, że zastosowane nawożenie nie różnicowało istotnie poziomu mikroelementów, w tym miedzi w glebie. Natomiast Badora [2002], Lipiński [2013] oraz Murawska i in. [2015] podają, że nawożenie mineralne sprzyja zakwaszeniu, co z kolei prowadzi do wzrostu przyswajalnych form omawianego mikroelementu w glebie.

Tabela 10. Zawartości przyswajalnych form miedzi w glebie [$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$] w zależności od rodzaju stosowanego nawożenia

Rotacja/ Lata	Stosowane nawożenie		
	Obornik	NPK	Obornik + NPK
11/2014	3,78 a	3,02 c	3,19 b
11/2015	4,20 a	3,47 c	3,67 b
11/2016	4,14 a	3,51 c	3,78 b
11/2017	4,07 b	4,17 a	4,12 ab

Podobną tendencję jak w trzech latach 11. rotacji zmianowania odnotowano po 6. i 10. rotacji, gdzie po aplikacji obornika uzyskano najwyższe zawartości przyswajalnych form miedzi w warstwie ornej gleby (tab. 42 - aneks). Były one istotnie wyższe w stosunku do obiektów z łączną aplikacją obornika+NPK oraz nawożeniem mineralnym, odpowiednio o: 16,1 i 21,0% oraz 21,4 i 26,1%.

Należy również zwrócić uwagę, że wartości omawianej cechy jakościowej gleby, stwierdzone dla badanych obiektów badawczych po 11. rotacji zmianowania, nie odbiegały znacząco od zawartości przyswajalnych form miedzi oznaczonej w próbkach gleby przed założeniem doświadczenia (1974 r). Przy czym były one niższe w granicach od 0,95 do 3,3%. Poza tym zauważono, że zarówno przed założeniem doświadczenia, jak i po 6., 10., i wszystkich latach 11. rotacji zmianowania, badane gleby nie zmieniły klasy zasobności (II klasa) – ocena zasobności średnia.

Zawartość przyswajalnych form cynku

Na podstawie wyników uzyskanych z wieloletniego eksperymentu nawozowego prowadzonego w RZD w Wierzchucinku stwierdzono, że zawartość przyswajalnych form omawianego składnika w glebie w 11. rotacji oraz po zakończeniu 6. i 10. rotacji także była istotnie determinowana rodzajem zastosowanego nawożenia roślin uprawianych w zmianowaniu (tab. 11, tab. 42 - aneks). Podobne zależności stwierdzono w pracach Gräbera i in. [2005] oraz Mazura i Mazura [2016]. Z badań przeprowadzonych przez Murawską i in. [2015] wynika, że poziom przyswajalnych form cynku w glebie jest istotnie różnicowany rodzajem zastosowanego nawożenia potasowego i azotowego. Autorzy odnotowali istotnie większą zawartość tego składnika w glebie na obiektach z wysokimi dawkami nawozów azotowych. Przy czym na podkreślenie zasługuje fakt, że poziom przyswajalnych form cynku był największy na obiektach o najmniejszej wartości pH gleby, które wynosiło 3,7.

Tabela 11. Zawartości przyswajalnych form cynku w glebie [mg·kg⁻¹] w zależności od rodzaju stosowanego nawożenia

Rotacja/ Lata	Stosowane nawożenie		
	Obornik	NPK	Obornik + NPK
11/2014	5,34 a	4,10 c	4,53 b
11/2015	4,32 a	3,84 b	4,23 a
11/2016	5,27 a	4,17 c	4,83 b
11/2017	4,53 a	3,76 b	4,51 a

W oparciu o wyniki analiz próbek glebowych zebranych po zbiorze roślin uprawianych w 11. rotacji zamianowania stwierdzono, że aplikacja obornika przyczyniła się do uzyskania największych zawartości przyswajalnych form cynku w glebie (tab. 11). Przy czym wartości tej cechy uzyskane w kolejnych latach omawianej rotacji były wyższe w stosunku do obiektów, gdzie nawożono nawozami mineralnymi lub łącznie obornikiem i NPK w zakresie odpowiednio: do 15,2 do 23,2% (2014 r.), od 2,1 do 11,1% (2015 r.), od 8,4 do 20,9% (2016 r.) oraz od 0,4 do 17,0% (2017 r.). Powyższa zależność jest zgodna z wynikami zanotowanymi przez Szewczuka [2022], który podaje, że z dawką 30 ton tego naturalnego nawozu wnosi się do gleby około 1200 g cynku. Do roślin szczególnie wrażliwych na jego niedobór zaliczamy min. kukurydzę chmiel, drzewa owocowe oraz len. Barszczewski i Ducka [2013] również prowadzili badania nad wpływem nawożenia mineralnego i naturalnego na właściwości gleby. Zanotowali oni, że obiekty nawożone obornikiem charakteryzowały się większą zawartością przyswajalnych form cynku w porównaniu z obiektami nawożonymi mineralnie. Z kolei Podleśna [2015] podaje, że nawożenie gleby siarką siarczanową i elementarną prowadzi do wzrostu przyswajalnych form omawianego mikroelementu w glebie. Jest to spowodowane zakwaszeniem gleby, a co za tym idzie, zwiększeniem przyswajalności cynku.

Wyniki analiz próbek glebowych uzyskane po zbiorze pszenicy ozimej kończącej 6. oraz 10. rotację zmianowania potwierdzają, że stosowanie obornika determinuje wzrost zawartości przyswajalnych form cynku w glebie (tab. 42- aneks). Różnice w zawartości tego składnika pokarmowego odnotowane w glebie po aplikacji nawozu naturalnego w porównaniu do obiektów, gdzie łącznie aplikowano obornik i nawozy mineralne oraz wyłącznie NPK, wynosiły odpowiednio: 19,4 i 25,2% oraz 16,2 i 24,7%.

Należy również podkreślić, że zawartości przyswajalnych form cynku oznaczonych w próbkach glebowych z poszczególnych obiektów badawczych, po 24 latach prowadzenia wieloletniego doświadczenia nawozowego, były większe od stwierdzonych zarówno w 10. jak i wszystkich latach 11. rotacji. Poza tym stwierdzono, że gleba przed założeniem doświadczenia charakteryzowała się wysoką zawartością cynku (I klasa zasobności), po 6. rotacji odnotowano zmianę klasy gleby na II (średnia zawartość), za wyjątkiem gleby, gdzie aplikowano obornik. Po 40. latach eksperymentu oraz we wszystkich latach 11. rotacji zmianowania, rodzaj aplikowanego nawożenia nie spowodował zmiany klasyfikacji badanych gleb.

Zawartości przyswajalnych form manganu

Na podstawie przeprowadzonych badań własnych stwierdzono, że zawartości przyswajalnych form manganu w glebie w 4. latach 11. rotacji, a także po 6. i 10. rotacji zmianowania były istotnie zależne od wpływu zastosowanego rodzaju nawożenia roślin uprawianych na plantacji (tab. 12, tab.

42 - aneks). Mazur i Mazur [2016] wskazują, że po 34. latach stosowania nawożenia wyższą zawartość Mn w glebie, stwierdzono po zastosowaniu obornika w stosunku do obiektu, gdzie aplikowano NPK. Jak podaje Gondek [2009] w wyniku długotrwałego nawożenia gleby, na której nie stosowano wapnowania, dochodzi do obniżenia poziomu wartości pH, a co za tym idzie do jej zakwaszenia. Autor podaje, że zawartość przyswajalnych form manganu w tej glebie była o ponad 100% większa od zawartości odnotowanej na obiektach wapnowanych, niezależnie od zastosowanego nawożenia.

Wpływ stosowania wieloletniego nawożenia obornikiem na poziom mikroelementów w glebie analizowała w swoich badaniach Pikula [2021]. Autorka stwierdziła, że naturalnym źródłem manganu jest obornik, a szczególnie wartościowym i bogatym w większość mikroelementów jest ten pochodzący z chowu bydła. Zawartość tego składnika pokarmowego w suchej masie omawianego nawozu naturalnego wynosi $345 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. Natomiast obornik owczy zawiera $290 \text{ mg Mn} \cdot \text{kg}^{-1}$, pochodzący od trzody chlewnej - $288 \text{ mg Mn} \cdot \text{kg}^{-1}$, a koński - $270 \text{ mg Mn} \cdot \text{kg}^{-1}$. Do roślin najbardziej wrażliwych na niedobór omawianego składnika zaliczyć można ziemniaka oraz zboża, w tym zwłaszcza jęczmień. Badania Czuby [2000] potwierdzają, że łączne stosowanie obornika z nawozami mineralnymi, a także samego obornika, skutkuje wzrostem zawartości przyswajalnych form tego składnika w glebie, w porównaniu do obiektów nawożonych wyłącznie mineralnie. Autor podkreśla, że w obu przypadkach odnotowano dodatni bilans manganu po zbiorze uprawianych roślin. Powyższe tendencje stwierdzono w 11. rotacji badań własnych (tab. 12).

Tabela 12. Zawartości przyswajalnych form manganu w glebie [$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$] w zależności od rodzaju stosowanego nawożenia

Rotacja/ Lata	Stosowane nawożenie		
	Obornik	NPK	Obornik + NPK
11/2014	95,0 a	85,5 b	70,2 c
11/2015	90,7 b	94,7 a	95,4 a
11/2016	87,4 a	74,0 c	83,7 b
11/2017	64,3 a	61,4 b	64,2 a

W trzech latach (2014, 2016 i 2017), najwyższe wartości omawianej cechy, uzyskano w glebach nawożonych obornikiem, natomiast w 2015 r. najkorzystniej na ilość przyswajalnego Mn działała łączna aplikacja obornika i NPK. Poza tym, od drugiego roku tej rotacji, zawartość manganu na wszystkich obiektach nawozowych ulegała obniżeniu. Należy także podkreślić, że przed założeniem wieloletniego nawozowego eksperymentu

statycznego w RZD w Wierzchucinku, zawartość przyswajalnych form Mn w warstwie ornej gleby wynosiła 103,5 mg·kg⁻¹ (tab. 42 - aneks). Była ona, w zależności od stosowanego nawożenia, większa od stwierdzonych w glebach po zakończeniu 6. (5,3-34,6%), 10. (7,3-19,3%) i czterech latach 11. rotacji zmianowania (7,8-40,7%). Można także zauważyć, że po zakończeniu badań polowych (2017 r.) ilość tego przyswajalnego dla roślin mikroelementu w glebie była najniższa i w stosunku do wartości wyjściowej odnotowano spadek w granicach od 37,9 do 40,7%.

Po 24 latach prowadzenia wieloletniego doświadczenia nawozowego, zawartości przyswajalnych form manganu oznaczonych w glebach z poszczególnych obiektów badawczych, były większe od stwierdzonych zarówno w 10. jak i wszystkich latach 11. rotacji. Poza tym stwierdzono, że gleba przed założeniem doświadczenia charakteryzowała się II (średnią) klasą zawartości w stosunku do manganu i po 6., 10., i 11. rotacji zmianowania nie zmieniła się.

Zawartości przyswajalnych form żelaza

W przeprowadzonych badaniach własnych stwierdzono, że zawartość przyswajalnych form żelaza w glebie, w czterech latach 11. rotacji oraz po uprawie pszenicy ozimej kończącej 6. i 10. rotację zmianowania, była istotnie różnicowana wpływem rodzaju nawożenia uprawianych roślin (tab. 13, tab. 42 - aneks). Jak podaje Kobuz [2021] w efekcie długoletniej aplikacji obornika dochodzi do wzrostu ilości przyswajalnych form żelaza w glebie, w porównaniu do obiektów, gdzie nie stosowano tego nawozu naturalnego. Autorka podaje, że za szczególnie bogate źródło omawianego składnika uznaje się obornik świński zawierający w 30 tonach nawet 18000 gramów żelaza przyswajalnego. Naturalny nawóz wpływa więc na wzrost zawartości żelaza w glebie.

Tabela 13. Zawartości przyswajalnych form żelaza w glebie [mg·kg⁻¹] w zależności od rodzaju stosowanego nawożenia

Rotacja/ Lata	Stosowane nawożenie		
	Obornik	NPK	Obornik + NPK
11/2014	783,8 a	497,8 c	528,9 b
11/2015	521,1 b	497,8 c	610,6 a
11/2016	576,4 b	582,8 b	785,1 a
11/2017	591,3 c	636,8 a	603,9 b

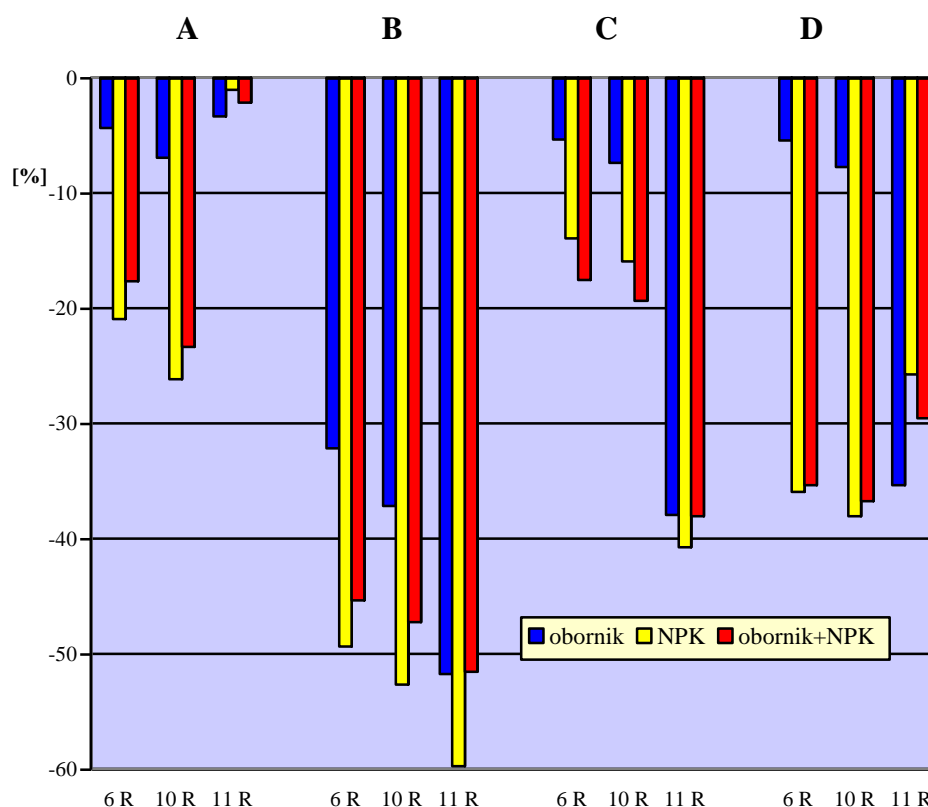
Po uprawie pszenicy ozimej kończącej 11. stwierdzono, że aplikacja nawozów mineralnych w największym stopniu przyczyniła się do wzrostu zawartości

przyswajalnych form żelaza w glebie. W 2 i 3 roku 11. rotacji największym poziomem omawianego składnika charakteryzowały się obiekty nawożone naturalno-mineralnie. Z badań przeprowadzonych przez Łabętowicza i Rutkowską [2001] wynika, że aplikacja nawozów mineralnych prowadzi do wzrostu przyswajalnych form żelaza w glebie. Autorzy podkreślają, że stosowanie soli o kwaśnym odczynie, takich jak np.: azotan amonu i siarczan amonu, skutkuje zwiększeniem zawartości omawianego składnika w glebie. Niskie wartości pH gleby determinują wzrost dostępności mikroelementów w glebie, zwłaszcza żelaza i cynku. Stosowanie nawożenia mineralnego i organicznego stanowiło także przedmiot badań Nowaka i Zbroszczyk [2004], którzy stwierdzili, że nawożenie NPK prowadzi do wzrostu zawartości poziomu żelaza w glebie. W przeprowadzonym doświadczeniu własnym stwierdzono istotny wpływ zastosowanego nawożenia na zawartość Fe w badanych glebach. Okazało się, że w pierwszych dwóch latach 11. rotacji największy wpływ na zawartość tego składnika miała aplikacja obornika lub łączne nawożenie obornika i NPK. Takie same tendencje uzyskano również po 6. i 10. rotacji zmianowania. Natomiast w 2016 r. i 2017 r. najkorzystniej na ilość Fe w glebie oddziaływało nawożenie łączne naturalno-mineralne lub aplikacja NPK.

Należy także zauważyć, że przed założeniem doświadczenia w RZD w Wierzchucinku badana gleba charakteryzowała się średnią zawartością przyswajalnego żelaza ($857,1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) - II klasa (tab. 42 - aneks). Po 6., 10. oraz w czterech latach 11. rotacji stwierdzono zmianę klasyfikacji zawartości omawianego składnika do poziomu niskiego (III klasa) - na obiektach nawożonych mineralnie oraz naturalno-mineralnie (za wyjątkiem 2016 r.). W trzecim roku 11. rotacji na obiekcie nawożonym obornikiem w połączeniu z nawozami mineralnymi zaobserwowano ponowną zmianę klasyfikacji zawartości w przyswajalne formy omawianego składnika do poziomu średniego (II klasa). Natomiast w pierwszym roku 11. rotacji zmianowania oraz po zakończeniu 6. i 10. rotacji po zastosowaniu aplikacji obornika, glebę zaliczono do II klasy zawartości w stosunku do Fe. Gleba w kolejnych latach 11. rotacji na obiektach gdzie stosowano obornik zmieniła klasę na III - o niskiej zawartości Fe.

Rysunek 13 przedstawia różnice w zawartości przyswajalnych form miedzi (A), cynku (B), manganu (C) i żelaza (D) w glebie [w %] po zakończeniu 6., 10., i 11. rotacji zmianowania, w zależności od rodzaju stosowanego nawożenia, w porównaniu do wartości wyjściowej z 1974 r., które przyjęto za 100%. Stwierdzono, że największy spadek ilości przyswajalnych form Cu (rys. 13A), Zn (rys. 13B) i Fe (rys. 13D), po wymienionych wyżej rotacjach, odnotowano na ogół na glebach, gdzie stosowano nawożenie mineralne. Natomiast w przypadku Mn (rys. 13C) tendencja ta była spowodowana łączną aplikacją obornika+NPK. Z kolei 10. rotacja okazała się tą, po której wystąpił największy spadek zawartości miedzi i żelaza, a zakończenie doświadczenia w 11. rotacji zmianowania spowodowało uzyskanie najmniejszej ilości przyswajalnych form

cynku i manganu w badanych glebach.



Rys. 13. Spadek zawartości przyswajalnych form miedzi (A), cynku (B), manganu (C) i żelaza (D) w glebie [w %] po 6., 10., i 11. rotacji zmianowania, w zależności od rodzaju stosowanego nawożenia, w porównaniu do wartości wyjściowej z 1974 r.

5.1.2.3. Zawartość ołowiu, kadmu, chromu i niklu

W przeprowadzonym eksperymencie własnym, na początku i końcu 11. rotacji zmianowania, odnotowano brak statystycznie istotnego wpływu aplikowanych rodzajów nawożenia na zawartości przyswajalnych form ołowiu w glebie (tab. 14). Odmiennie wyniki stwierdzono 20 lat wcześniej, tj. po zakończeniu 6. rotacji (tab. 43 - aneks). Z badań przeprowadzonych przez Ociepę i in. [2014] wynika, że pod wpływem nawożenia mineralno-organicznego zwiększył się poziom przyswajalnych form ołowiu w glebie, w stosunku do obiektu kontrolnego bez nawożenia. Jak podają autorzy zastosowanie w/w nawożenia nie miało wpływu na całkowitą zawartość tego metalu ciężkiego.

Na podstawie uzyskanych wyników przeprowadzonego eksperymentu po zakończeniu 11. rotacji zmianowania stwierdzono, że zastosowanie obornika na poletku doświadczalnym przyczyniło się do niewielkiego wzrostu przyswajalnych form ołowiu w glebie (o $0,2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) w porównaniu do wartości tej cechy odnotowanej na obiekcie, gdzie aplikowano NPK oraz o $0,7 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ w stosunku do nawożonego naturalno-mineralnie. Z kolei łączna aplikacja nawozu naturalnego i mineralnego przyczyniła się do spadku poziomu omawianego składnika w glebie w stosunku do wyżej wymienionych. Potwierdzają to badania przeprowadzone przez innych autorów, którzy wskazują, że zastosowanie wieloletniego nawożenia nie różnicuje istotnie poziomu ołowiu w glebie, choć może powodować wzrost jego zawartości [Ociepa i in., 2014, Mazur i Mazur, 2016].

Tabela 14. Zawartości przyswajalnych form ołowiu w glebie [$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$] w zależności od rodzaju stosowanego nawożenia

Rotacja/ Lata	Stosowane nawożenie		
	Obornik	NPK	Obornik + NPK
11/2014	11,2	10,3	10,5
11/2017	10,1	9,9	9,4

Wpływ zastosowanego nawożenia mineralnego i organicznego stanowił również przedmiot badań Grucy-Królikowskiej i Waclawka [2006]. Stwierdzili oni, że w wyniku aplikacji siarczanu amonu i saletry amonowej dochodzi do obniżenia poziomu wartości pH gleby, co skutkuje zwiększeniem zawartości przyswajalnych form ołowiu w glebie. Jak podają autorzy nawożenie fosforowe ogranicza ilość przyswajalnego ołowiu w glebie, ponieważ w jego obecności pierwiastek ten przechodzi w trudno rozpuszczalny fosforan ołowiu. Z kolei aplikacja potasu, zwłaszcza w formie chlorowej, może prowadzić do wzrostu przyswajalnych form tego metalu w glebie.

Z kolei po zakończeniu 6. rotacji zmianowania stosowanie obornika łącznie z nawozami mineralnymi doprowadziło do uzyskania istotnie największej zawartości przyswajalnych form ołowiu w glebie i to większej w porównaniu z obiektem, gdzie aplikowano obornik oraz obiektem nawożonym mineralnie, odpowiednio o: $1,0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (tj. 8,6%) oraz $2,5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (tj. 24,5%). Należy również zauważyć, że przy zakładaniu wieloletniego doświadczenia nawozowego (1974 r.) zawartość przyswajalnych form ołowiu wynosiła $13,78 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ i w przedstawionych w celu porównania w pracy rotacjach (6 i 10) malała w stosunku do wartości początkowej. Po zakończeniu 6. rotacji zmianowania różnica ta mieściła się w granicach od 7,8 do 26,0%, po pierwszym roku 11. rotacji w zakresie od 18,7 do 25,3% oraz po zakończeniu badań w 2017 r. w zakresie od 36,4 do 42,2%.

Wpływ łącznej wieloletniej aplikacji nawożenia organicznego

i mineralnego na poziom kadmu w glebie stanowił przedmiot badań Kopia i in. [1997]. Podają oni, że zarówno nawozy fosforowe jak i wieloskładnikowe charakteryzują się średnim poziomem tego metalu ciężkiego. Ilość kadmu w nawozie jest uzależniona od surowca, z którego został on wyprodukowany. Jak zauważyli autorzy, do wzrostu zawartości kadmu w glebie może przyczynić się regularna aplikacja superfosfatów. W przeprowadzonym eksperymencie własnym stwierdzono, że zawartości przyswajalnych form kadmu w glebie po zbiorze ziemniaków i pszenicy ozimej w analizowanych latach 11. rotacji zmianowania oraz po uprawie pszenicy ozimej kończącej 6. rotację, były na niskim poziomie. Należy zwrócić uwagę, że wartości te nie zostały precyzyjnie oznaczone ze względu na zbyt małą koncentrację tego składnika w badanych glebach (tab. 15, tab. 43 - aneks).

Tabela 15. Zawartości przyswajalnych form kadmu w glebie [$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$] w zależności od rodzaju stosowanego nawożenia

Rotacja/ Lata	Stosowane nawożenie		
	Obornik	NPK	Obornik + NPK
11/2014	< 1	< 1	< 1
11/2017	< 1	< 1	< 1

Według Kopia i in. [1997] 30. letnia zrównoważona aplikacja nawozów mineralnych nie doprowadziła do wzrostu przyswajalnych form kadmu w glebie. Wynika to z faktu, że ilość tego metalu wynoszonego z plonem jest większa od wprowadzanej wraz z nawozami. Autorzy podają, że na poletkach, z których zebrano większy plon roślin odnotowano niższą zawartość omawianego składnika w stosunku do stwierdzonej przed założeniem wieloletniego statycznego doświadczenia. Badania nad wpływem wieloletniego nawożenia stanowiły również przedmiot badań Grucy-Królikowskiej i Waclawka [2006], którzy w przeciwieństwie do uzyskanych wyników własnych odnotowali, że wieloletnia aplikacja nawozów fosforowych może skutkować zwiększeniem ilości przyswajalnych form kadmu w glebie. Autorzy podają, że optymalnym terminem aplikacji superfosfatów jest jesień, ponieważ obecny w nich omawiany pierwiastek może przejść w formy trudno rozpuszczalne, pozostające poza zasięgiem systemu korzeniowego roślin uprawnych. W pracy Maciołka i in. [2013] zauważono, że źródłem kadmu w glebie są nawozy fosforowe, a także komunalne osady ściekowe czy wapno magnezowe. Natomiast do nawozów potasowych zwiększających mobilność kadmu oraz jego dostępność dla uprawianych roślin zaliczyć można siarczany i chlorki potasu. Jak podają Czeczot i Majewska [2004] superfosfaty mogą zawierać od 10 do 100 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, a ich regularna aplikacja prowadzi do skażenia gleby. Po wprowadzeniu omawianego pierwiastka do gleby nie ulega on rozkładowi, lecz krąży w środowisku.

Nawozy, a wśród nich zwłaszcza komunalne osady ściekowe, stanowią jedno ze źródeł chromu w glebie. Omawiany metal ciężki występuje w niej na różnych stopniach utlenienia. Przy czym chrom(VI) jest uznawany za około 100. krotnie bardziej toksyczny dla ludzi i zwierząt od chromu(III). Jest to spowodowane większą przyswajalnością i mobilnością tej formy. Chrom(VI) wykazuje działanie kancerogenne i mutagenne. Aplikacja obornika prowadzi do wzrostu zawartości mikroelementów, w tym chromu w glebie, natomiast zastosowane nawożenie mineralne nie weryfikuje jego zawartości. W przeprowadzonych badaniach własnych stwierdzono, że zawartość chromu była istotnie determinowana zastosowanym sposobem nawożenia roślin uprawianych w pierwszym i ostatnim roku 11. rotacji zmianowania (tab.16). Nie odnotowano takiej tendencji w 6. rotacji (tab. 43 - aneks).

Tabela 16. Zawartości przyswajalnych form chromu w glebie [$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$] w zależności od rodzaju stosowanego nawożenia

Rotacja/ Lata	Stosowane nawożenie		
	Obornik	NPK	Obornik + NPK
11/2014	12,75	11,81	11,96
11/2017	14,55	11,81	13,03

Największym poziomem przyswajalnych form chromu po uprawie ziemniaka zaczynającego 11. rotację zmianowania i uprawie pszenicy ozimej ją kończącej charakteryzował się obiekt nawożony obornikiem. Po upływie 4 lat w tej rotacji poziom omawianego pierwiastka na tym obiekcie uległ zwiększeniu o $1,8 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ w stosunku do odnotowanego w 2014 roku. Natomiast najniższym poziomem omawianego składnika charakteryzowały się obiekty, gdzie aplikowano nawożenie mineralne – $11,81 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. Na tym obiekcie nie stwierdzono zmiany zawartości chromu po zakończeniu 11. rotacji w stosunku do poziomu z 2014 roku. Z kolei na poletku nawożonym naturalno-mineralnie po 4 latach stwierdzono wzrost ilości omawianego składnika o $1,34 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. Po uprawie pszenicy ozimej w 11. rotacji poziom chromu na obiekcie nawożonym obornikiem zwiększył się w stosunku do nawożonego mineralnie i naturalno-mineralnie odpowiednio o: 18,8% i 10,4%. Nawożenie organiczne prowadzi do wzrostu zawartości przyswajalnych form chromu w glebie w stosunku do obiektów, gdzie go nie stosowano. Jak podają Żurek i Prokopiuk [2011] na poziom omawianego pierwiastka w glebie, oprócz czynników antropogenicznych, może wpływać także rodzaj skały macierzystej.

Według Janowiak i in. [1997] poziom przyswajalnych form niklu w glebie jest uzależniony m.in. od zastosowanego nawożenia, wartości pH gleby oraz rodzaju skały macierzystej. Autorki podają, że systematyczna aplikacja nawozów mineralnych, a także obornika w niewielkim stopniu przyczyniły się do wzrostu poziomu przyswajalnych form niklu w glebie. W przeprowadzonych

badaniach stwierdzono, że ilość niklu nie była istotnie determinowana rodzajem zastosowanego nawożenia i zmianowania. Po uprawie pszenicy ozimej kończącej 6. rotację największym poziomem omawianego składnika charakteryzowały się obiekty nawożone obornikiem. Podobną tendencję stwierdzono po zakończeniu rotacji 11. a także po uprawie ziemniaka jadalnego w 2014 roku (tab. 17, tab. 43 - aneks).

Tabela 17. Zawartości przyswajalnych form niklu w glebie [$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$] w zależności od rodzaju stosowanego nawożenia

Rotacja/ Lata	Stosowane nawożenie		
	Obornik	NPK	Obornik + NPK
11/2014	5,68	4,87	4,96
11/2017	6,25	4,94	4,90

Nawożenie mineralne w największym stopniu przyczyniło się do spadku poziomu przyswajalnych form niklu w glebie po zakończeniu 6. rotacji, a także w pierwszym i ostatnim roku rotacji 11. Na obiektach nawożonych naturalno-mineralnie w 6. rotacji poziom omawianego składnika przybrał wartości pośrednie. Podobną tendencję stwierdzono na ogół po uprawie ziemniaka i pszenicy ozimej w rotacji 11. Według Ociepy [2011], głównym źródłem niklu w glebie jest skała macierzysta. Zazwyczaj gleby, w których występuje wysoki poziom żelaza charakteryzują się także dużą zawartością przyswajalnych form niklu. Stosowanie nawożenia mineralnego i organicznego stanowiło także przedmiot badań Grucy-Królikowskiej i Waclawka [2006], którzy stwierdzili, że aplikacja nawozów nie wywiera istotnego wpływu na poziom przyswajalnych form niklu w glebie. Na zawartość w glebie tego metalu ciężkiego wpływa przede wszystkim jego poziom w skale macierzystej. Szczególnie cenne badania nad tym zagadnieniem przeprowadziły Nazarkiewicz i Kaniuczak [2012]. Odnotowały one, że wieloletnie zróżnicowane nawożenie obiektów wapnowanych i nie wapnowanych nie wywierało istotnego wpływu na poziom omawianego składnika w warstwie Ap i Bt. Z badań Lipińskiego i Bednarka [1997] wynika, że nawożenie mineralne (N) nie spowodowało wzrostu ilości niklu w glebie. Z kolei nawożenie fosforem doprowadziło do niewielkiego wzrostu ilości omawianego składnika, a zastosowanie potasu nie wywierało żadnego wpływu na ilość niklu. Tę zależność potwierdzają badania Curyły i Jasiewicza [1997], z których wynika, że nawożenie mineralne nie różnicuje istotnie poziomu przyswajalnych form niklu w glebie. Autorzy podają, że na tych obiektach odnotowano obniżenie jego zawartości w porównaniu z obiektami, gdzie nie było ono stosowane.

Na podkreślenie zasługuje fakt, że przed założeniem wieloletniego eksperymentu nawozowego w RZD w Wierzchucinku poziom przyswajalnych form niklu w glebie wynosił $6,20 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. Po 6. i w pierwszym roku 11. rotacji

zawartość ta na wszystkich obiektach, bez względu na zastosowane nawożenie, obniżyła się w stosunku do poziomu wyjściowego z 1974 roku. Po uprawie pszenicy ozimej kończącej 11. rotację na obiekcie, gdzie aplikowano nawozy mineralnie lub naturalno-mineralne ilość omawianego pierwiastka obniżyła się w porównaniu z ilością uzyskaną przed założeniem eksperymentu statycznego, odpowiednio o: 20,3% i 20,9%. Natomiast na obiekcie nawożonym obornikiem jego zawartość była wyższa zaledwie o 0,8% od odnotowanego w 1974 roku.

Zanieczyszczenie gleb metalami ciężkimi nie jest widoczne w krótkim czasie. Konsekwencje mogą pojawiać się po wielu latach i prowadzić do niekorzystnych zmian ekologicznych. Pierwiastki te nie są biodegradowalne, a ulegają jedynie biotransformacji w wyniku procesów fizykochemicznych i biologicznych, które determinują ich mobilność i dostępność w układzie gleba-roślina [Czech i in. 2014]. Zawartość metali ciężkich w glebie może być weryfikowana emisją pyłów ze szlaków komunikacyjnych, terenów przemysłowych czy też intensywnie rozwiniętym rolnictwie na danym obszarze [Franco-Uría i in. 2009, Żurek i Prokopiuk, 2011, Wieczorek i Baran 2013]. Opiswane w niniejszej dysertacji wieloletnie statyczne doświadczenie nawozowe znajduje się w terenie, gdzie w najbliższej odległości nie ma silnie rozwiniętego przemysłu i intensywnie wykorzystywanych arterii komunikacyjnych. W Rozporządzeniu Ministra Środowiska w sprawie standardów jakości gleby i ziemi z dnia 9 września 2002 r. [Rozporządzenie... 2002], podano wartości graniczne dla metali ciężkich w glebach użytkowanych rolniczo. Porównując wyniki uzyskane z przeprowadzonego doświadczenia własnego odnotowano, że badane gleby spełniały standardy dla gleb użytkowanych rolniczo.

5.1.3. Kierunki zmian składu mineralnego gleby w czteroletnim zmianowaniu po zbiorze kolejnych roślin

Jak łatwo zauważyć wartości niektórych parametrów gleby uległy zmniejszeniu na wszystkich obiektach związanych z nawożeniem ziemniaka (wartość pH, zawartość węgla, potasu i cynku w glebie). Jako następny wpływ oddziaływania nawożenia ziemniaka obornikiem uznać można zmniejszenie ogółem w czteroletniu, wartości kwasowości hydrolitycznej oraz ilości przyswajalnych form fosforu i żelaza. Na obiektach, gdzie w 1. roku rotacji aplikowano obornik+NPK zwiększyła się wartość współczynnika Hh oraz żelaza. Nawożenie roślin wyłącznie nawozami mineralnymi skutkowało nie tylko obniżeniem wartości pH gleby, ale przyczyniło się do zmniejszenia w niej zawartości wszystkich składników mineralnych za wyjątkiem azotu, miedzi i żelaza (tab. 18). Kierunki zmian składu mineralnego gleby, po kolejnych uprawianych roślinach w czteroletnim zmianowaniu po 6. rotacji omawianego eksperymentu statycznego, stanowiły przedmiot badań Barczak

i in. [1999]. Autorzy stwierdzili, że ilość węgla organicznego, azotu ogółem, a także przyswajalnych form fosforu i potasu, na wszystkich poletkach eksperymentu uległ obniżeniu. Odnotowano również, że długotrwała aplikacja nawozów mineralnych doprowadziła do obniżenia się wartości pH gleby, średnio o 1,3 jednostki, w porównaniu z poziomem sprzed założenia wieloletniego doświadczenia nawozowego w RZD w Wierchucinku. Podobne tendencje stwierdzono po zakończeniu 11. rotacji zmianowania.

Należy podkreślić, że na wszystkich obiektach nawozowych zwiększyła się zawartość azotu ogółem i zawężeniu uległ stosunek C:N. Potwierdzają to badania Stępnia i in. [2018], z których wynika, że na skutek wieloletniego nawożenia zawężeniu uległ stosunek C:N w glebie, a aplikacja obornika doprowadziła do największego wzrostu zawartości azotu ogółem w porównaniu z obiektami, gdzie go nie stosowano. Obserwowaną w 11. rotacji zależność potwierdzają także badania Bleharczyka i in. [2018]. Odnotowali oni, że regularna aplikacja obornika skutkowała wzrostem ilości węgla organicznego, azotu ogółem a także przyswajalnych form fosforu, potasu i magnezu w porównaniu z obiektami, na których nie był on stosowany. Nawożenie obornikiem i nawozami mineralnymi stanowiły również przedmiot badań Suwary i in. [2018], którzy w wyniku wieloletniego stosowania wymienionego wyżej nawozu naturalnego uzyskali wzrost zawartości węgla organicznego i azotu ogółem. Z kolei w eksperymencie Marksa i in. [2018] zauważono, że długotrwała rezygnacja z obornika skutkowała zmniejszeniem poziomu węgla i azotu w glebie.

Na tej podstawie można wnioskować, w porównaniu ze stanem sprzed ostatniej rotacji, że zasobność w przyswajalne formy badanych składników często malała, przy czym w nieco mniejszym stopniu na obiekcie nawożonym w 1. roku w sposób mieszany, tj. NPK+obornik.

Tabela 18. Kierunki zmian wartości wskaźników zakwaszenia i składu mineralnego gleby w czteroletnim zmianowaniu po zbiorze kolejnych roślin

Gatunek	Termin pomiaru	Sposób nawożenia ziemniaka			Średnio po uprawie gatunku
		Obornik	NPK	NPK+Obornik	
pH [1 M KCl]					
Po IV. roku 10. rotacji	2013	5,5	5,2	5,5	-
Ziemniak	2014/2013	-0,3	-0,3	-0,2	-0,23
Jęczmień jary	2015/2014	-0,1	-0,1	-0,3	-0,17
Rzepak ozimy	2016/2015	-0,1	0,0	-0,6	-0,23
Pszenica ozima	2017/2016	0,3	0,1	0,8	0,40
Zmiana w 11. rotacji	2017/2013	-0,20	-0,20	-0,30	-

cd. tabeli 18 na następnej stronie

cd. tabeli 18

Hh [cmol(+)·kg ⁻¹]					
Po IV. roku 10. rotacji	2013	2,23	2,21	2,13	-
Ziemniak	2014/2013	0,30	1,16	2,44	1,30
Jęczmień jary	2015/2014	-0,93	-1,00	-1,97	-1,30
Rzepak ozimy	2016/2015	0,23	0,20	1,20	0,54
Pszemica ozima	2017/2016	0,00	0,23	-1,07	-0,35
Zmiana w 11. rotacji	2017/2013	-0,40	0,39	0,60	-
Azot ogółem [g·kg ⁻¹ gleby]					
Po IV. roku 10. rotacji	2013	0,73	0,63	0,67	-
Ziemniak	2014/2013	0,06	0,10	0,04	0,07
Jęczmień jary	2015/2014	0,17	-0,04	0,11	0,08
Rzepak ozimy	2016/2015	-0,09	0,07	-0,07	-0,03
Pszemica ozima	2017/2016	-0,01	-0,08	0,05	-0,01
Zmiana w 11. rotacji	2017/2013	0,13	0,05	0,13	-
Węgiel org. [g·kg ⁻¹ gleby]					
Po IV. roku 10. rotacji	2013	11,31	9,05	9,96	-
Ziemniak	2014/2013	-0,44	0,08	-0,33	-0,23
Jęczmień jary	2015/2014	-0,60	-1,23	-0,30	-0,71
Rzepak ozimy	2016/2015	-1,00	0,03	-0,06	-0,34
Pszemica ozima	2017/2016	0,63	0,20	0,03	0,15
Zmiana w 11. rotacji	2017/2013	0,13	0,05	0,13	-
Stosunek C:N					
Po IV. roku 10. rotacji	2013	15,40	14,27	14,90	0,00
Ziemniak	2014/2013	-1,58	-1,70	-1,32	-1,53
Jęczmień jary	2015/2014	-3,09	-1,17	-2,15	-2,14
Rzepak ozimy	2016/2015	-0,11	-0,92	0,87	-0,05
Pszemica ozima	2017/2016	0,90	0,95	-0,67	0,39
Zmiana w 11. rotacji	2017/2013	-3,88	-2,84	-3,27	-
Fosfor przyswajalny [g·kg ⁻¹ gleby]					
Po IV. roku 10. rotacji	2013	41,37	50,90	41,53	0,00
Ziemniak	2014/2013	2,70	-21,75	-7,35	-8,80
Jęczmień jary	2015/2014	4,06	5,24	0,82	3,37
Rzepak ozimy	2016/2015	5,80	-3,44	4,45	2,27
Pszemica ozima	2017/2016	-0,04	-0,18	0,20	-0,01
Zmiana w 11. rotacji	2017/2013	12,52	-20,13	-1,88	-

cd. tabeli 18 na następnej stronie

cd. tabeli 18

Potas przyswajalny [g·kg ⁻¹ gleby]					
Po IV. roku 10. rotacji	2013	54,66	60,52	74,8	-
Ziemniak	2014/2013	2,13	-34,32	-34,87	-22,37
Jęczmień jary	2015/2014	8,24	6,62	19,21	11,36
Rzepak ozimy	2016/2015	-21,98	-2,05	-23,06	-15,70
Pszemica ozima	2017/2016	0,01	-1,69	-6,06	-2,59
Zmiana w 11. rotacji	2017/2013	-11,62	-31,49	-44,78	-
Magnez przyswajalny [mg·kg ⁻¹ gleby]					
Po IV. roku 10. rotacji	2013	45,05	36,02	42,46	-
Ziemniak	2014/2013	12,13	-0,48	4,10	5,25
Jęczmień jary	2015/2014	-5,04	1,22	-7,40	-3,74
Rzepak ozimy	2016/2015	-9,07	0,09	3,27	-1,90
Pszemica ozima	2017/2016	0,76	-7,16	6,24	-0,05
Zmiana w 11. rotacji	2017/2013	-1,22	-6,33	6,21	-
Miedź przyswajalna [mg·kg ⁻¹ gleby]					
Po IV. roku 10. rotacji	2013	3,92	3,11	3,23	-
Ziemniak	2014/2013	-0,14	-0,09	-0,04	-0,09
Jęczmień jary	2015/2014	0,42	0,45	0,48	0,45
Rzepak ozimy	2016/2015	-0,06	0,04	0,11	0,03
Pszemica ozima	2017/2016	-0,07	0,66	0,34	0,31
Zmiana w 11. rotacji	2017/2013	0,15	1,04	0,89	-
Cynk przyswajalny [mg·kg ⁻¹ gleby]					
Po IV. roku 10. rotacji	2013	5,88	4,43	4,93	-
Ziemniak	2014/2013	-0,54	-0,33	-0,40	-0,42
Jęczmień jary	2015/2014	-1,02	-0,26	-0,30	-0,53
Rzepak ozimy	2016/2015	0,95	0,33	0,60	0,63
Pszemica ozima	2017/2016	-0,76	-0,41	-0,30	-0,49
Zmiana w 11. rotacji	2017/2013	-1,37	-0,67	-0,4	-
Żelazo przyswajalne [mg·kg ⁻¹ gleby]					
Po IV. roku 10. rotacji	2013	791,1	531,6	542,2	-
Ziemniak	2014/2013	-7,30	-33,80	-13,30	-18,00
Jęczmień jary	2015/2014	-262,70	0,00	81,70	-60,33
Rzepak ozimy	2016/2015	55,30	85,00	174,50	104,93
Pszemica ozima	2017/2016	14,90	54,00	-181,20	-37,43
Zmiana w 11. rotacji	2017/2013	-199,80	105,20	61,70	0,00

Powiązanie poszczególnych gatunków roślin ze składem mineralnym gleby po ich zbiorze jest trudne, gdyż maskuje go indywidualne nawożenie. Można jednak zauważyć, że po uprawie ziemniaka odnotowano wzrost zawartości azotu (który zapewne wykorzystał następujący po nim jęczmień jary). Natomiast wystąpienie w glebie spod ziemniaka stosunkowo dużego ubytku potasu i fosforu wynika z wysokich potrzeb pokarmowych gatunku względem tych składników pokarmowych. Drugi z gatunków stanowiących element poprawiający stanowisko w rotacji, rzepak ozimy, uprawiany po jęczmieniu jarym, przyczynił się do zwiększenia zawartości w glebie N_{og} , przyswajalnych form fosforu oraz miedzi, cynku i żelaza, natomiast nie dotyczyło to już potasu. Korzystniejszy wpływ uprawy rzepaku na skład mineralny gleby notowano zwłaszcza na obiekcie, gdzie aplikowano obornik w 1. roku rotacji.

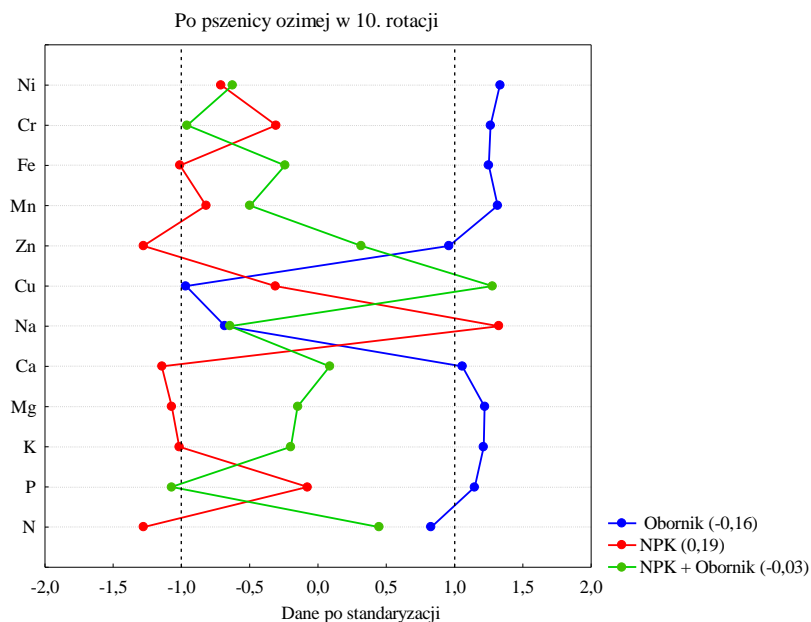
Jak już podano w rozdziale Materiał i metody badań, uzyskane wyniki składu mineralnego gleby podsumowano w oparciu o podstawy analizy intraprofilowej, polegającej na porównaniu przebiegu profilów wielocechowych zestawianych w trzy linie odpowiadające zespołom wartości wszystkich cech stwierdzonych na obiektach z różnym sposobem nawożenia ziemniaka w 1. roku rotacji (obornik, NPK, obornik+NPK). W celu wzajemnej porównywalności wartości cech poddano standaryzacji. Dla zobrazowania położenia poszczególnych profili obliczono ich średnie wartości. Rezultaty tego opracowania przedstawiono graficznie na rysunkach 14-19 (liniami przerywanymi oznaczono przedział \pm jedno odchylenie standardowe każdej z cech).

Korzystne oddziaływanie nawożenia obornikiem na jakość gleby, o czym wspomniano wyżej, potwierdza przebieg profilu wielocechowego składu mineralnego warstwy ornej po ostatnim roku 10. rotacji zmianowania (pszenica ozima). Profil ten sytuował się najczęściej w prawej dodatniej części układu (rys. 14). Jedyne w przypadku miedzi i sodu przekroczył średnią układu sytuując się w lewej, ujemnej części. Natomiast profil obiektu nawożonego mineralnie przekraczał średnią układu wyłącznie w odniesieniu do sodu.

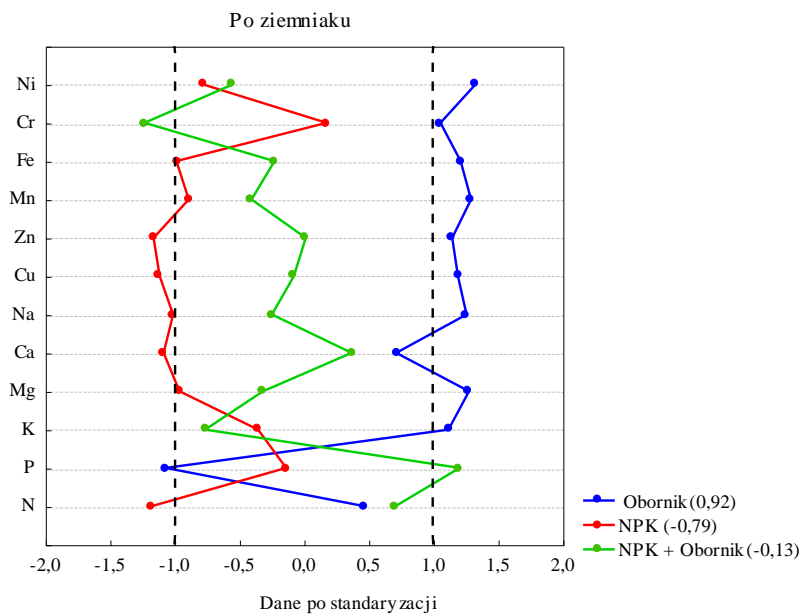
W pierwszym roku 11. rotacji zmianowania odnotowano, podobnie jak po ostatnim roku poprzedniej rotacji, dodatnie oddziaływanie aplikacji obornika na właściwości gleby. Przebieg profilu wielocechowego składu mineralnego gleby był najczęściej umiejscowiony w jego prawej, dodatniej części. Wyjątkiem był fosfor, który przyjął ujemną wartość. W przypadku uzupełnienia aplikacji obornika nawozami mineralnymi (NPK) w dawce, odnotowano przekroczenie dodatniej, prawej części układu jedynie w stosunku do trzech składników mineralnych, tj. azotu, fosforu i wapnia (rys. 15). Natomiast zastosowanie wyłącznie nawozów mineralnych w uprawie ziemniaka wskazuje na ogół na ujemne ich oddziaływanie na skład mineralny gleby. W przedstawionym graficznie profilu wyjątkiem był jedynie chrom.

Przebieg profilu wielocechowego składu mineralnego warstwy ornej gleby po jęczmieniu jarym, na obiekcie nawożonym obornikiem, potwierdza jego korzystne działanie sytuując się najczęściej w prawej dodatniej części (rys. 16).

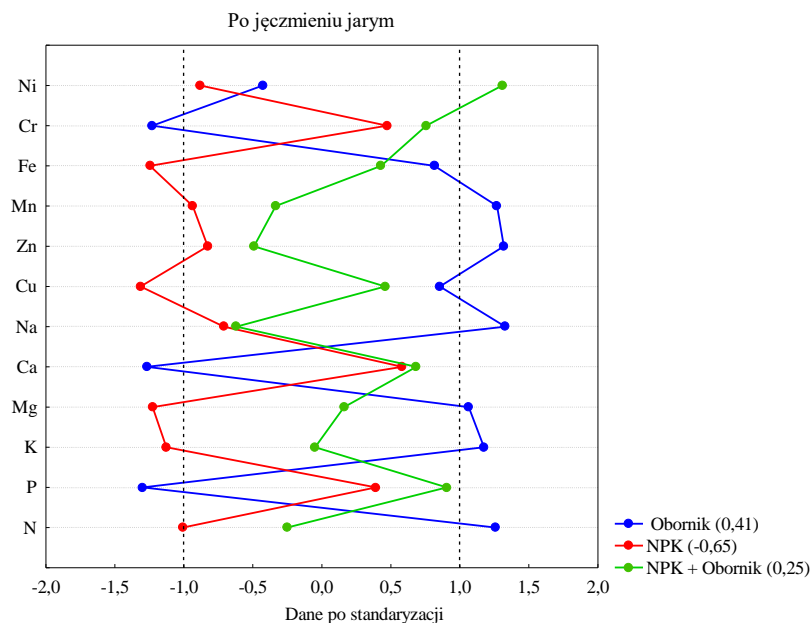
Jedynie w przypadku P, Ca, Cr i Ni przybiera on wartość ujemną. Natomiast profil obiektu NPK przekracza średnią układu jedynie w przypadku P, Ca i Cr.



Rys. 14 Profile wieloechowe składu mineralnego warstwy ornej gleby po pszenicy ozimej w 10. rotacji zmianowania



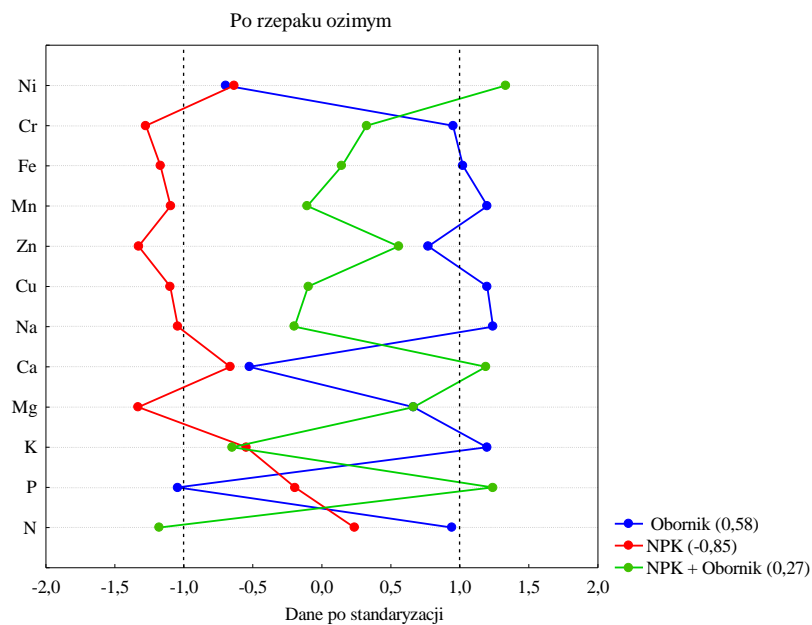
Rys. 15 Profile wieloechowe składu mineralnego gleby po ziemniaku uprawianym w 2014 roku (11. rotacja zmianowania)



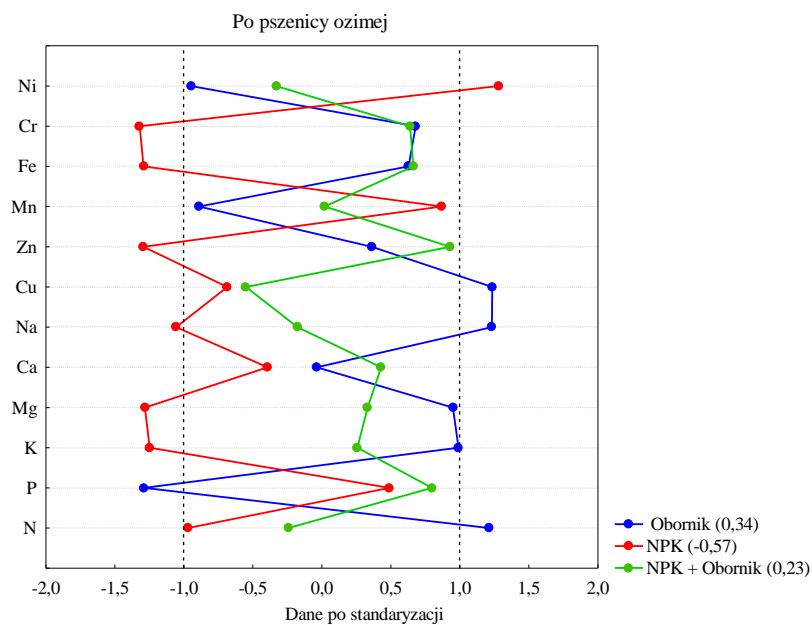
Rys. 16 Profile wieloechowe składu mineralnego gleby po jęczmieniu jarym w 2015 roku (11. rotacja zmianowania)

Korzystne oddziaływanie nawożenia na obiekcie, gdzie aplikowano obornik, potwierdza przebieg profilu wieloechowego składu mineralnego gleby po rzepaku ozimym, sytuując się najczęściej w prawej dodatniej części układu (rys. 17). Natomiast profil obiektu NPK + O w większości sytuuje się najczęściej w dodatniej części układu. Najmniej korzystnym okazało się nawożenie wyłącznie mineralne, co potwierdza przebieg profilu wieloechowego składu mineralnego dla tego obiektu sytuując się najczęściej w lewej, ujemnej jego części (rys. 17).

Profil wieloechowy składu mineralnego warstwy ornej gleby po pszenicy ozimej wskazuje, że najbardziej korzystnym sposobem nawożenia okazało się stosowanie obornika. Sytuuje się on najczęściej w prawej, dodatniej części układu (poza P, Mn i Ni) (rys. 18). Nawożenie mineralno-organiczne także było korzystne. Natomiast przebieg profilu obiektu nawożonego mineralnie przekraczał średnią układu jedynie w przypadku fosforu, manganu i niklu.



Rys. 17 Profile wieloechowe składu mineralnego warstwy ornej gleby po rzepaku ozimym w 2016 roku (11. rotacja zmianowania)



Rys. 18 Profile wieloechowe składu mineralnego warstwy ornej gleby po pszenicy ozimej w 2017 roku (11. rotacja zmianowania)

5.2. PLON GŁÓWNY ROŚLIN UPRAWIANYCH W ZMIANOWANIU I ICH SKŁAD MINERALNY

5.2.1. Plon roślin

W przeprowadzonych badaniach udowodniono, że poziom plonowania bulw ziemniaka w 11. rotacji był istotnie największy po łącznym nawożeniu obornikiem i nawozami mineralnymi (tab. 19), a na pozostałych testowanych obiektach stwierdzono niższe wartości tej cechy o 9,0% (NPK) i 46,4% (obornik). Wszelaczyńska i in. [2014] prowadząc wieloletnie doświadczenie nawozowe aplikując obornik lub łącznie obornik i nawozy mineralne na plantacji ziemniaka stwierdzili, że średnio istotnie najwyższy plon główny ($34,6 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$) odnotowano po nawożeniu kompleksowym (obornik+NPK) i był on wyższy o ponad 25% w stosunku do plonu zebranego z pola nawożonego tylko nawozami mineralnymi. Korzystniejszy wpływ na plon bulw ziemniaka (wyższy o około 10%) łącznego nawożenia obornikiem i NPK w stosunku do aplikacji samego NPK potwierdzają doświadczenia przeprowadzone przez innych autorów [Blecharczyk i Małicka 2000, Mercik i Stępień 2006]. Zastosowanie w wieloletnich doświadczeniach nawozowych w Stacji Badawczej Brody aplikacji obornika z NPK, zwiększyło istotnie plon bulw ziemniaka w porównaniu do efektu plonotwórczego tej rośliny odnotowanego na obiektach, gdzie aplikowano obornik lub wyłącznie nawozy mineralne [Blecharczyk i in., 2008]. Na tych dwóch ostatnich poletkach spadek plonowania wynosił odpowiednio: 14,6 i 22,8%. Z kolei Stępień i in. [2018] w wyniku wieloletniego stosowania nawozów mineralnych lub obornika stwierdzili, że największym plonem bulw charakteryzowały się obiekty nawożone naturalno-mineralnie. Potwierdza to, że na obiektach nawożonych obornikiem niedobór głównego składnika plonotwórczego, jakim jest azot, w największym stopniu prowadzi do spadku efektu plonotwórczego.

Tabela 19. Wielkość plonu uprawianych roślin w 11. rotacji zmianowania [$\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$]

Rotacja/ Lata	Gatunek uprawianej rośliny	Stosowane nawożenie		
		Obornik	NPK	Obornik + NPK
11/2014	ziemniak	11,14 c	18,91 b	20,77 a
11/2015	jęczmień	2,01 c	2,64 b	3,13 a
11/2016	rzepak	1,17 c	1,51 b	2,05 a
11/2017	pszenica	2,99 c	3,76 b	4,03 a

Z literatury wynika, że nawożenie naturalne poprawia właściwości fizykochemiczne gleby, co w efekcie determinuje większy poziom plonowania

roślin [Jankowska-Huflejt, 2006, Mercik i Stępień, 2006, Bleharczyk i in., 2008, Serpil, 2012, Triberti i in., 2016, Johnston i Poulton, 2018, Jaśkiewicz i Jasińska, 2019]. Potwierdzają to także wyniki badań własnych.

W pozostałych latach 11. rotacji zmianowania, w stosunku do plonu ziarna jęczmienia i pszenicy oraz nasion rzepaku, tendencje były takie same jak w przypadku plonu ziemniaka (tab. 19). Obornik wyrzucony na pole łącznie z wysiewem nawozów mineralnych, determinował najwyższe wartości omawianej cechy. Z kolei stosowanie samego obornika skutkowało uzyskaniem najmniejszego plonu wszystkich gatunków roślin uprawianych w tej rotacji.

Plon jęczmienia jarego oraz pszenicy ozimej na poletkach nawożonych naturalno-mineralnie był większy od stwierdzonego na poletkach, gdzie aplikowano obornik lub nawozy mineralne o odpowiednio o: 35,8 i 15,6% oraz 34,8 i 7,2%. W przypadku rzepaku ozimego także stwierdzono taką zależność (wzrost o: 55,7 i 18,6%). Praca Stępnia i in. [2018] potwierdza, że łączna aplikacja obornika i nawozów mineralnych skutkuje największym wzrostem plonowania jęczmienia jarego i pszenicy ozimej w stosunku do obiektów nawożonych wyłącznie mineralnie lub wyłącznie obornikiem. Badania nad wpływem zróżnicowanego nawożenia na poziom plonowania uprawianych roślin stanowił przedmiot badań Suwary i in. [2018]. Autorzy stwierdzili, że stosowanie nawożenia naturalno-mineralnego determinowało wzrost plonowania uprawianych roślin w porównaniu z obiektami, gdzie opisywane nawozy nie zostały zastosowane łącznie. Nawożenie naturalno-mineralne prowadzi do uzyskania większych plonów pszenicy ozimej i jęczmienia jarego w porównaniu z obiektami, gdzie nawozy te nie były razem aplikowane. Jaskulska i Urbanowski [2018] stwierdzili, że stosowanie nawozów mineralnych z obornikiem prowadzi do wzrostu zawartości pierwiastków w glebie. Jest to spowodowane tym, że obornik łagodzi zakwaszające działanie nawozów mineralnych [Stępień i in., 2018], co skutkuje większą przyswajalnością makroelementów, w tym głównego składnika pokarmowego dla roślin, jakim jest azot. To z kolei przekłada się na wyższe plonowanie.

Należy również zwrócić uwagę, że takie same tendencje dotyczące wpływu zastosowanego nawożenia na efekt plonotwórczy badanych roślin stwierdzono w 6. rotacji zmianowania (tab. 43 - aneks). Poziom plonowania bulw ziemniaka w tej rotacji był istotnie największy po łącznym nawożeniu obornikiem i nawozami mineralnymi, a na pozostałych testowanych obiektach zauważono spadek wartości tej cechy o 18,2% (po aplikacji NPK) i 46,7% (po zastosowaniu obornika) w porównaniu do obiektu, gdzie zastosowano obornik+NPK. Z kolei efekt plonotwórczy testowanych zbóż na poletkach nawożonych naturalno-mineralnie był większy od stwierdzonego na poletkach, gdzie aplikowano obornik lub nawozy mineralne odpowiednio o: 41,9 i 18,9% oraz 22,4 i 9,4%. Natomiast w przypadku rzepaku ozimego również stwierdzono taką zależność (wzrost o: 75,2 i 35,8%).

5.2.2. Skład mineralny plonu głównego

5.2.2.1. Zawartość makroelementów

Zawartość azotu ogólnego

W przeprowadzonych badaniach własnych stwierdzono, że zawartość N-ogólnego w plonie głównym uprawianych roślin w 11. rotacji zmianowania była istotnie determinowana rodzajem zastosowanego nawożenia (tab. 20). Okazało się, że największe wartości badanej cechy w bulwach ziemniaka i ziarnie jęczmienia jarego uzyskano po łącznej aplikacji obornika i NPK, natomiast w nasionach rzepaku i ziarnie pszenicy ozimej po zastosowaniu nawozów mineralnych. W przypadku dwóch pierwszych roślin w 11. rotacji zmianowania, ilość azotu w plonie głównym uzyskanym po łącznym zastosowaniu obornika+NPK była najwyższa i to wyższa w porównaniu do wartości tej cechy odnotowanej po aplikacji nawożenia mineralnego oraz obornika, odpowiednio o: 7,1 i 16,2% (ziemniak) oraz 10,6 i 27,4% (jęczmień). Z kolei zawartość azotu w nasionach rzepaku i ziarnie pszenicy ozimej osiągnęły maksymalną ilość po wysianiu na poletkach NPK i były wyższe w stosunku do obiektów, gdzie łącznie zastosowano obornik+NPK oraz sam nawóz naturalny, odpowiednio o: 6,6 i 21,1% oraz 4,8 i 23,1%.

Tabela 20. Zawartość azotu ogólnego w plonie głównym badanych roślin [$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ s.m.]

Rotacja/ Lata	Gatunek uprawianej rośliny	Stosowane nawożenie		
		Obornik	NPK	Obornik + NPK
11/2014	ziemniak	15,06 c	16,71 b	17,98 a
11/2015	jęczmień	15,37 c	18,92 b	21,16 a
11/2016	rzepak	29,03 c	36,80 a	35,04 b
11/2017	pszenica	12,67 c	16,48 a	15,40 b

Wszelaczyńska i in. [2014] prowadząc wieloletnie doświadczenie nawozowe stwierdzili, że łączne nawożenie obornikiem i NPK skutkowało istotnie największą zawartością azotu w bulwach ziemniaka, która mieściła się w przedziale od 14,1 do 18,72 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$. Z kolei samo nawożenie mineralne powodowało uzyskanie wartości w zakresie od 13,6 do 17,28 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$. Podobną tendencję w swoich badaniach określili Bleharczyk i in. [2008]. Powyższe zależności potwierdzają również wyniki uzyskane w badaniach własnych (tab. 20). Według Trawczyńskiego i Prokopa [2017] aplikacja nawozów mineralnych wywiera istotny wpływ na poziom azotu ogólnego w bulwach ziemniaka. Nadmiar tego składnika pokarmowego skutkuje obniżeniem ilości suchej masy, witaminy C i skrobi w bulwach ziemniaka. Autorzy podają

również, że ziemniaki szybko ciemnieją, dochodzi także do wzrostu poziomu strat magazynowych. Odmienne wyniki niż uzyskane w doświadczeniu własnym, odnotował Urbanowski [1999]. Udowodnił on w swoich wieloletnich doświadczeniach nawozowych, stosując nawożenie obornikiem ($30 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$) lub/i, NPK, że ilość azotu w ziarnie jęczmienia była najwyższa po łącznej aplikacji. Przy czym wartość uzyskana na tym obiekcie była wyższa w stosunku do wartości tej cechy odnotowanej w ziarnie zebranych z poletek, gdzie stosowano jedynie NPK lub obornik, odpowiednio o: 3,8% oraz 13,6%.

Odmienne wyniki w stosunku do ziarna jęczmienia jarego, niż uzyskane w doświadczeniu własnym, odnotował Urbanowski [1999]. Nawożenie mineralne powodowało uzyskanie większej zawartości azotu w ziarnie omawianego zboża ($22,3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) w porównaniu do obiektów, gdzie aplikowano obornik (o 9,0%) lub obornik i NPK (o 3,6%). Badania nad wpływem rodzaju nawożenia na poziom azotu ogólnego w jęczmieniu jarym prowadzili Zbroszczyk i Nowak [2009], którzy stwierdzili, że różnicuje ono istotnie poziom omawianego składnika w ziarnie jęczmienia jarego. Wzrost dawki azotu z 40 do $80 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ skutkowało zwiększeniem zawartości azotu ogólnego w ziarnie jęczmienia o 0,6%, w porównaniu z obiektami nawożonymi niższą dawką tego składnika.

Jankowski i Budzyński [2000] wskazują, że wielkość poziomu nawożenia azotem wywiera istotny wpływ na ilość tego składnika w nasionach rzepaku. W badaniach tych autorów udowodniono, że wzrost dawki ze 120 do $160 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$ skutkowało zwiększeniem jego zawartości w nasionach o 0,2%, prowadząc jednocześnie do zmniejszenia średniej ilości tłuszczu o 0,1%. Jest to zgodne z wynikami uzyskanymi w doświadczeniu własnym, w którym aplikacja nawozów mineralnych w największym stopniu korzystnie determinowała największe wartości badanej cechy.

Według Makarewicz i in. [2012] oraz Dicka i in. [2016] nawożenie mineralne determinuje istotnie zawartość azotu ogólnego w plonie głównym pszenicy ozimej. Według tych pierwszych autorów największym poziomem omawianego składnika w ziarnie tego zboża charakteryzowały się obiekty, gdzie aplikowano 10% roztwór mocznika ($14,95 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$). Natomiast najmniejszą ilość azotu ogólnego stwierdzono w plonie głównym zebranych na obiekcie nawożonym wyłącznie doglebowo, a całkowita dawka azotu w przeliczeniu na 1 ha wynosiła 70 kg (40% ogólnej dawki zastosowano przed ruszeniem wegetacji w formie 26% saletrzaku). W 6. rotacji zmianowania wszystkie uprawiane rośliny cechowały się największą zawartością N-ogólnego w plonie głównym po łącznej aplikacji obornika i nawozów mineralnych, a w dalszej kolejności po wysianiu nawozów mineralnych i samego obornika (tab. 44 - aneks). Porównując powyższe wyniki w stosunku do odnotowanych w 11. rotacji zmianowania można stwierdzić, że podobne tendencje zauważono dla bulw ziemniaka i ziarna jęczmienia. Z kolei największą ilość tego składnika mineralnego w nasionach rzepaku ozimego i ziarnie pszenicy ozimej uzyskano po aplikacji nawozów mineralnych.

Zawartość fosforu ogólnego

W 11. rotacji zmianowania najwyższą zawartość P-ogólnego stwierdzono w bulwach zebranych z poletek, gdzie aplikowano obornik oraz łącznie obornik i NPK, a w dalszej kolejności wyłącznie nawozy mineralne (tab. 21). Stosowanie nawożenia obornikiem w dawce $30 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ oraz łącznie obornika i NPK powodowało zwiększenie zawartości fosforu ogólnego w bulwach ziemniaka w porównaniu do plonu głównego zebranego po aplikacji wyłącznie NPK [Blecharczyk i in., 2008]. Według Wierzbickiej i Trawczyńskiego [2011] poziom fosforu ogólnego w bulwach ziemniaka jest istotnie determinowany zastosowanym sposobem nawożenia i systemem uprawy. Największym poziomem omawianego składnika charakteryzowały się bulwy pochodzące z obiektów nawożonych naturalno-mineralnie. Ilość P ogólnego w bulwach z tych obiektów była dwukrotnie wyższa niż w bulwach ziemniaka uprawianego ekologicznie.

W przypadku jęczmienia jarego uprawianego w drugim roku 11. rotacji największą zawartość P ogólnego w ziarnie odnotowano na obiektach, gdzie aplikowano obornik i była ona wyższa od stwierdzonej w jęczmieniu pochodzącym z poletek nawożonych mineralnie i naturalno-mineralnie, odpowiednio o 28,2% i 28,8%. Zbroszczyk i Nowak [2009] wskazują, że zastosowane nawożenie N w dawkach 40, 80 i $120 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ nie wywierało istotnego statystycznie wpływu na ilość fosforu ogólnego w ziarnie tego zboża i była ona mało zróżnicowana. Zwraca również uwagę fakt, że w latach o większym plonowaniu zawartość fosforu była wyższa.

Tabela 21. Zawartość fosforu ogólnego w plonie głównym [$\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ s.m.]

Rotacja/ Lata	Gatunek uprawianej rośliny	Stosowane nawożenie		
		Obornik	NPK	Obornik + NPK
11/2014	ziemniak	2,26 a	2,21 a	2,22 a
11/2015	jęczmień	4,82 a	3,46 b	3,43 b
11/2016	rzepak	5,76 a	4,47 b	4,27 c
11/2017	pszenica	5,42 a	3,95 b	2,91 c

Takie same tendencje jak w ziarnie jęczmienia jarego, zauważono również w nasionach rzepaku ozimego i ziarnie pszenicy ozimej uprawianych w 11. rotacji zmianowania. Największym poziomem P ogólnego charakteryzowały się nasiona rzepaku ozimego oraz ziarno pszenicy ozimej pochodzące ze zbioru z poletek nawożonych obornikiem, odpowiednio: $5,76 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ oraz $5,42 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (tab. 21). W przypadku nasion rzepaku ozimego ilość omawianego składnika była większa od stwierdzonego plonie głównym pochodzącym z poletek nawożonych mineralnie i naturalno-mineralnie odpowiednio o: 22,4% i 25,9%. Badania nad wpływem nawożenia, m.in. obornikiem i nawozami mineralnymi,

na poziom fosforu ogólnego w nasionach rzepaku prowadzili Wiater i Łukowski [2003]. Stwierdzili, że nie wywierało ono istotnego wpływu na zawartość omawianego składnika w nasionach tej rośliny. Doświadczenia nad wpływem aplikacji nawożenia mineralnego i organicznego na skład mineralny nasion rzepaku prowadzili także Rabikowska i Piszcz [2004]. Autorzy stwierdzili, że ilość fosforu ogólnego w nasionach rzepaku nie była determinowana zastosowanym nawożeniem obornikiem w czteroletnim zmianowaniu.

Jak podają Klikocka i in. [2015], nawożenie mineralne wywiera istotny wpływ na poziom fosforu ogólnego w ziarnie zbóż. Największą jego zawartość w plonie autorzy odnotowali na obiekcie nawożonym NPK w połączeniu z dodatkiem siarki w dawce $40 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ w postaci siarczanu amonu. W przeprowadzonych badaniach własnych stwierdzono, że ilość tego makroskładnika w ziarnie pszenicy ozimej, zebranej w kończącej 11. rotację zmianowania, była istotnie determinowana rodzajem zastosowanego nawożenia (tab. 21). Przy czym najkorzystniej zadziałała aplikacja obornika, a ilość fosforu w ziarnie uzyskana na tych obiektach była wyższa w stosunku do obiektów z nawożeniem NPK oraz łącznym obornikiem+NPK, odpowiednio o: 37,2% oraz 86,3%. W 6. rotacji trzy uprawiane rośliny w zmianowaniu (jęczmień, rzepak i pszenica) cechowały się największą zawartością P-ogólnego w plonie głównym po łącznej aplikacji obornika i nawozów mineralnych, a jedynie ziemniaki zareagowały najkorzystniej na wysianie nawozów NPK (tab. 44 - aneks). Porównując powyższe wyniki w stosunku do odnotowanych w 11. rotacji można stwierdzić, że tendencje dla poszczególnych roślin w stosunku do wpływu rodzaju zastosowanego nawozu były zdecydowanie odmienne.

Zauważono również, że zawartość P-ogólnego w plonie głównym była ujemnie skorelowana z plonem uprawianych roślin oraz ilością azotu ogólnego i potasu ogólnego (tab. 22) po aplikacji każdego badanego w doświadczeniu rodzaju nawożenia. Z kolei dodatnie zależności odnotowano między P-ogólnym a zawartością w plonie głównym testowanych roślin Na, Zn, Mn, Cr i Ni.

Tabela 22. Macierz współczynników korelacji elementów składu mineralnego plonów roślin na obiektach nawożonych obornikiem, nawozami mineralnymi (NPK) i łącznie obornikiem+NPK. Średnio dla gatunków roślin. W tabeli podano wartości $r_{obl.} > r_{tabl., p=0,05} = 0,576$

Cecha	plon	N	P	K	Mg	Ca	Na	Cu	Zn	Mn	Fe	Cr
po aplikacji obornika												
N	n.i.*											
P	-0,97	-0,59										
K	0,86	n.i.	-0,86									
Mg	n.i.	-0,87	n.i.	n.i.								
Ca	n.i.	-0,97	n.i.	n.i.	0,92							
Na	-0,98	n.i.	0,94	-0,90	n.i.	n.i.						
Cu	n.i.	n.i.	n.i.	n.i.	-0,85	-0,74	n.i.					
Zn	-0,99	-0,59	0,96	-0,79	n.i.	0,58	0,96	n.i.				
Mn	-0,68	-0,92	0,80	n.i.	0,62	0,83	0,60	n.i.	0,73			
Fe	n.i.	-0,83	n.i.	n.i.	0,98	0,92	n.i.	-0,93	n.i.	n.i.		
Cr	n.i.	n.i.	0,66	-0,82	n.i.	n.i.	0,59	0,77	n.i.	n.i.	n.i.	
Ni	-0,60	-0,89	0,58	n.i.	0,84	0,96	n.i.	-0,77	0,70	0,75	0,90	n.i.

cd. tabeli 22

po aplikacji nawozów mineralnych (NPK)												
N	n.i.											
P	-0,92	-0,63										
K	0,84	n.i.	-0,66									
Mg	n.i.	-0,97	n.i.	n.i.								
Ca	n.i.	-0,98	0,68	n.i.	0,96							
Na	-0,82	-0,62	0,78	n.i.	0,59	0,74						
Cu	n.i.	0,90	n.i.	n.i.	-0,97	-0,93	-0,67					
Zn	-0,92	n.i.	0,95	-0,83	n.i.	n.i.	0,61	n.i.				
Mn	-0,75	-0,69	0,94	n.i.	n.i.	0,68	n.i.	n.i.	0,91			
Fe	n.i.	-0,76	n.i.	n.i.	0,89	0,81	0,59	-0,96	n.i.	n.i.		
Cr	-0,74	-0,78	0,94	n.i.	0,60	0,77	0,63	n.i.	0,86	0,99	n.i.	
Ni	n.i.	-0,92	0,59	n.i.	0,95	0,97	0,80	-0,97	n.i.	n.i.	0,90	0,63
po łącznej aplikacji obornika i nawozów mineralnych (NPK)												
N	n.i.											
P	-0,92	-0,63										
K	0,84	n.i.	-0,66									
Mg	n.i.	-0,97	n.i.	n.i.								
Ca	n.i.	-0,98	0,68	n.i.	0,96							
Na	-0,82	-0,62	0,78	n.i.	0,59	0,74						
Cu	n.i.	0,90	n.i.	n.i.	-0,97	-0,93	-0,67					
Zn	-0,92	n.i.	0,95	-0,83	n.i.	n.i.	0,61	n.i.				
Mn	-0,75	-0,69	0,94	n.i.	n.i.	0,68	n.i.	n.i.	0,91			
Fe	n.i.	-0,76	n.i.	n.i.	0,89	0,81	0,59	-0,96	n.i.	n.i.		
Cr	-0,74	-0,78	0,94	n.i.	0,60	0,77	0,63	n.i.	0,86	0,99	n.i.	
Ni	n.i.	-0,92	0,59	n.i.	0,95	0,97	0,80	-0,97	n.i.	n.i.	0,90	0,63

* n.i. – nie istotne

Zawartość potasu ogólnego

W badaniach własnych stwierdzono, że zawartość potasu w plonie głównym roślin uprawianych w zmianowaniu w 11. była istotnie determinowana wpływem rodzaju zastosowanego nawożenia (tab. 23). Zależność ta dotyczyła również 6. rotacji zmianowania (tab. 44 - aneks).

Tabela 23. Zawartość potasu ogólnego w plonie głównym [g·kg⁻¹]

Rotacja/ Lata	Gatunek uprawianej rośliny	Stosowane nawożenie		
		Obornik	NPK	Obornik + NPK
11/2014	ziemniak	16,60 a	16,35 a	16,28 a
11/2015	jęczmień	4,42 a	4,35 b	4,05 c
11/2016	rzepak	8,83 a	8,29 b	8,39 b
11/2017	pszenica	3,12 a	3,05 b	3,02 b

W bulwach ziemniaka, zaczynającego 11. rotację zmianowania, największą koncentrację potasu odnotowano po aplikacji obornika i był on większy

od stwierdzonego w bulwach zebranych z poletek, na których aplikowano nawozy mineralne lub łącznie obornik+NPK. Nawożenie naturalne (obornik) oraz naturalne łącznie z NPK w badaniach Bleharczyka i in. [2008], zwiększyły ilość potasu w bulwach ziemniaka w porównaniu do zebranych z poletek doświadczalnych, gdzie nawożono wyłącznie NPK. Korzystny wpływ nawożenia naturalnego w porównaniu do mineralnego na zawartość makropierwiastków potwierdzono w badaniach innych autorów [Płaza, 2004, Sądej i in., 2004, Nyiraneza i Snapp, 2007]. Spowodowane to jest lepszym zaopatrzeniem uprawianych roślin w składniki pokarmowe z obornika i ich stopniowym udostępnianiem w czasie wegetacji. Z kolei Gąsior [1997] informuje, że ilość potasu w bulwach ziemniaka była istotnie determinowana nawożeniem mineralnym. Wraz ze zwiększaniem dawek nawożenia azotem z 50 do 150 kg·ha⁻¹, średnia zawartość omawianego składnika w bulwach uległa zmniejszeniu z poziomu 31,5 do 28,8 g·kg⁻¹. Natomiast dalsze zwiększanie nawożenia do dawki 200 kg N·ha⁻¹ skutkowało wzrostem poziomu potasu w bulwach do 31,1 g·kg⁻¹. Należy również zwrócić uwagę, że wraz ze starzeniem się roślin ilość potasu w plonie głównym zmniejszała się.

Z kolei w przypadku jęczmienia jarego największym poziomem omawianej cechy jakościowej w 11. rotacji zmianowania charakteryzowało się ziarno zebrane z poletek doświadczalnych nawożonych obornikiem (tab. 23). Zawartość ta była większa w stosunku do stwierdzonego w ziarnie zebranych z obiektu nawożonego mineralnie oraz naturalno-mineralnie, odpowiednio o: 1,6 i 9,1%.

Podobną tendencję jak w przypadku jęczmienia jarego, stwierdzono w ziarnie rzepaku ozimego uprawianego w trzecim roku 11. rotacji. Największą koncentrację potasu w nasionach rzepaku odnotowano w plonie głównym pochodzącym z obiektu nawożonego obornikiem i był on wyższy od stwierdzonego w nasionach, gdzie aplikowano nawozy mineralne oraz naturalno-mineralne, odpowiednio o: 6,5 oraz 5,2%. Z badań przeprowadzonych przez Barczak i in. [2017] wynika, że zawartość potasu w nasionach rzepaku była istotnie determinowana rodzajem nawożenia. Autorzy stwierdzili, że wzrost dawek nawozów azotowych prowadził do spadku ilości tego składnika mineralnego w plonie głównym omawianej rośliny.

Odnotowano również, że w ostatnim roku 11. rotacji zmianowania aplikacja obornika istotnie determinowała uzyskanie największej zawartości potasu w ziarnie pszenicy ozimej (tab. 23). Przy czym w porównaniu z obiektem nawożonym NPK i łącznie obornikiem+NPK była ona wyższa, odpowiednio o: 2,3 i 3,3%. Natomiast w 6. rotacji zmianowania największy poziom tego składnika w ziarnie omawianej rośliny zauważono na obiekcie, gdzie zastosowano NPK – 3,92 g·kg⁻¹. Aplikacja obornika skutkowała uzyskaniem niższej o 4,3%, w porównaniu do podanej powyżej wartości, ilości potasu w ziarnie pszenicy ozimej. Badania nad wpływem stosowanego nawożenia azotem na poziom makroelementów badali również Brzozowski i in. [2005]. Autorzy stwierdzili, że zastosowane nawożenie nie wywierało istotnego

wpływu na poziom potasu ogólnego w ziarnie pszenicy ozimej. Odmienne wyniki wykazali Dziamba i Jackowska [2001], którzy zauważyli, że wzrost poziomu aplikacji azotem prowadził do zwiększenia zawartości omawianego składnika w ziarnie pszenicy ozimej. Autorzy ci aplikując zróżnicowane dawki azotu, największą zawartość potasu ogólnego uzyskali w ziarniakach pszenicy pochodzących z obiektu, gdzie stosowano dawkę $150 \text{ kg N}\cdot\text{ha}^{-1}$, a najniższą z poletek nawożonych $50 \text{ kg N}\cdot\text{ha}^{-1}$. Odmienne wyniki uzyskali Brzozowski i Brzozowska [2016] informując, że wraz ze wzrostem dawek nawożenia tym ważnym składnikiem pokarmowym zmniejsza się koncentracja potasu w badanym przez nich ziarnie zboża.

Należy zwrócić również uwagę, że zawartości K w plonie głównym roślin uprawianych w 6. rotacji zmianowania były wyższe od stwierdzonych dla ziarna jęczmienia jarego, nasion rzepaku ozimego i ziarna pszenicy ozimej w 11. rotacji po zastosowaniu każdego z rodzajów nawożenia (tab. 44 - aneks).

Zawartość magnezu ogólnego

W przeprowadzonych badaniach własnych nawożenie obornikiem w 11. rotacji zmianowania, w największym stopniu przyczyniło się do wzrostu zawartości magnezu w bulwach ziemniaka (tab. 24). Ilość tego makroelementu była większa od odnotowanego w ziemniakach pochodzących z obiektu nawożonego NPK oraz łącznie obornikiem i NPK, odpowiednio o: 30,9 i 21,1%. Korzystny wpływ obornika na poziom magnezu w bulwach ziemniaka potwierdzają badania Wierzbickiej [2013], która podaje, że największym jego poziomem charakteryzowały się bulwy pochodzące z obiektu, gdzie aplikowano ten naturalny nawóz w dawce $25 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$. Bulwy ziemniaka zawierają ponad 1% związków mineralnych, o czym informują w swoich pracach Leszczyński [2000] oraz Rytel [2010]. W wieloletnich badaniach prezentowanych przez Wszelaczyńską i in. [2014] zawartość magnezu w bulwach wynosiła średnio $0,84 \text{ g kg}^{-1}$ s.m. Autorzy stwierdzili, że zastosowane nawożenie azotem istotnie wpłynęło na ilość tego składnika w bulwach ziemniaka, a największą średnią zawartość Mg odnotowano na obiektach, gdzie nawożono $60 \text{ kg N}\cdot\text{ha}^{-1}$. Wyższe dawki tego składnika stopniowo obniżały wartość omawianej cechy.

Tabela 24. Zawartość magnezu ogólnego w plonie głównym [$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ s.m.]

Rotacja/ Lata	Gatunek uprawianej rośliny	Stosowane nawożenie		
		Obornik	NPK	Obornik + NPK
11/2014	ziemniak	1,95 a	1,49 b	1,61b
11/2015	jęczmień	1,02 a	0,97 b	0,91 c
11/2016	rzepak	3,75 a	3,20 c	3,45 b
11/2017	pszenica	0,89 a	0,83 b	0,75 c

Podobne tendencje zaobserwowano również w przypadku zabiegów z użyciem obornika [Wszelaczyńska i in., 2014]. Według Ciećko i in. [2000] różne poziomy nawożenia mineralnego (NPK) nie modyfikowały istotnie zawartości Mg w bulwach ziemniaka, chociaż jego najwyższą ilość odnotowano po aplikacji dawki azotu $60 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$. Rudzińska-Mękal i Mikos-Bielak [2001] uzyskały odmienne wyniki. Zdaniem tych autorek zawartość magnezu w bulwach jest determinowana głównie długością okresu wegetacji roślin, stąd duże znaczenie ma wczesność odmiany. Badając pięć odmian ziemniaka, które nawożono obornikiem i $100 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$, stwierdzili najwyższą zawartość omawianego makroskładnika pokarmowego w odmianie Elba ($1,2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$), niższą w średnio późnych odmianach Irga i Grot ($1,2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$), a najniższą w odmianach wczesnych Drop i Perkoz (od $0,9$ do $1,0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$).

Taką samą tendencję, jak w przypadku zawartości Mg w bulwach ziemniaka, stwierdzono w nasionach rzepaku uprawianego w 11. rotacji zmianowania (tab. 23). Obornik w największym stopniu przyczynił się do istotnego wzrostu zawartości magnezu w nasionach rzepaku. Natomiast łączna aplikacja nawozów naturalnych i mineralnych skutkowałą uzyskaniem niższej o 10,8% tego składnika w nasionach testowanej rośliny oleistej. Z kolei aplikacja wyłącznie nawozów mineralnych w uprawie rzepaku ozimego doprowadziła, w stosunku do ilości odnotowanej w nasionach zebranych na obiekcie z obornikiem, do mniejszej zawartości wyżej wymienionego makropierwiastka o 4,9%. Z innych badań wynika, że nawożenie obornikiem wpływa na ilość Mg w nasionach rzepaku, a największą jego zawartość uzyskano w fazie pełnej dojrzałości [Cwojdzński i Nowak, 2002].

Najkorzystniejszą wartością omawianej cechy jakościowej charakteryzowało się ziarno jęczmienia jarego zebrane z obiektu nawożonego obornikiem – $1,02 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ s.m., a w dalszej kolejności z poletek, gdzie aplikowano nawozy mineralne – $0,97 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ s.m. (tab. 24). Najmniejszą zawartość Mg stwierdzono w ziarnie zebranych z obiektu po łącznym nawożeniu naturalno-mineralnym. Natomiast plon główny pszenicy cechował się istotnie najwyższą zawartością magnezu po zastosowaniu obornika – $0,89 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ s.m. i była ona wyższa od ilości tego składnika w ziarnie zebranych z poletek, gdzie aplikowano NPK oraz obornik łącznie z NPK, odpowiednio o: 7,2 oraz 18,7%. Wpływ zastosowanego nawożenia na zawartość magnezu w ziarnie zbóż stanowił przedmiot badań Wierzbickiej i Wierzbickiego [2017]. Autorzy podają, że dawka nawozów mineralnych nie wywierała istotnego wpływu na ilość magnezu w ziarnie testowanego zboża. Potwierdzają to badania przeprowadzone przez Stankowskiego i in. [2015], którzy stwierdzili, że aplikacja $120 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$ nie wywołała zmian w wartości tej cechy oznaczonej w ziarnie pszenżyta odmiany Nagano. Do takich samych wniosków doszli Wojtkowiak i in. [2014]. Zauważyli, że zwiększenie dawek azotu prowadzi jedynie do wzrostu jego poziomu w ziarnie pszenżyta, nie zwiększając jednak ilości magnezu w plonie głównym. Zdaniem Wilczewskiego i in. [2013] zwiększenie dawek nawożenia azotem do 120 i 160

kg·ha⁻¹ prowadziło do istotnego wzrostu poziomu magnezu w ziarnie pszenicy jarej w porównaniu do obiektów, gdzie stosowano nawożenie tym składnikiem w mniejszych ilościach. Według Dziamby i Jackowskiej [2001], stosowanie nawożenia mineralnego wywiera istotny wpływ na zawartość magnezu w ziarnie pszenicy. Jak podają autorzy, wraz ze wzrostem dawki N zwiększeniu ulega zawartość magnezu w głównym plonie pszenicy. Nie potwierdzają tego wyniki badań własnych, w których największą wartość omawianej cechy odnotowano na obiekcie nawożonym obornikiem (tab. 24). Odmiennie wyniki przedstawili Wyszkowski i in. [2001]. Stwierdzili, że aplikacja, zwłaszcza nawozów potasowych oraz azotowych, istotnie modyfikują zawartość Mg w ziarnie testowanego przez nich zboża.

Należy również podkreślić, że w 11. rotacji zmianowania zawartość magnezu była niższa od stwierdzonej w ziarniakach jęczmienia jarego i pszenicy ozimej w porównaniu do ilości odnotowanej dla tych zbóż w 6. rotacji zmianowania i to na wszystkich testowanych obiektach nawozowych (tab. 44 - aneks).

Zawartość wapnia ogólnego

W przeprowadzonych badaniach własnych odnotowano istotny wpływ rodzaju zastosowanego nawożenia na zawartość wapnia w plonie głównym roślin uprawianych w 11. rotacji zmianowania (tab. 25). Stwierdzono, że w pierwszym roku rotacji łączna aplikacja obornika i nawozów mineralnych w największym stopniu przyczyniła się do wzrostu zawartości wapnia w bulwach ziemniaka. Natomiast w wyniku zastosowania nawozów mineralnych lub obornika na poletkach doświadczalnych ilość ta, w stosunku do wyżej wymienionego obiektu, skutkowało uzyskaniem mniejszych wartości omawianej cechy, odpowiednio o: 11,4 oraz 18,2%. Jest to częściowo sprzeczne z danymi, o których informują w swojej pracy Blecharczyk i in. [2008]. W badaniach tych autorów aplikacja obornika w połączeniu z nawozami mineralnymi przyczyniła się w największym stopniu do zmniejszenia zawartości wapnia w bulwach ziemniaka. Z kolei po aplikacji obornika tendencje były takie same, jak w 1. roku opisywanego doświadczenia własnego.

Tabela 25. Zawartość wapnia ogólnego w plonie głównym [g·kg⁻¹ s.m.]

Rotacja/ Lata	Gatunek uprawianej rośliny	Stosowane nawożenie		
		Obornik	NPK	Obornik + NPK
11/2014	ziemniak	0,36 b	0,39 b	0,44 a
11/2015	jęczmień	0,52 b	0,53 b	0,57 a
11/2016	rzepak	3,90 c	4,13 b	4,47 a
11/2017	pszenica	0,36 a	0,24 b	0,38 a

Taki sam kierunek w stosunku do ilości Ca stwierdzono w ziarnie jęczmienia jarego uprawianego w drugim roku 11. rotacji. Największym poziomem wapnia charakteryzowało się ziarno pochodzące z obiektu nawożonego łącznie obornikiem i NPK. Aplikacja nawozów mineralnych doprowadziła do obniżenia poziomu omawianego składnika w plonie głównym tej rośliny o 7,0%. Nawożenie naturalne skutkowało spadkiem poziomu wapnia w ziarnie o 8,8%. Wpływ aplikacji nawożenia mineralnego lub mineralno-organicznego badali również Skwierawska i in. [2008]. Stwierdzili oni, że poziom wapnia w ziarnie jęczmienia jarego mieścił się w przedziale od 0,55 do 0,92 g·kg⁻¹ s.m. Stosowanie siarki w formie siarczanowej oraz elementarnej w dawce 120 g·kg⁻¹ doprowadziło do zwiększenia poziomu wapnia w ziarnie jęczmienia jarego w stosunku do obiektów, gdzie go nie stosowano.

Łączne stosowanie obornika i NPK w największym stopniu przyczyniło się do wzrostu poziomu wapnia w ziarnie rzepaku. Był on większy od stwierdzonego w nasionach pochodzących z poletek nawożonych naturalnie lub mineralnie odpowiednio o: 14,6 i 8,2%. Badania nad wpływem zastosowanego nawożenia na poziom wapnia w nasionach rzepaku prowadziła Gaj [2010], która stwierdziła, że zastosowane nawożenie wywierało istotny wpływ na poziom wapnia. Autorka podaje, że najmniejszym poziomem omawianego składnika charakteryzowały się nasiona pochodzące z obiektu kontrolnego - nienawożonego.

W przeprowadzonych badaniach odnotowano, że zawartość wapnia w ziarnie pszenicy ozimej uprawianej w 11. rotacji zmianowania była istotnie różnicowana rodzajem zastosowanego nawożenia uprawianych gatunków (tab. 25). W plonie głównym tego zboża, kończącego 11. rotację zmianowania, największy poziom wapnia stwierdzono w próbach pochodzących z obiektu nawożonego łącznie obornikiem i nawozami mineralnymi (NPK). Rezygnacja z obornika w uprawie skutkowała w największym stopniu spadkiem poziomu omawianego pierwiastka w ziarnie pszenicy i to aż o 36,8%. Z kolei zastosowanie samego obornika przyczyniło się do obniżenia poziomu wapnia w ziarnie pszenicy ozimej o 5,3%. Podobnej tendencji nie stwierdzono w ziarnie pszenicy ozimej kończącej 6. rotację zmianowania. Badania nad wpływem nawożenia na poziom wapnia w ziarnie pszenicy jarej prowadziła Wierzbowska [2006], która stwierdziła, że zarówno stosowanie nawozów azotowych jak i potasowych w niewielkim stopniu przyczyniło się do zmiany zawartości poziomu wapnia w ziarnie. Badania nad wpływem zastosowanego nawożenia na ilość wapnia w ziarnie pszenicy odmiany 'Kargo' prowadzili Knapowski i in. [2010]. Odnotowali, że wraz ze wzrostem poziomu dawek nawożenia azotem z 80 do 120 kg·kg⁻¹, wzrasta zawartość wapnia w ziarnie pszenicy o 5,8; 5,8 i 17,4%.

Podkreślić również należy, że w trzech pierwszych latach 11. rotacji zmianowania zawartość wapnia w plonie głównym uprawianych roślin była większa od odnotowanego w 6. rotacji, bez względu na zastosowane nawożenie (tab. 44 - aneks).

Zawartość sodu ogólnego

Stwierdzono, że aplikacja nawozów mineralnych w największym stopniu przyczyniła się do wzrostu zawartości sodu w bulwach ziemniaka w 11. rotacji (tab. 26). Na obiekcie nawożonym obornikiem oraz łącznie obornikiem i NPK, poziom wartości omawianego składnika był równy i jednocześnie o 21,4% niższy od stwierdzonego w bulwach z zebranych poletek, gdzie stosowano wyłącznie nawożenie mineralne ($0,14 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$).

Tabela 26. Zawartość sodu ogólnego w plonie głównym [$\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ s.m.]

Rotacja/ Lata	Gatunek uprawianej rośliny	Stosowane nawożenie		
		Obornik	NPK	Obornik + NPK
11/2014	ziemniak	0,11 b	0,14 a	0,11 b
11/2015	jęczmień	0,38 b	0,41 b	0,53 a
11/2016	rzepak	0,37 b	0,50 a	0,38 b
11/2017	pszenica	0,35 a	0,24 b	0,38 a

Z badań przeprowadzonych przez Kozereę i in. [2006] wynika, że poziom sodu w bulwach ziemniaka był dodatnio skorelowany z dawką zastosowanego nawożenia cynkiem. Na skutek aplikacji nawozu zawierającego Zn stwierdzono wzrost poziomu sodu o 19% w porównaniu obiektem kontrolnym (bez Zn). Badania nad wpływem nawożenia na poziom Na w plonie innej rośliny okopowej (buraka cukrowego) prowadziła Prośba-Białczyk [2003]. Odnotowała ona, że wraz ze zwiększaniem dawek nawożenia N zwiększeniu ulega poziom sodu w plonie głównym tej rośliny. Obok nawożenia, na ilość omawianego składnika zarówno w korzeniach, jak i liściach buraka cukrowego, wywierała wpływ także odmiana. Okazało się, że wraz ze wzrostem plonowania i poziomu cukru zwiększeniu uległa również zawartość sodu w korzeniach. Odmianą, która cechowała się najniższym poziomem omawianego składnika była Atair.

Stosowanie obornika w największym stopniu przyczyniło się do zmniejszenia poziomu sodu w ziarnie jęczmienia i to o 28,3% w porównaniu do ziarna pochodzącego z poletek nawożonych łącznie obornikiem i NPK, a aplikacja wyłącznie nawozów mineralnych skutkowała obniżeniem zawartości tego składnika w ziarnie omawianego zboża o 22,6%.

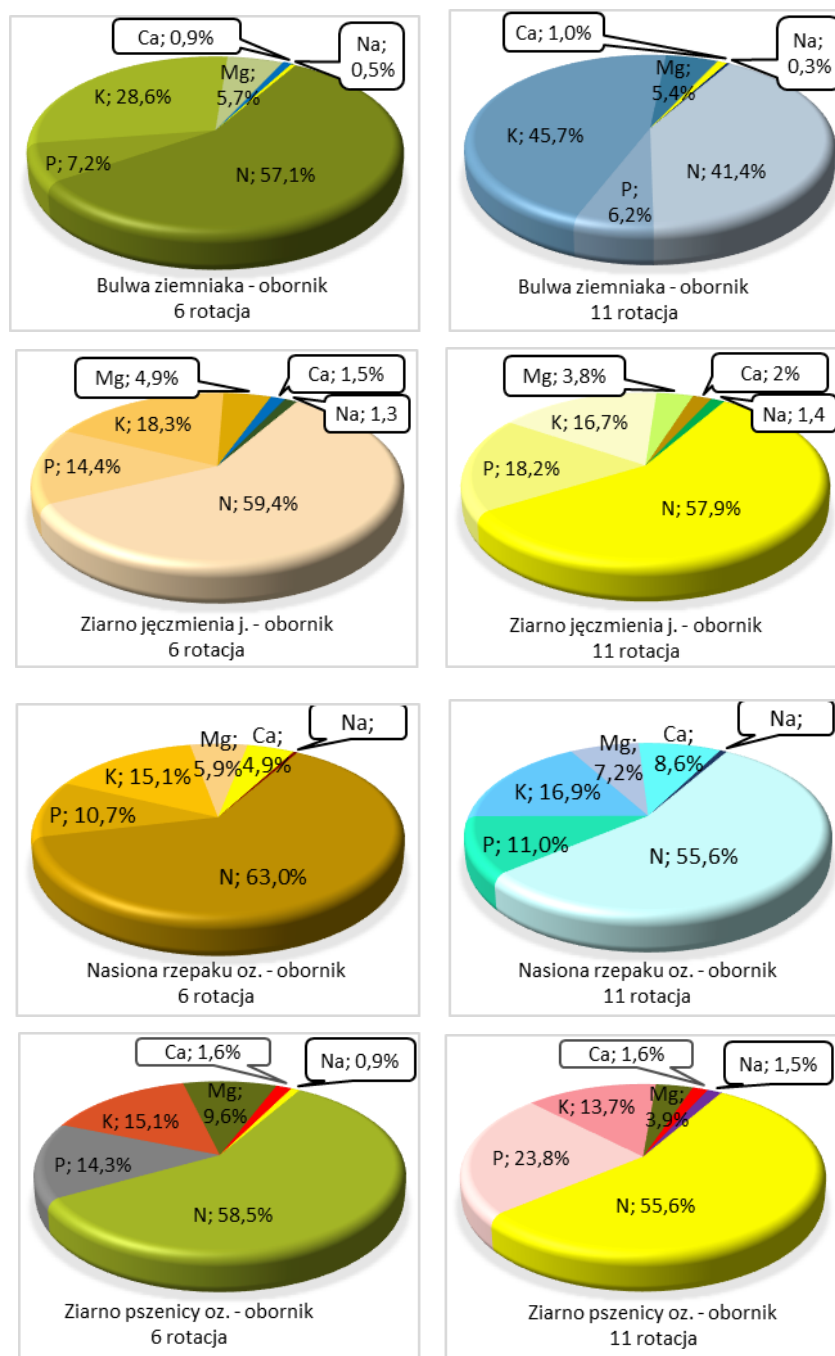
Podobną tendencję jak przy nawożeniu ziemniaka, stwierdzono w nasionach rzepaku uprawianego w trzecim roku 11. rotacji zmianowania. Największym poziomem omawianego składnika charakteryzowały się nasiona tej rośliny pochodzące z obiektu nawożonego mineralnie (tab. 26). Aplikacja obornika lub łącznie testowanego nawozu naturalnego i NPK skutkowałą spadkiem zawartości sodu w plonie głównym w zakresie od 24 do 26%.

Jak podają Wiśniowska-Kielian i Klima [2010], na skutek nawożenia mineralnego lub naturalnego, większą zawartość sodu odnotowano w ziarnie

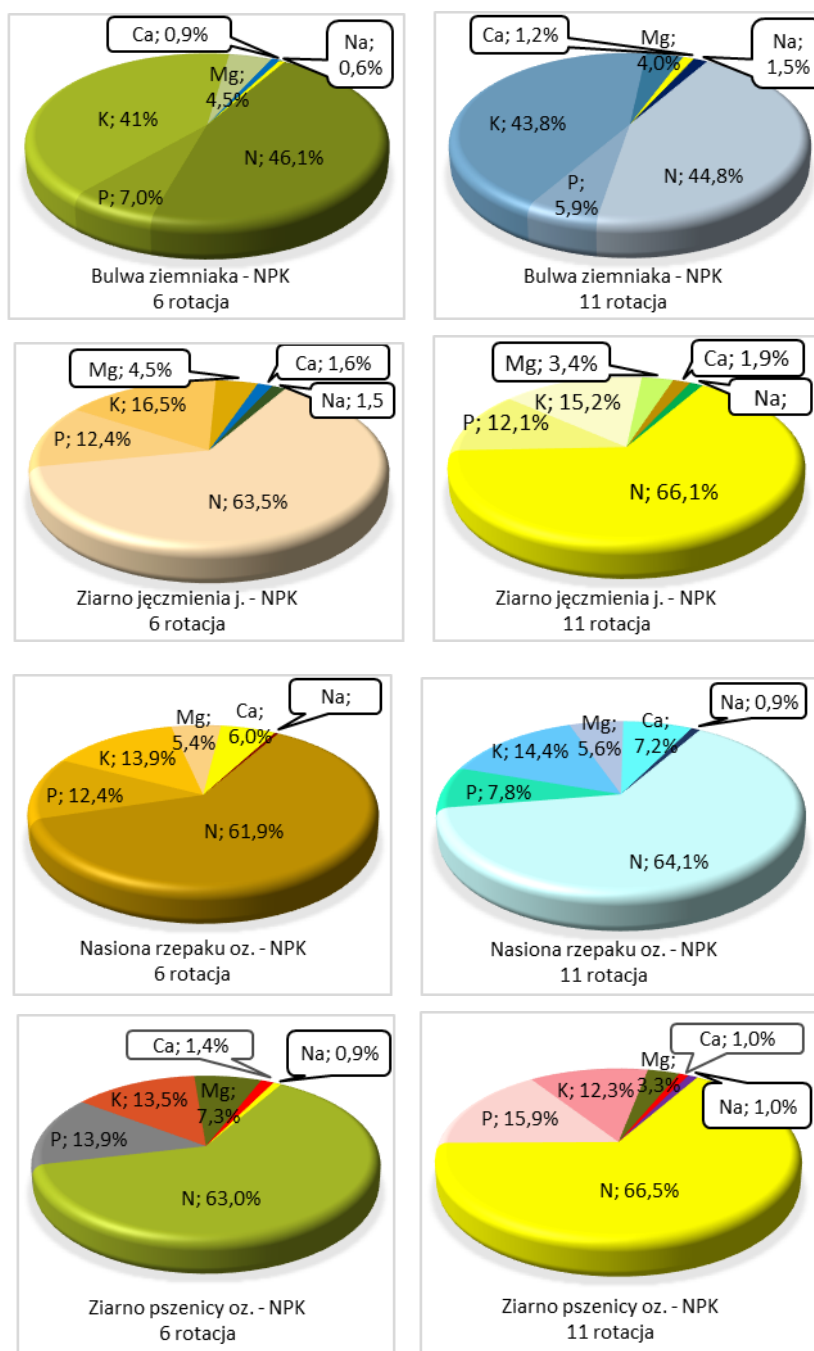
pszenicy pochodzącej z poletek nawożonych obornikiem ($183,3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$). Natomiast aplikacja nawozów mineralnych determinowała uzyskanie niższej wartości tej cechy jakościowej w plonie głównym badanej pszenicy i to niższej o 12,4%. W przeprowadzonych badaniach własnych stwierdzono, że zawartość sodu w ziarnie pszenicy ozimej, uprawianej w 11. rotacji zmianowania, była istotnie determinowana rodzajem zastosowanego nawożenia (tab. 26). Największą jego zawartością w 11. rotacji charakteryzował się plon główny zebrany z poletek, gdzie łącznie aplikowano obornik i nawozy mineralne. Wartość tej cechy jakościowej była większa od odnotowanej w ziarniakach tego zboża uzyskanego z poletek nawożonych wyłącznie mineralnie lub obornikiem, odpowiednio o 58,3 i 8,6%. Taką samą zależność stwierdzono w ziarnie omawianego gatunku w 6. rotacji zmianowania (tab. 45 - aneks). Badania nad wpływem sposobu nawożenia na poziom sodu w ziarnie pszenicy prowadzili również Kowieska i in. [2010]. Stwierdzili oni, że nawożenie mineralne w połączeniu z obornikiem w największym stopniu przyczyniło się do wzrostu poziomu sodu w ziarnie. Z kolei Jaśkiewicz i Jasińska [2019] wskazują, że na zawartość tego składnika w ziarnie pszenicy ozimego wpłynęła agrotechnika, zmianowanie i nawożenie. Największą jego zawartością charakteryzowało się ziarno zebrane z obiektu nawożonego organiczno-mineralnie i była ona wyższa o 1,9% niż na obiekcie z obornikiem.

Obliczono również udział analizowanych makroelementów w plonie głównym roślin testowanych w doświadczeniu, przyjmując sumę ich zawartości za 100%, w zależności od rodzaju aplikowanego nawożenia. Uzyskane wyniki przedstawiono graficznie (rys. 19-21). Okazało się, że po zastosowaniu obornika, udział poszczególnych makroskładników w puli badanych makroelementów w plonie głównym roślin uprawianych w 6. rotacji zmianowania, można uszeregować w następującej kolejności: $\text{N} > \text{K} > \text{P} > \text{Mg} > \text{Ca} > \text{Na}$ (rys. 19). Podobną tendencję odnotowano dla bulw ziemniaka i nasion rzepaku ozimego zebranych w 11. rotacji zmianowania. Przy czym w tej ostatniej roślinie Ca charakteryzował się większym udziałem w stosunku do Mg. Z kolei dla ziarna badanych zbóż (jęczmień jary, pszenica ozima) w szeregu makroelementów na drugim miejscu znajduje się fosfor a na 3. potas (tj. $\text{N} > \text{P} > \text{K} > \text{Mg} > \text{Ca} > \text{Na}$). Należy również zaznaczyć, że udział poszczególnych składników w roślinach uprawianych w 6. i 11. rotacji był odmienny i mieścił się w przedziałach odpowiednio dla: N: 57,1-63,0% i 41,4-57,9%; P: 7,2-14,4% i 6,2-23,8%; K: 15,1-28,6% i 13,7-45,7%; Mg: 4,9-9,6% i 3,8-7,2%; Ca: 0,9-4,9% i 1,0-8,6% oraz Na: 0,4-1,3% i 0,3-1,5%.

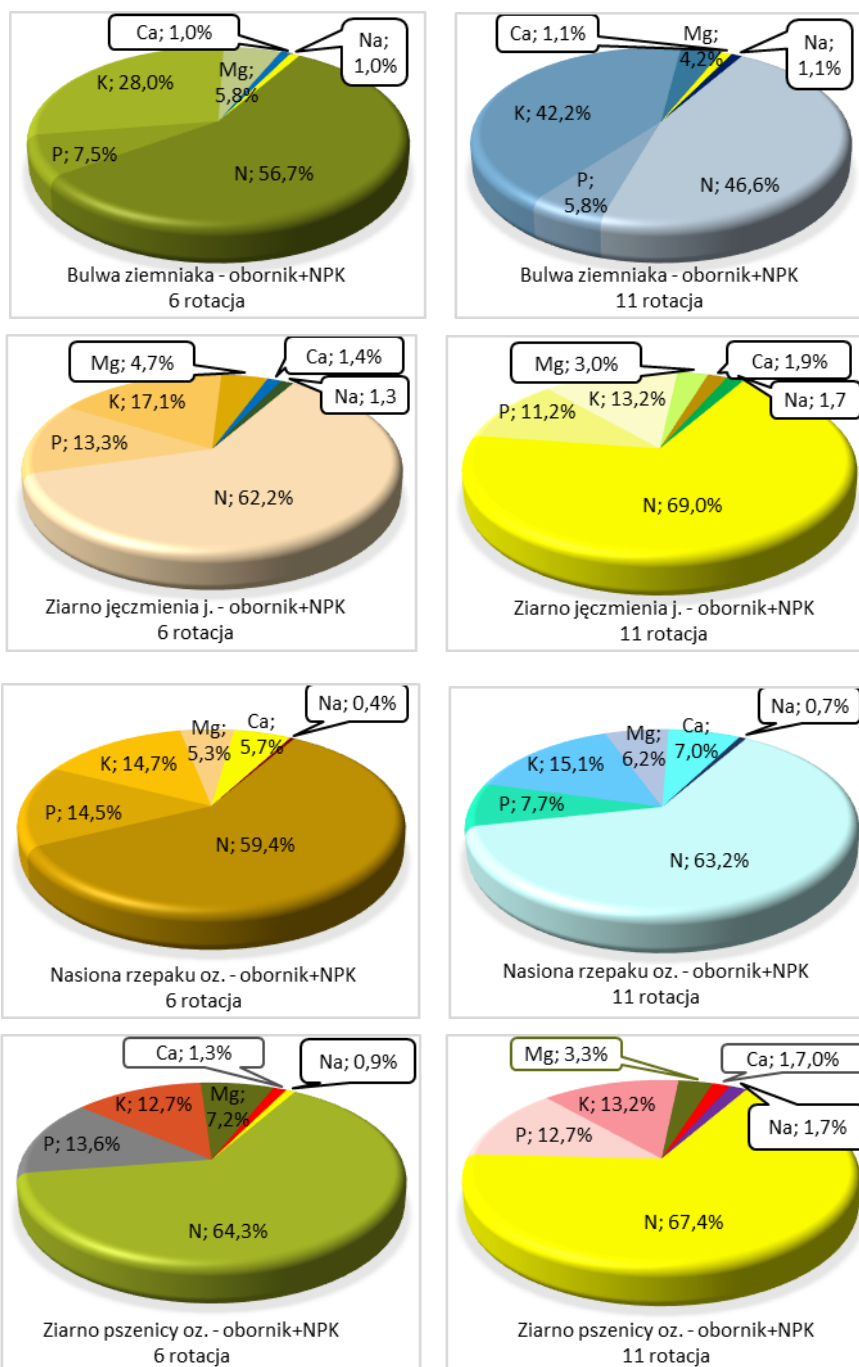
Po aplikacji nawozów mineralnych (NPK) w uprawie ziemniaka i jęczmienia jarego, udział poszczególnych makroskładników w puli badanych makroelementów w plonie głównym tych roślin w 6. i 11. rotacji zmianowania, można uszeregować w takiej samej, następującej kolejności: $\text{N} > \text{K} > \text{P} > \text{Mg} > \text{Ca} > \text{Na}$ (rys. 20). Dla ziarna pszenicy ozimej szereg makroelementów przedstawiał się podobnie, przy czym miejscami zamieniły się fosfor i potas ($\text{N} > \text{P} > \text{K} > \text{Mg} > \text{Ca} > \text{Na}$).



Rys. 19. Udział azotu, fosforu, potasu, magnezu, wapnia i sodu (%) w ilości oznaczonych makroelementów w plonie głównym badanych roślin w 6. i 11. rotacji zmianowania, po aplikacji obornika



Rys. 20. Udział azotu, fosforu, potasu, magnezu, wapnia i sodu (%) w ilości oznaczonych makroelementów w plonie głównym badanych roślin w 6. i 11. rotacji zmianowania po aplikacji nawozów mineralnych (NPK)



Rys. 21. Udział azotu, fosforu, potasu, magnezu, wapnia i sodu (%) w ilości oznaczonych makroelementów w plonie głównym badanych roślin w 6. i 11. rotacji zmianowania po łącznej aplikacji obornika i nawozów mineralnych

Z kolei dla rzepaku ozimego zauważono, podobnie jak po zastosowaniu pod tą rośliną obornika, wyższy udział Ca w stosunku do Mg (tj. N>K>P>Ca>Mg>Na). Łączna aplikacja obornika i NPK skutkowałą uzyskaniem omawianego szeregu, dla bulw ziemniaka i ziarna dwóch zbóż uprawianych w 6. i 11 rotacji zmianowania, w następującej kolejności: N>K>P>Mg>Ca>Na, (rys. 21). Podobną zależność stwierdzono dla nasion rzepaku, przy czym w szeregu makroelementów większy udział w stosunku do Mg miał Ca (tj. N>K>P>Ca>Mg>Na).

5.2.2.2. Zawartość mikroelementów

Zawartość miedzi ogólnej

W przeprowadzonych badaniach w 11. rotacji zmianowania stwierdzono, że istotnie największą zawartością miedzi charakteryzowały się bulwy ziemniaka pochodzące z obiektu nawożonego naturalno-mineralnie (5,34 mg·kg⁻¹) (tab. 27). Po aplikacji wyłącznie obornika lub nawozów mineralnych ilość tego mikroelementu w plonie głównym tej rośliny, w porównaniu do wyniku uzyskanego na w/w obiekcie, była niższa odpowiednio o: 4,9 i 8,1%.

Tabela 27. Zawartość miedzi ogólnej w plonie głównym [mg·kg⁻¹ s.m.]

Rotacja/ Lata	Gatunek uprawianej rośliny	Stosowane nawożenie		
		Obornik	NPK	Obornik + NPK
11/2014	ziemniak	5,08 b	4,91 b	5,34 a
11/2015	jęczmień	5,29 a	5,00 b	4,56 c
11/2016	rzepak	3,70 b	3,77 b	4,17 a
11/2017	pszenica	7,38 a	5,47 b	4,83 c

Wpływ stosowanego nawożenia na zawartość miedzi w bulwach ziemniaka stanowił przedmiot badań Sawickiej i in. [2022]. Autorzy stwierdzili, że na zawartość omawianego składnika w bulwach wpływa zarówno poziom zastosowanego nawożenia, jak i odmiana. Przy czym największą koncentracją miedzi charakteryzowały się bulwy zebrane z obiektu nawożonego naturalno-mineralnie, a odmianą, która kumulowała najwięcej omawianego składnika w bulwach okazała się odmiana White.

W ziarnie jęczmienia jarego uprawianego w drugim roku 11. rotacji największy poziom miedzi odnotowano w plonie zebrany z obiektu nawożonego obornikiem (tab. 27). Był on większy od stwierdzonego w plonie zebrany z obiektu nawożonego mineralnie i naturalno-mineralnie, odpowiednio o: 5,8% i 16,0%.

Łączna aplikacja nawozów mineralnych i obornika, podobnie

jak w przypadku bulw ziemniaka, w największym stopniu przyczyniła się do zwiększenia ilości miedzi ogólnej w plonie nasion rzepaku ozimego uprawianego w trzecim roku 11. rotacji zmianowania (tab. 27). Rezygnacja z nawozu mineralnego w zastosowanej dawce skutkowała uzyskaniem mniejszej o 11,3% ilości omawianego mikroskładnika w plonie głównym rzepaku ozimego w porównaniu z w/w obiektem. Z kolei nasiona omawianej rośliny, zebrane z obiektów po aplikacji NPK, cechowały się mniejszą koncentracją miedzi o 9,6%.

Jak podają Kulczycki i Grocholski [2004] zawartość miedzi w ziarnie pszenicy ozimej była istotnie różnicowana rodzajem zastosowanego nawożenia oraz uprawianą odmianą. Autorzy podają, że jej zawartość mieściła się w zakresie od 2,8 do 3,3 mg·kg⁻¹. W przeprowadzonych badaniach własnych stwierdzono, że ilość miedzi w ziarnie pszenicy ozimej była wyższa i istotnie determinowana rodzajem zastosowanego nawożenia roślin uprawianych w zmianowaniu. Największy wpływ miała aplikacja obornika (7,38 mg·kg⁻¹), a w dalszej kolejności zastosowanie w uprawie nawożenia mineralnego lub obornika, co skutkowało uzyskaniem mniejszej ilości w porównaniu do obiektu nawożonego nawozem naturalnym, odpowiednio o: 25,9 i 34,6% (tab. 26). Wpływ wieloletniego zróżnicowanego nawożenia mineralno-organicznego lub mineralnego na poziom miedzi w plonie głównym uprawianych roślin, stanowił przedmiot badań Rabikowskiej [2000]. Autorka stwierdziła, że zawartość tego mikroelementu w ziarnie zbóż była istotnie determinowana rodzajem zastosowanego nawożenia, a największy efekt (zawartość Cu - średnio 5 mg·kg⁻¹ s.m.) stwierdzono w plonie pochodzącym z obiektu nawożonego mineralnie. Natomiast coroczna aplikacja nawozu organicznego w ilości 25% dawki całkowitej, doprowadziła do zmniejszenia zawartości Cu w ziarnie, a łączna aplikacja obornika ze zwiększającymi się dawkami azotu nie różnicowała istotnie ilości miedzi w ziarnie. Badania nad wpływem ilości miedzi w glebie na jej zawartość w plonie pszenicy prowadzili Rosada i Przewocka [2016]. Stwierdzili, że poziom omawianego składnika w ryzosferze nie wywierał istotnego wpływu na ilość miedzi w ziarnie. Jak podają Kulczycki i Grocholska [2004], poziom miedzi w plonie wahał się w przedziale od 2,3 do 4,6 mg·kg⁻¹.

Zauważono również, że zależności pomiędzy zawartością miedzi w plonie głównym poszczególnych roślin uprawianych w zmianowaniu, a aplikowanym rodzajem nawozu, zarówno w 6. jak i 11. rotacji, były takie same. Poza tym ilość tego mikroelementu stwierdzona w plonach roślin zebranych w 6. rotacji była większa od odnotowanej w bulwach, ziarnie i nasionach uzyskanych w rotacji 11. (tab. 27, tab. 45 - aneks).

Zawartość miedzi w plonach badanych roślin, po aplikacji każdego rodzaju badanego w doświadczeniu nawozu, była ujemnie skorelowana z zawartością Mg, Ca, Fe i Ni w plonach głównych (tab. 22).

Zawartość cynku ogólnego

W badaniach własnych zawartość cynku w plonie głównym ziemniaka mieściła się w zakresie od 12,25 do 15,45 mg·kg⁻¹ (tab. 28). Według danych Instytutu Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa ilość tego mikroelementu nie powinna przekraczać 50-100 mg·kg⁻¹ s.m. Z badań Wierzbickiej [2013] wynika, że średni poziom cynku w bulwach ziemniaka wynosił 26 mg·kg⁻¹.

Jak podaje wyżej wymieniona autorka w wyniku wieloletniego nawożenia mineralnego lub aplikacji obornika większy poziom cynku stwierdzono w bulwach ziemniaka pochodzących z poletek nawożonych mineralnie. Natomiast na obiektach nawożonych obornikiem zawartość omawianego składnika była najmniejsza i nie przekraczała 12,35 mg·kg⁻¹ s.m. Odmienne wyniki uzyskano w przeprowadzonych badaniach własnych. Stwierdzono, że ilość cynku w bulwach ziemniaka była istotnie determinowana rodzajem zastosowanego nawożenia, ale największy wpływ na nią miała łączna aplikacja obornika i nawozów mineralnych (15,45 mg Zn·kg⁻¹). Po zastosowaniu obornika oraz nawozów mineralnych odnotowano mniejsze zawartości tego mikroelementu w stosunku do powyższego obiektu, odpowiednio o: 9,6 i 20,7%. Takiej zależności nie stwierdzono w 6. rotacji, w której największy wpływ na omawianą cechę miało nawożenie naturalne (tab. 46 - aneks).

Tabela 28. Zawartość cynku ogólnego w plonie głównym [mg·kg⁻¹ s.m.]

Rotacja/ Lata	Gatunek uprawianej rośliny	Stosowane nawożenie		
		Obornik	NPK	Obornik + NPK
11/2014	ziemniak	13,96 b	12,25 c	15,45 a
11/2015	jęczmień	24,30 b	24,60 b	30,16 a
11/2016	rzepak	26,51 b	29,48 a	29,10 a
11/2017	pszenica	22,79 c	31,36 b	34,61 a

W ziarnie jęczmienia jarego oraz pszenicy ozimej uprawianych w 11. rotacji zmianowania, podobnie jak w bulwach ziemniaka, największe ilości cynku (30,16 oraz 34,61 mg·kg⁻¹) stwierdzono w plonach z obiektów nawożonych naturalno-mineralnie (tab. 28). Były one większe od odnotowanych w ziarnie zebranych z obiektów, gdzie aplikowano NPK oraz obornik, odpowiednio o: 22,6 i 24,1% dla jęczmienia oraz 10,4 i 51,9% dla pszenicy. Natomiast w 6. rotacji największy poziom cynku odnotowano w plonach głównych tych zbóż zebranych z obiektów nawożonych obornikiem (tab. 45 – aneks). Jak podają Kulczycki i Grocholska [2004] poziom zawartości tego mikroelementu w ziarnie pszenicy ozimej był istotnie determinowany rodzajem zastosowanego nawożenia, a także odmianą tego zboża. Autorzy podają, że ilość cynku mieściła się w granicach od 20,80 do 29,04 mg·kg⁻¹,

przy czym najczęściej stwierdzono go w ziarnie pochodzącym z obiektu nawożonego dawką 272 kg NPK·ha⁻¹. Wpływ nawożenia i zastosowanego zmianowania na poziom cynku w ziarnie pszenicy ozimej stanowił przedmiot badań Nowaka [2000]. Autor ten stwierdził, że zarówno dawka azotu jak i gatunek rośliny przedplonowej istotnie determinowały wartość tego parametru. Największym poziomem cynku charakteryzowało się ziarno pszenicy ozimej pochodzące z obiektu nawożonego azotem w dawce 90 kg·ha⁻¹, po uprawie bobiku jako przedplonu. Według Gondek i Gondek [2010] największą ilość omawianego mikrośladnika w ziarnie tego zboża odnotowano na obiekcie po aplikacji NPK z dodatkiem siarki.

Odmienne wyniki niż dla bulw ziemniaka, ziarniaków jęczmienia i pszenicy odnotowano dla nasion rzepaku ozimego. Okazało się, że zastosowanie nawozów mineralnych przyczyniło się w największym stopniu do uzyskania najwyższej ilości cynku ogólnego w plonie w plonie głównym tej rośliny (29,48 mg·kg⁻¹) uprawianej w trzecim roku 11. rotacji zmianowania (tab. 28). Rezygnacja z nawozów mineralnych i aplikowanie jedynie obornika doprowadziło do spadku ilości omawianego śladnika w plonie głównym rzepaku ozimego o 9,8% w porównaniu z w/w obiektem. Natomiast łączne zastosowanie obornika i NPK skutkowało zmniejszeniem ilości tego mikroelementu o 1,28% w nasionach. Porównując wyniki uzyskane dla rzepaku w 11. i 6. rotacji zmianowania odnotowano odmienne zależności. W 6. rotacji największy wpływ na zawartość cynku w nasionach testowanej rośliny miało łączne zastosowanie obornika i nawozów mineralnych, a w dalszej kolejności aplikacja wyłącznie obornika i wyłącznie nawozów mineralnych (tab. 45 – aneks). Wpływ wieloletniego zróżnicowanego nawożenia obornikiem i nawozami mineralnymi na jakość nasion rzepaku stanowił także przedmiot badań Rabikowskiej i Piszcz [2004]. Autorki podają, że największy jego poziom zauważono w nasionach zebranych z obiektu nawożonego organiczno-mineralnie, a uzyskana zawartość była o 60% większa od stwierdzonej na obiekcie, gdzie nie nawożono obornikiem. Dodatkowo w pracy tej stwierdzono, że zawartość cynku była dodatnio skorelowana z poziomem nawożenia azotem. Podkreślić należy, że wzrost dawki azotu prowadzi do zwiększenia stosunku P:Zn.

Zawartość manganu ogólnego

W przeprowadzonych badaniach stwierdzono, że poziom manganu w bulwach ziemniaka był istotnie różnicowany rodzajem zastosowanego nawożenia roślin uprawianych w zmianowaniu (tab. 29). Największą jego zawartością charakteryzował się plon pochodzący z obiektu, gdzie aplikowano nawożenie naturalno-mineralne (9,42 mg·kg⁻¹). Zastosowanie obornika zdecydowało o niższej o 19,4% jego zawartości w stosunku do wyżej wymienionego obiektu, a wysiew jedynie NPK - o 11,1%. Taką samą zależność zaobserwowano w bulwach zebranych w 6. rotacji zmianowania (tab. 45 –

aneks). Podkreślić również należy, że zawartość Mn w plonie głównym tej rośliny w omawianej rotacji była większa od odnotowanej w 11. rotacji na wszystkich obiektach nawozowych (tab. 28).

Tabela 29. Zawartość manganu ogólnego w plonie głównym [$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ s.m.]

Rotacja/ Lata	Gatunek uprawianej rośliny	Stosowane nawożenie		
		Obornik	NPK	Obornik + NPK
11/2014	ziemniak	7,59 c	8,37 b	9,42 a
11/2015	jęczmień	10,49 c	16,54 b	19,66 a
11/2016	rzepak	28,08 b	39,08 a	38,97 a
11/2017	pszenica	19,59 c	34,36 b	48,97 a

Jak podaje Wierzbicka [2013] na skutek wieloletniego nawożenia mineralnego lub obornikiem największą zawartość manganu stwierdzono w bulwach ziemniaka pochodzących z obiektu nawożonego mineralnie. Z przeprowadzonych przez autorkę badań wynika również, że po aplikacji obornika odnotowano najmniejszą ilość tego mikroskładnika w plonie głównym omawianego gatunku. Badania nad wpływem nawożenia na zawartość manganu w bulwach ziemniaka prowadził Rogóż [2009], który stwierdził, że ilość omawianego mikroelementu była determinowana głównie odczynem gleby. Autor podaje, że zwiększenie wartości pH w glebie powyżej 5,5 prowadzi do zmniejszenia ilości omawianego pierwiastka w bulwach. W badaniach własnych najmniej manganu stwierdzono w bulwach nawożonych obornikiem, co potwierdza jego odkwaszające działanie, prowadząc tym samym do zmniejszenia ilości tego mikroelementu.

W ziarnie jęczmienia jarego uprawianego w 11. rotacji największy poziom manganu odnotowano w plonie zebrany z obiektu nawożonego naturalno-mineralnie (tab. 29). Był on większy od odnotowanego w plonie zebrany z poletka nawożonego mineralnie oraz z aplikacją obornika, odpowiednio o: 18,9 i 87,4%. Taką samą zależność stwierdzono w ziarnie omawianego gatunku w 6 rotacji zmianowania (tab. 46 – aneks), a na podkreślenie zasługuje fakt, że podobnie jak w bulwach ziemniaka również w ziarnie jęczmienia ilość manganu odnotowana w 6. rotacji była na wszystkich obiektach większa od stwierdzonej w rotacji 11. Wpływ wieloletniej aplikacji nawożenia mineralnego i naturalnego na poziom manganu w ziarnie jęczmienia jarego stanowił przedmiot badań Rabikowskiej [2000]. Przy czym stwierdziła ona, że największą zawartością manganu charakteryzowało się ziarno tego zboża zebrane z obiektu nawożonego mineralnie. Autorka podaje, że najniższym poziomem omawianego mikroelementu charakteryzowało się ziarno zebrane z obiektu nawożonego obornikiem. Prawdopodobnie było to związane z odczynem gleby na tym obiekcie. Taką samą zależność stwierdzono

w badaniach własnych.

Aplikacja nawozu naturalnego w największym stopniu przyczyniła się do uzyskania najmniejszej zawartości manganu ogólnego ($28,08 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) w plonie nasion rzepaku ozimego uprawianego w 11. rotacji zmianowania (tab. 29). Z kolei po łącznym zastosowaniu obornika i nawozów mineralnych stwierdzono istotnie najwyższy poziom omawianego składnika w plonie głównym omawianej rośliny. Różnica pomiędzy wymienionymi wyżej obiektami wynosiła 39,2%. Takie same zależności zauważono w nasionach rzepaku ozimego uprawianego w 6. rotacji zmianowania. Poza tym poziom manganu stwierdzony w głównym plonie rzepaku ozimego w 11. rotacji był niższy od odnotowanego w 6. rotacji (tab. 46 – aneks), bez względu na rodzaj zastosowanego nawozu. Oddziaływanie nawożenia mineralnego i naturalnego na ilość manganu w nasionach rzepaku prowadziła w swoich badaniach Gaj [2010]. Autorka podaje, że zastosowane nawożenie różnicowało istotnie jego ilość w plonie głównym omawianego gatunku oraz, że wraz ze zwiększaniem dawek potasu maleje zawartość manganu w nasionach rzepaku. Największą ilość omawianego składnika odnotowano w plonie głównym rzepaku z obiektu bez nawożenia potasowego, tj. $51,68 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.

Łączne nawożenie naturalno-mineralne pszenicy ozimej w 11. rotacji zmianowania skutkowało największą zawartością manganu w ziarnie tego zboża. Aplikowanie nawozów mineralnych lub zastosowanie obornika w uprawie, w stosunku do wyżej wymienionego obiektu, doprowadziło do uzyskania mniejszej ilości tego mikroelementu w plonie głównym zboża, odpowiednio o: 29,8 lub 60,0%. Zależności takie miały również miejsce w 1997 roku (6 rotacja, tab. 46 – aneks). Podkreślić należy, że zawartość manganu w ziarnie pszenicy ozimej kończącej 11. rotację zmianowania była niższa od odnotowanej w 6. rotacji bez względu na rodzaj zastosowanego nawożenia. Według Grocholskiego i Kulczyckiego [2004] zawartość Mn w plonie głównym omawianego zboża jest uzależniona od ilości manganu w glebie, badanej części rośliny, a także jej odmiany.

Zawartość żelaza ogólnego

W przeprowadzonych badaniach własnych stwierdzono, że poziom żelaza w testowanej roślinie był istotnie determinowany rodzajem zastosowanego nawożenia (tab. 30). Największą ilość tego mikroskładnika w 11. rotacji odnotowano w bulwach ziemniaka pochodzących z obiektu, gdzie aplikowano nawożenie naturalno-mineralne - $55,46 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. Zawartość żelaza w plonie bulw ziemniaka jest zależna od odmiany i wartości pH gleby, której zmniejszenie powoduje, że zawartość tego mikroelementu w roślinie wzrasta [Leszczyński, 2012]. Autor podaje, że poziom żelaza w bulwach ziemniaka waha się w przedziale od $0,13\text{--}17 \text{ mg}\cdot 100 \text{ g}^{-1}$.

Tabela 30. Zawartość żelaza ogólnego w plonie głównym [$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ s.m.]

Rotacja/ Lata	Gatunek uprawianej rośliny	Stosowane nawożenie		
		Obornik	NPK	Obornik + NPK
11/2014	ziemniak	46,17 c	50,34 b	55,46 a
11/2015	jęczmień	41,54 c	48,33 b	58,04 a
11/2016	rzepak	68,97 a	62,85 b	59,56 c
11/2017	pszenica	31,53 c	35,87 b	40,85 a

Zastosowanie obornika przyczyniło się do uzyskania najmniejszej zawartości żelaza w plonie głównym tej rośliny, tj. mniejszej o 16,8% w porównaniu z obiektem nawożonym łącznie obornikiem i NPK. Natomiast aplikacja nawozów mineralnych (NPK) skutkowała obniżeniem ilości omawianego mikroelementu o 9,2%. Taką samą zależność zaobserwowano w bulwach zebranych w 6. rotacji zmianowania (tab. 46 – aneks). Podkreślić należy, że zawartość żelaza w omawianej rotacji była większa od odnotowanej w 11. rotacji na wszystkich obiektach nawozowych (tab. 29). Wpływ wieloletniego nawożenia mineralnego lub naturalnego na poziom żelaza w plonie bulw stanowił przedmiot badań Blecharczyka i in. [2008]. Autorzy odnotowali, że nawożenie obornikiem, podobnie jak w przeprowadzonym eksperymencie, determinowało najmniejszą zawartość żelaza w plonie bulw ziemniaka.

Badania nad wpływem nawożenia na poziom żelaza w ziarnie jęczmienia jarego prowadził Błaziak [2007]. Stwierdził on, że zastosowanie $\text{CaO} + \text{MgO}$ w największym stopniu przyczyniło się do wzrostu poziomu żelaza w plonie głównym tej rośliny uprawnej. Natomiast w ziarnie tego zboża uprawianego w 11. rotacji zmianowania największy poziom żelaza odnotowano w plonie zebranym z obiektu nawożonego naturalno-mineralnie (tab. 30). Był on większy od ilości uzyskanej w plonie zebranym z obiektów nawożonych mineralnie (NPK) lub obornikiem, odpowiednio o: 20,1 i 39,7%. Taką samą zależność stwierdzono w ziarnie omawianego gatunku w 6 rotacji zmianowania (tab. 46 – aneks). Na podkreślenie zasługuje fakt, że podobnie jak w bulwach ziemniaka, również w ziarnie jęczmienia poziom żelaza odnotowany w 6. rotacji był na wszystkich obiektach większy od stwierdzonego w rotacji 11.

Stosowanie wyłącznie nawozu naturalnego spowodowało uzyskanie istotnie największej zawartości żelaza ($68,97 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) w plonie głównym rzepaku ozimego uprawianego w trzecim roku 11. rotacji zmianowania (tab. 30). Wartość tej cechy była wyższa w stosunku do ilości odnotowanych w nasionach zebranych z poletek nawożonych wyłącznie mineralnie oraz łącznie obornikiem i NPK, odpowiednio o: 9,7 oraz 15,8%. Taką samą zależność stwierdzono w nasionach rzepaku ozimego uprawianego w 6. rotacji zmianowania (tab. 45 – aneks). Poza tym ilość żelaza stwierdzona w głównym rośliny oleistej w 11. rotacji był niższy od odnotowanego w 6. rotacji,

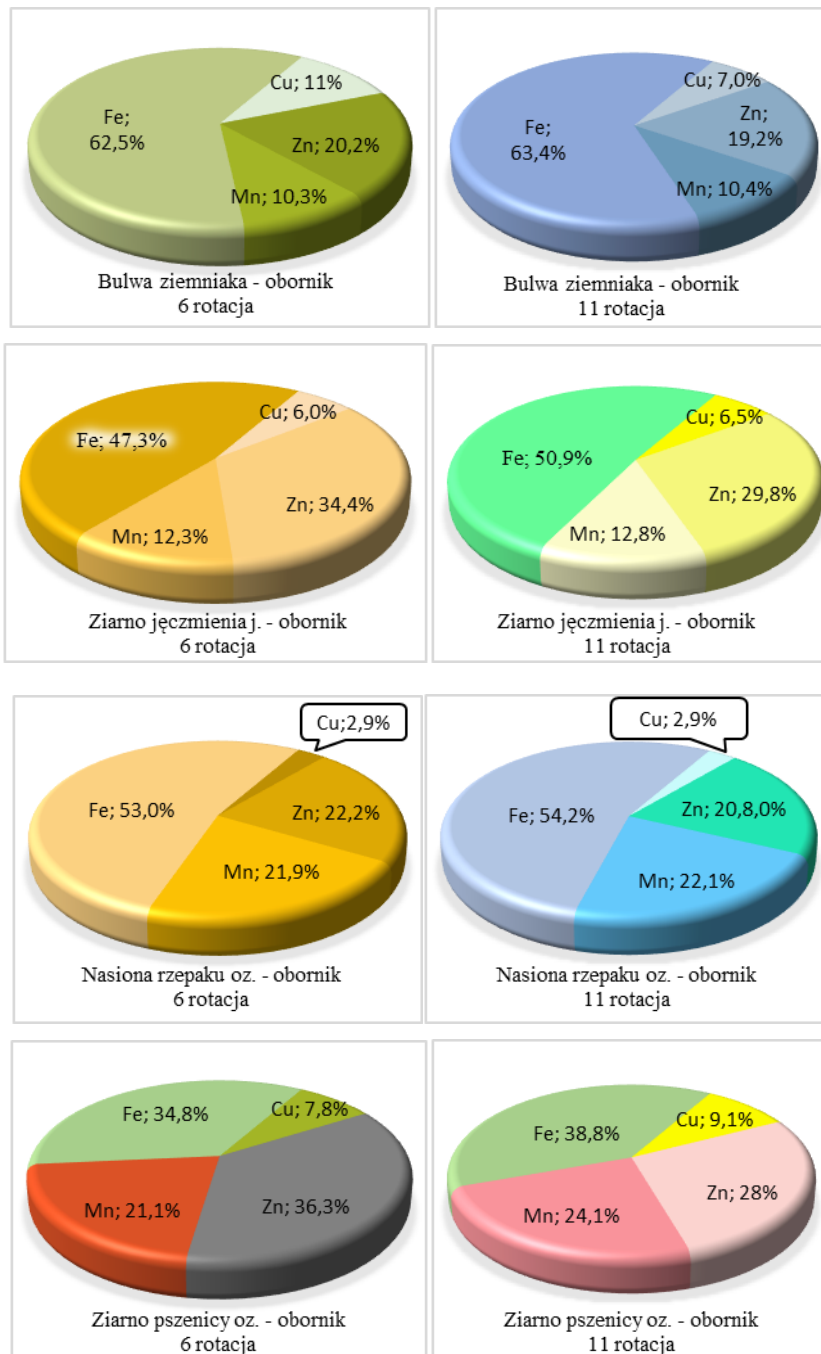
bez względu na rodzaj zastosowanego nawozu.

Takie same istotne zależności w stosunku do zawartości żelaza po zastosowaniu obornika, nawozów mineralnych oraz łącznie obornika i NPK, stwierdzono dla ziarna pszenicy ozimej. Plon główny tego zboża zebrany z obiektów nawożonych łącznie obornikiem i NPK charakteryzował się największą ilością omawianego mikroskładnika - $40,85 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (tab. 30). Był on wyższy w stosunku do pozostałych obiektów badawczych i to wyższy o: 13,9 (po nawożeniu NPK) oraz 29,6% (po aplikacji obornika).

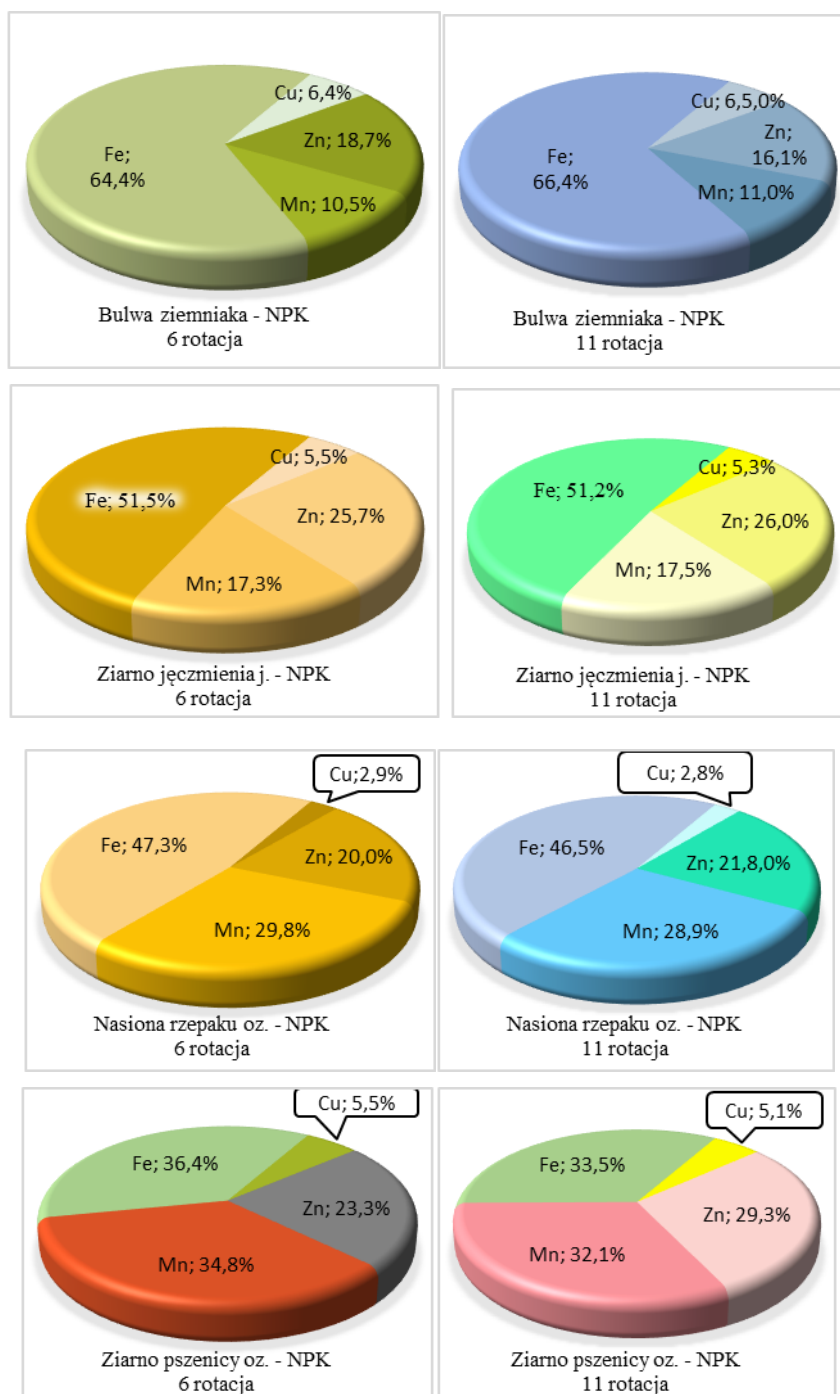
Obliczono również udział poszczególnych mikroelementów badanych w doświadczeniu, przyjmując sumę ich zawartości za 100%, w zależności od rodzaju zastosowanego nawożenia (rys. 22-24). Okazało się, że po aplikacji każdego z rodzajów nawożenia, udział poszczególnych mikroskładników w puli badanych mikroelementów w plonie głównym ziemniaka i ziarna jęczmienia jarego 11. rotacji zmianowania, można uszeregować w następującej kolejności: $\text{Fe} > \text{Zn} > \text{Mn} > \text{Cu}$. Dokładnie taka sama tendencja dla wymienionych wyżej roślin uprawnych była w 6. rotacji zmianowania.

W przypadku rzepaku ozimego w 11. rotacji zmianowania zastosowanie obornika, nawozów mineralnych oraz ich łącznie stosowanie spowodowało, że udział poszczególnych mikroskładników w puli badanych mikroelementów w plonie głównym tej rośliny przedstawiał się w kolejności: $\text{Fe} > \text{Mn} > \text{Zn} > \text{Cu}$ (rys. 22-24). Taką samą zależność odnotowano w 6. rotacji, przy czym szereg ten był odmienny jedynie w nasionach zebranych z obiektów, gdzie aplikowano obornik ($\text{Fe} > \text{Zn} > \text{Mn} > \text{Cu}$).

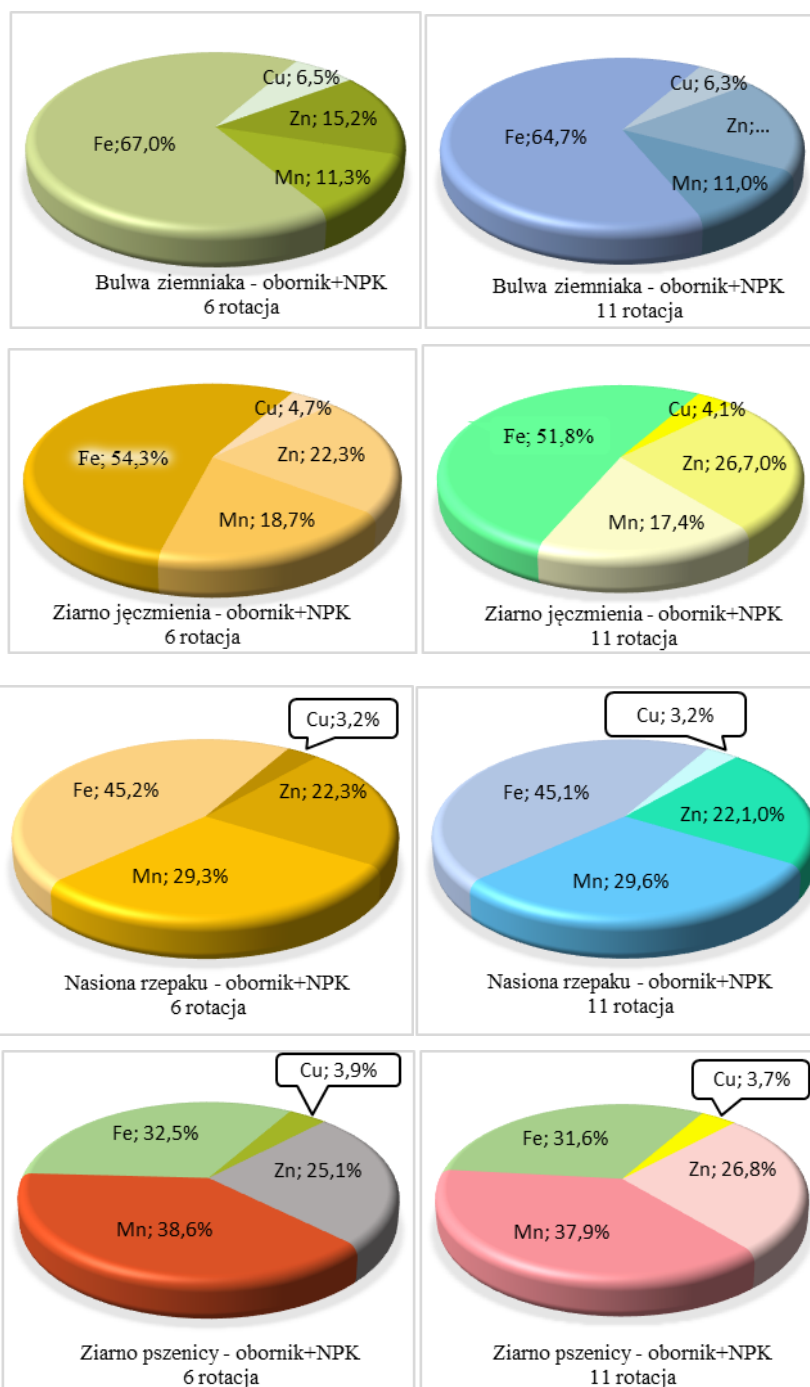
Natomiast w ziarnie pszenicy ozimej kolejność mikroskładników w szeregu, związana z ich udziałem w całej puli mikroelementów, była zróżnicowana i zależała od rodzaju zastosowanego w badaniach nawozu i dotyczyło to zarówno 6. jak i 11. rotacji zmianowania (rys. 22-24). Po oborniku szereg przedstawiał się następująco: $\text{Fe} > \text{Zn} > \text{Mn} > \text{Cu}$. Z kolei nawożenie mineralne w uprawie plantacji omawianego zboża spowodowało, że większy udział od cynku miał mangan. Łączne zastosowanie obornika i NPK wpłynęło na największy udział manganu w ziarnie pszenicy, a w dalszej kolejności żelaza cynku i miedzi.



Rys. 22. Udział miedzi, cynku, manganu i żelaza (%) w ilości oznaczonych mikroelementów w plonie głównym badanych roślin w 6. i 11. rotacji zmianowania po aplikacji obornika



Rys. 23. Udział miedzi, cynku, manganu i żelaza (%) w ilości oznaczonych mikroelementów w plonie głównym badanych roślin w 6. i 11. rotacji zmianowania po aplikacji nawozów mineralnych (NPK)



Rys. 24 Udział miedzi, cynku, manganu i żelaza (%) w ilości oznaczonych mikroelementów w plonie głównym badanych roślin w 6. i 11. rotacji zmianowania po aplikacji obornika i nawozów mineralnych (NPK)

5.2.2.3. Zawartość ołowiu, kadmu, chromu i niklu

Zawartość ołowiu ogólnego

W przeprowadzonych badaniach własnych stwierdzono, że ilość ołowiu w bulwach ziemniaka nie był istotnie determinowany rodzajem zastosowanego nawożenia roślin uprawianych w zmianowaniu. We wszystkich latach rotacji 11., bez względu na rodzaj zastosowanego nawożenia, zawartość ołowiu w plonie bulw nie przekraczała $1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (tab. 31). Taką samą tendencję stwierdzono w 6. rotacji. Należy zwrócić uwagę, że brak precyzyjnego wyniku związany był z zawartością składnika, która była poniżej progu detekcji aparatu do jego oznaczania.

Tabela 31. Zawartość ołowiu ogólnego w plonie głównym [$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ s.m.]

Rotacja/ Lata	Gatunek uprawianej rośliny	Stosowane nawożenie		
		Obornik	NPK	Obornik + NPK
11/2014	ziemniak	< 1,0	< 1,0	< 1,0
11/2015	jęczmień	< 1,0	< 1,0	< 1,0
11/2016	rzepak	< 1,0	< 1,0	< 1,0
11/2017	pszenica	< 1,0	< 1,0	< 1,0

Według Marksa [2009] poziom ołowiu w plonie bulw ziemniaka nie jest istotnie determinowany rodzajem nawożenia oraz odległością od źródeł emisji, takich jak szlaki komunikacyjne. Autor podaje, że zawartość ołowiu w pobranych bulwach ziemniaka przeznaczonych do konsumpcji, zgodnie z danymi w Dzienniku Urzędowym UE (Rozp. Kom. UE 1881/2006 z 19.12.2006 r.) nie może przekraczać $0,1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ w świeżej masie. Jednak w cytowanych badaniach w czterech próbach bulw ziemniaka poziom ołowiu został przekroczony. Należy jednak podkreślić, że w większości analizowanych próbek ilość omawianego metalu ciężkiego w plonie głównym był niski, mimo sąsiedztwa ruchliwej trasy. Według Kucharzewskiego i in. [2002] poziom ołowiu w bulwach ziemniaka jest zależny od jego zawartości w glebie, zastosowanej agrotechniki, odmiany a także poziomu opadów w czasie wzrostu roślin. Według autora największą zawartością tego pierwiastka charakteryzowały się bulwy ziemniaka pochodzące z podregionu jeleniogórsko-wałbrzyskiego. Podkreślić należy, że w omawianych glebach poziom zanieczyszczeń był największy w porównaniu do innych rejonów Polski. Wyniki uzyskane przez Kucharzewskiego i in. [2002] wskazują, że zawartość ołowiu w bulwach ziemniaka zebranych w rejonie Dolnego Śląska była trzykrotnie większa od stwierdzonej w ziemniakach pochodzących z innych rejonów. Nie potwierdzają tego badania Frączka i in. [2016], z których wynika,

że zawartość tego metalu ciężkiego w bulwach ziemniaka nie jest istotnie statystycznie zależna od gatunku, poziomu omawianego pierwiastka w glebie oraz miejsca uprawy.

Badania nad zawartością ołowiu w ziarnie jęczmienia jarego prowadzili Roszko i in. [2022] stwierdzili oni, że poziom omawianego składnika w ziarnie nie był zależny od jego zawartości w glebie. Jedynie w przypadku kilku prób poziom omawianego metalu ciężkiego został nieznacznie przekroczony. Mierek-Adamska i in. [2012] podają, że rzepak ozimy jest rośliną zaliczaną do hiperakumulatorów. Ma on zdolność wchłaniania dużych ilości ołowiu, który gromadzi się głównie w nasionach.

Z badań przeprowadzonych przez Buczek i Jasiewicz [2000] wynika, że poziom w ziarnie pszenicy jest istotnie determinowany odległością pola od szlaków komunikacyjnych i innych źródeł emisji. Autorzy podają, że największym poziomem ołowiu w ziarnie w stosunku do obiektów oddalonych o 200 metrów charakteryzowały się próby pochodzące z poletek znajdujących się w odległości od 5 do 50 metrów od dróg a także niektóre próby oddalone od ciągów jezdnych o 100 m. Taką samą tendencję stwierdzono w ziarnie żyta ozimego. Z badań przeprowadzonych przez Kota i in [2009] wynika, że zawartość ołowiu w ziarnie pszenicy ozimej wahała się w przedziale od 0,044 – 0,100 mg·kg⁻¹. Doświadczenia i uzyskane z niego wyniki przez Staniak [2014] wskazują, że poziom ołowiu w plonie uprawianych roślin jest zależny od właściwości gleby, m.in. odczynu oraz gatunku roślin. Autorka podaje, że rośliny jednoliścienne znacznie trudniej pobierają ołów aniżeli dwuliścienne. Z kolei Wojciechowska-Mazurek i in. [2008] podają, że zawartość omawianego metalu ciężkiego w plonie roślin uprawnych jest zależna od regionu kraju. Autorzy odnotowali również, że ilość tego składnika była wyższa w województwie katowickim w porównaniu z pozostałymi analizowanymi województwami.

Zawartość kadmu ogólnego

W przeprowadzonych badaniach własnych stwierdzono, że ilość omawianego metalu ciężkiego w bulwach ziemniaka nie był istotnie determinowany rodzajem zastosowanego nawożenia roślin uprawianych w zmianowaniu. We wszystkich latach 11. rotacji, bez względu na rodzaj zastosowanego nawożenia, zawartość kadmu w plonie bulw nie przekraczała 1 mg·kg⁻¹ (tab. 32). Taką samą tendencję stwierdzono w 1994 roku (6. rotacja). Badania nad zawartością kadmu w bulwach ziemniaka prowadziły Pyryt i Kolenda [2006]. Stwierdziły one, że zanieczyszczenie gleby pochodzące z przemysłu i komunikacji stanowi główną przyczynę obecności kadmu w bulwach ziemniaka. Autorki podają, że 30% Cd dostającego się do organizmu człowieka jest wprowadzane wraz ze spożywanymi bulwami ziemniaka. Omawiany gatunek może gromadzić kadm w ilościach toksycznych dla człowieka, nie przejawiając objawów skażenia. Podkreślić należy,

że na poziom pobierania tego pierwiastka przez rośliny wpływ wywiera odmiana. Największą zdolność do akumulacji kadmu w bulwach mają odmiany Denar i Rosalind – $0,039 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, a najniższą odmiana Balbina ($0,009 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$).

Tabela 32. Zawartość kadmu ogólnego w plonie głównym [$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ s.m.]

Rotacja/ Lata	Gatunek uprawianej rośliny	Stosowane nawożenie		
		Obornik	NPK	Obornik + NPK
11/2014	ziemniak	< 1,0	< 1,0	< 1,0
11/2015	jęczmień	< 1,0	< 1,0	< 1,0
11/2016	rzepak	< 1,0	< 1,0	< 1,0
11/2017	pszenica	< 1,0	< 1,0	< 1,0

Według Kucharzewskiego i Dębowski [2000] zawartość kadmu w bulwach ziemniaka jest zależna od odmiany i zawartości tego składnika w glebie. Według Mercika i in. [2000] jego ilość w analizowanej roślinie jest zależna od odczynu gleby i zawartości w niej omawianego składnika, a także ilości materii organicznej w glebie. Autorzy podają także, że rośliny takie jak jęczmień i burak pastewny łatwiej go wchłaniają. Badania nad wpływem nawożenia na poziom kadmu w ziarnie jęczmienia jarego i pszenicy ozimej prowadzili Kawecka i in. [2013]. Stwierdzili oni, że poziom metalu ciężkiego był kilkukrotnie większy w ziarnie pochodzącym z obiektów nawożonych mineralnie w stosunku do jęczmienia zebranego w gospodarstwach ekologicznych. Zauważono również, że poziom kadmu w ziarnie jęczmienia jarego uzyskanego z gospodarstw konwencjonalnych wynosił $0,18 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, natomiast w plonie tego zboża zebranego z gospodarstwa ekologicznego nie stwierdzono zanieczyszczenia kadmem. Jak podają Buczek i Jasiewicz [2000] poziom kadmu w ziarnie zbóż jest istotnie determinowany odległością uprawy od ciągów komunikacyjnych. Największą zawartość kadmu stwierdzono w ziarnie z poletek oddalonych od drogi o 50 m, a poziom omawianego składnika jest odwrotnie proporcjonalny do odległości od drogi. Zawartość kadmu w plonie ziarna pszenicy ozimej jest zależna od odczynu gleby, a na odczyn gleby z kolei wpływ wywiera wapnowanie [Nagiel i Szulc, 2020]. Zatem wraz ze zwiększaniem dawki nawozów wapniowych, zmniejszeniu ulega ilość Cd w ziarnie omawianego gatunku zboża. Wymienieni autorzy odnotowali, że zawartość Cd w ziarnie pszenicy ozimej mieściła się w granicach od $0,038 \text{ mg}$ do $0,351 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. Świadczy to, że ilość tego składnika w plonie głównym omawianej rośliny nie przekraczała dopuszczalnego poziomu substancji śladowych w paszach wynikających z Rozporządzenia Ministra Rolnictwa i Rozwoju Wsi z 2012 roku.

Zawartość chromu ogólnego

W badaniach własnych stwierdzono, że ilość zawartość chromu w testowanych roślinach uprawnych była istotnie determinowana rodzajem zastosowanego nawożenia [tab.33]. Największe zawartości tego metlu ciężkiego w przypadku bulw ziemniaka i nasion rzepaku ozimego odnotowano po łącznej aplikacji obornika i NPK. W ziarnie ziarniakach jęczmienia jarego oraz pszenicy z kolei największy wpływ na ilość tego składnika miało zastosowanie odpowiednio: obornika+NPK lub NPK oraz obornika. Zanieczyszczenie gleby pochodzenia przemysłowego stanowi główny powód obecności chromu w bulwach ziemniaka w rejonie Dolnego Śląska, o czym informują wyniki uzyskane w doświadczeniu przeprowadzonym przez Kucharzewskiego i Dębowskiego [2000].

Tabela 33. Zawartość chromu ogólnego w plonie głównym [$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ s.m.]

Rotacja/ Lata	Gatunek uprawianej rośliny	Stosowane nawożenie		
		Obornik	NPK	Obornik + NPK
11/2014	ziemniak	0,07 b	0,09 ab	0,10 a
11/2015	jęczmień	0,17 ab	0,16 b	0,19 a
11/2016	rzepak	0,16 b	0,40 a	0,40 a
11/2017	pszenica	0,39 a	0,31 b	0,13 c

Jak podano powyżej, największą zawartość chromu w bulwach ziemniaka odnotowano w plonie pochodzącym z obiektu nawożonego naturalno-mineralnie, tj. $0,10 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ [tab. 33]. Aplikacja nawozów mineralnych (NPK) skutkowała mniejszą ilością Cr w próbce analizowanej rośliny i to mniejszą o 10% w porównaniu obiektem, gdzie łącznie stosowano obornik i nawozy mineralne (NPK). Z kolei nawożenie obornikiem w największym stopniu przyczyniło się do zmniejszenia ilości chromu w bulwach ziemniaka.

Stwierdzono, że ziarno jęczmienia jarego pochodzące z obiektu nawożonego łącznie obornikiem z nawozami mineralnymi charakteryzowało się największym poziomem chromu [$0,19 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$] w 11. rotacji zmianowania [tab. 33]. Na obiektach nawożonych mineralnie a także naturalnie, stwierdzono mniejszą ilość chromu w analizowanej roślinie, w stosunku do wyżej wymienionego obiektu, odpowiednio o 15,8 i 10,5%.

Zarówno nawożenie mineralne jak i mineralno-naturalne w równym stopniu przyczyniło się do uzyskania największej ilości chromu w nasionach rzepaku ozimego [tab. 33]. Stosowanie samego nawozu naturalnego okazało się najkorzystniejsze. Jego aplikacja doprowadziła do zmniejszenia poziomu omawianego metalu ciężkiego w porównaniu do wyżej wymienionych obiektów o 60%. Taką samą tendencję stwierdzono w nasionach rzepaku w 6. rotacji zmianowania (tab. 47 - aneks).

Największą zawartość chromu w ziarnie pszenicy uprawianej w 11 rotacji odnotowano po nawożeniu obornikiem - $0,39 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ [tab. 33]. Stosowanie nawozu mineralnego oraz łączne aplikowanie obornika z NPK skutkowało uzyskaniem mniejszej ilości omawianego składnika odpowiednio o: 20,5 oraz 66,7%. Taką samą tendencję stwierdzono w 6. rotacji zmianowania (tab. 47 - aneks). Zawartość chromu w plonie wybranych roślin uprawnych i jego pobranie stanowiły przedmiot badań Czeakały [2000]. Autor stwierdził, że gatunek rośliny istotnie różnicował zawartość chromu w plonach, a najmniejszą jego ilością cechowały się rośliny bobowate. Z kolei najczęściej omawianego metalu ciężkiego stwierdzono w korzeniach marchwi pastewnej i nasionach słonecznika [od $0,5$ do $10 \text{ g Cr}\cdot\text{ha}^{-1}$]. Oznaczenie stopnia zanieczyszczenia płodów rolnych chromem sprawdzali doświadczalnie Kucharzewski i Dębowski [2002]. W trakcie eksperymentu autorzy przebadali 1120 prób roślin zbożowych i okopowych pobranych w rejonie Dolnego Śląska. Wśród badanych gatunków były następujące rośliny: jęczmień, owies, żyto, pszenica, ziemniaki oraz buraki. Okazało się, że zanieczyszczenie gleby spowodowane działalnością przemysłową i gatunek uprawianej rośliny, w większym stopniu niż nawożenie, przyczyniły się do wzrostu zawartości chromu w plonie. W przypadku ziarna żyta poziom omawianego składnika ziarnie i słomie żyta $0,91 \text{ [mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{s.m.]}$. Podobną zawartość stwierdzono w słomie tego gatunku. Natomiast w przypadku słomy pozostałych zbóż zauważono, że zawierała ona więcej chromu od ziarna. Rośliną, która kumulowała najczęściej omawianego metalu w plonie głównym okazał się burak cukrowy [$5,24 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$]. Lasoń-Rydel i in. [2019] wskazują, że źródłem chromu w plonie rzepaku mogą być stosowane w rolnictwie preparaty kolagenowe, służące do otoczkowania. Na podstawie uzyskanych wyników autorzy stwierdzili, że ilość omawianego składnika nie przekraczała $0,10 \text{ mg}^{-1}$ w suchej masie.

Zawartość niklu ogólnego

W przeprowadzonych badaniach własnych stwierdzono, że ilość niklu w plonie głównym tej rośliny była istotnie determinowana rodzajem zastosowanego nawożenia w ich uprawie [tab. 34]. W pierwszym roku 11. rotacji zmianowania, w którym uprawiano ziemniaka, największą zawartość tego metalu ciężkiego stwierdzono w bulwach pochodzących z obiektu nawożonego naturalno-mineralnie [$0,48 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$]. Aplikacja nawozu mineralnego determinowała uzyskanie mniejszej o 33,3%, a nawożenie obornikiem 35,4% ilości omawianego składnika, w porównaniu z wyżej wymienionym obiektem. Jasiewicz i in. [1997] prowadząc badania nad zawartością niklu w bulwach ziemniaka stwierdzili, że główną przyczyną występowania jest jego obecność w powietrzu atmosferycznym. Źródłem zanieczyszczenia są spaliny samochodów z silnikiem Diesla. Autorzy podają, że poziom omawianego metalu ciężkiego jest uzależniona od odległości pola

uprawnego od ruchliwej trasy komunikacyjnej. Z przeprowadzonych przez nich badań wynika, że zawartość tego metalu w bulwach ziemniaka wahała się w przedziale od 1,95 do 5,80 mg·kg⁻¹, a największą zawartością charakteryzował się plon główny zebrany z pola przylegającego do trasy E-4 w okolicach Rzeszowa. Podkreślić należy, że zanieczyszczanie powietrza w większym stopniu przyczyniło się do wzrostu poziomu omawianego pierwiastka w glebie niż jej nawożenie.

Tabela 34. Zawartość niklu ogólnego w plonie głównym [mg·kg⁻¹ s.m.]

Rotacja/ Lata	Gatunek uprawianej rośliny	Stosowane nawożenie		
		Obornik	NPK	Obornik + NPK
11/2014	ziemniak	0,31 b	0,32 b	0,48 a
11/2015	jęczmień	0,50 a	0,34 b	0,31 b
11/2016	rzepak	0,75 b	0,45 c	0,82 a
11/2017	pszenica	0,39 a	0,32 b	0,32 b

Badania nad zawartością niklu w bulwach ziemniaka prowadzili Kucharzewski i Dębowski [2000] i stwierdzili, że wartość omawianej cechy w bulwach ziemniaka jest zależna od zawartości w glebie niklu, poziomu opadów a także gatunku rośliny i odmiany. Autorzy podają, że największą zawartością omawianego metalu ciężkiego charakteryzowały się plony zebrane w rejonie Dolnego Śląska. Zawartość niklu w nich była kilkukrotnie wyższa od stwierdzonej w plonie bulw zebranych z terenu niezanieczyszczonego.

Na podstawie wyników uzyskanych z przeprowadzonych badań odnotowano, że największym poziomem niklu w 11. rotacji zmianowania charakteryzowało się ziarno jęczmienia jarego i pszenicy ozimej pochodzące z obiektu nawożonego obornikiem [odpowiednio: 0,50 i 0,39 mg·kg⁻¹, tab. 34]. W plonie głównym zebrany z poletek, gdzie aplikowano nawozy mineralne lub obornik wraz z nawozami mineralnymi stwierdzono niższą ilość omawianego metalu ciężkiego i w stosunku do obiektu, gdzie nawożono obornikiem były one niższe w granicach odpowiednio: 32,0 do 38,0% i 17,9%. Taką samą tendencję dla tych zbóż stwierdzono w uprawie prowadzonej w 6. rotacji zmianowania (tab. 47 – aneks). Zdolność jęczmienia jarego do akumulacji niklu w plonie stanowiła przedmiot badań Molas i in. [2004]. Autorzy stwierdzili, że ilość tego metalu ciężkiego w plonie jest zależna od wartości pH gleby, jej składu granulometrycznego a także gatunku rośliny i jej zdolności do akumulacji zanieczyszczeń w ziarnie. Największą wartość analizowanej cechy jakościowej zauważyli w ziarnie zboża zebrany z gleby o charakteryzującej się wartością pH poniżej 4,5. Była ona kilkukrotnie wyższa od stwierdzonej w ziarnie z obiektów o wartości pH powyżej 5,5. Największą zawartość niklu w 11 rotacji odnotowano w ziarnie pszenicy nawożonej

obornikiem $0,39 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. Stosowanie nawozu mineralnego i naturalno-mineralnego skutkowało zmniejszeniem ilości omawianego składnika o 17,95%. Właśniewski i in. [2019] nie odnotowali istotnego wpływu nawożenia NPK na zmienność zawartości niklu w ziarnie jęczmienia i pszenicy, natomiast występowała pewna tendencja do zmniejszania się zawartości tego metalu w ziarnie pszenicy wraz ze wzrostem dawki nawozów mineralnych. Spadek zawartości Ni w ziarniakach zbóż odnotowali także Dolijanović i in. [2019]. Właśniewski i in. [2019] stwierdzili, że nawożenie mineralne (niezależnie od wapnowania) nie miało istotnego statystycznie wpływu na zawartość niklu w ziarnie badanych zbóż. Zwykle jednak obserwowano tendencję do zmniejszania się zawartości tego metalu w ziarnie pszenicy ozimej w odpowiedzi na zwiększające się dawki NPK przy stałym stosunku N:P:K. Zawartość metali ciężkich w ziarnie pszenicy stanowiła przedmiot badań Bednarka i in. [2008]. Ustalili oni, że poziom niklu w ziarnie pszenicy był niewielki - $0,24 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ i nie przekraczał dopuszczalnych wartości w żywności.

Podobnie jak w przypadku zbóż, stosowanie nawozu mineralnego w największym stopniu przyczyniło się do uzyskania najniższego poziomu niklu w nasionach rzepaku w 11. rotacji zmianowania [$0,45 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, tab. 34]. Natomiast ilość tego mikroskładnika była najwyższa w nasionach zebranych z poletek, gdzie łącznie aplikowano nawóz naturalny i mineralny [NPK] - $0,82 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. Wpływ nawożenia na zawartość niklu w nasionach rzepaku stanowił przedmiot badań Gambusia i in. [2004]. Autorzy stwierdzili, że zastosowane przez nich nawożenie nie wywiera istotnego statystycznie wpływu na poziom omawianego składnika w nasionach rzepaku. Z kolei Krzywy i Iżewska [2007] wskazują, że z nawozów wprowadzonych do gleby (obornik, osad ściekowy i kompost przygotowany z osadu ściekowego) mniejszy wpływ na zmniejszenie lub nadmierny wzrost zawartości metali ciężkich w nasionach rzepaku jarego miał obornik. Podwójna dawka powyższych nawozów spowodowała większą akumulację metali ciężkich w badanej roślinie.

Reasumując należy stwierdzić, że nawożenie łączone mineralno-organiczne, przyczyniło się do istotnego statystycznie zwiększenia wartości niemal wszystkich składników mineralnych w plonie bulw ziemniaka (tab. 19-21, 23-34). Jak podają Stępień i in [2018] obornik blokuje w glebie aktywny glin minimalizując negatywne oddziaływanie zakwaszenia. Jedynie w przypadku magnezu większą ilość oznaczono na obiekcie nawiezionym wyłącznie obornikiem. Szczególnie korzystny był wpływ nawożenia łącznego NPK+obornik na wielkość plonu, który okazał się o blisko 10% większy po zastosowaniu nawożenia mineralnego i aż o 86,4% większy w porównaniu z uprawą na samym oborniku. Na obiekcie nawożonym tylko nawozami mineralnymi cechy przyjmowały zwykle wartości pośrednie. Połączenie obornika z nawozami mineralnymi poprawia nie tylko wielkość plonu, ale również koncentrację składników odżywczych w bulwach. Omawiany nawóz naturalny zastosowany jesienią w 30% pokrywa zapotrzebowanie

ziemniaków na azot i fosfor, a w 50% na potas. Pozostałe składniki odżywcze czerpie z nawozów mineralnych podczas wegetacji. Pozytywne współdziałanie nawożenia mineralnego z obornikiem potwierdzają również badania przeprowadzone przez Blecharczyka i in. [2008]. Na obiekcie nawożonym mineralno-organicznie uzyskali oni wzrost plonu ziemniaka o 22,8% w stosunku do obiektu nawożonego obornikiem. Z badań przeprowadzonych przez Stępnia i in. [2018] wynika, że składnikami mineralnymi, które w największym stopniu ograniczają plonowanie ziemniaka są azot, fosfor i potas. Potwierdzają to wyniki uzyskane w badaniach własnych.

Na podstawie analizy wariancji stwierdzono, że plon jęczmienia jarego był istotnie determinowany sposobem nawożenia (tab. 19). Najwyższą jego wartość odnotowano na obiekcie obornik+NPK ($3,13 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$), i to wyższą w stosunku do plonowania na poletkach, gdzie stosowano obornik i NPK odpowiednio o 35,8% i 15,3%. Potwierdzają to badania przeprowadzone nad jęczmieniem przez Kruk [2008], na podstawie omawianego doświadczenia w 2007 roku. Autorka ta również odnotowała większy plon jęczmienia ($4,94 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$), na obiekcie nawożonym naturalno-mineralnie. Plon jęczmienia uzyskany w 2007 roku były znacznie większe w stosunku do zebranego w 2015 roku. Było to prawdopodobnie spowodowane niedoborem opadów w okresie intensywnego wzrostu i postępującym zakwaszeniem. Z badań przeprowadzonych przez Stępnia i in. [2018] wynika, że jęczmień jary jest rośliną o największej wrażliwości na zakwaszenia gleby. W przypadku omawianego gatunku brak obornika w połączeniu z kwaśnym odczynem skutkowało spadkiem plonowania sięgającym 40% w stosunku do obiektów wapnowanych. Podobnie jak w przypadku ziemniaka nawożenie mineralno-organiczne skutkowało istotnym statystycznie wzrostem części makroelementów i większości mikroelementów za wyjątkiem miedzi i niklu, których było więcej na obiekcie nawożonym wyłącznie obornikiem (tab. 20-21, 23-34). Podobne tendencje stwierdzono w 6 rotacji prowadzonego doświadczenia. Zawartość chromu w plonie wzrosła w stosunku do roku poprzedniego na wszystkich obiektach nawozowych. Ilość niklu również uległa zwiększeniu za wyjątkiem obiektu nawożonego mineralno-organicznie, jednak nie były to różnice istotne statystycznie.

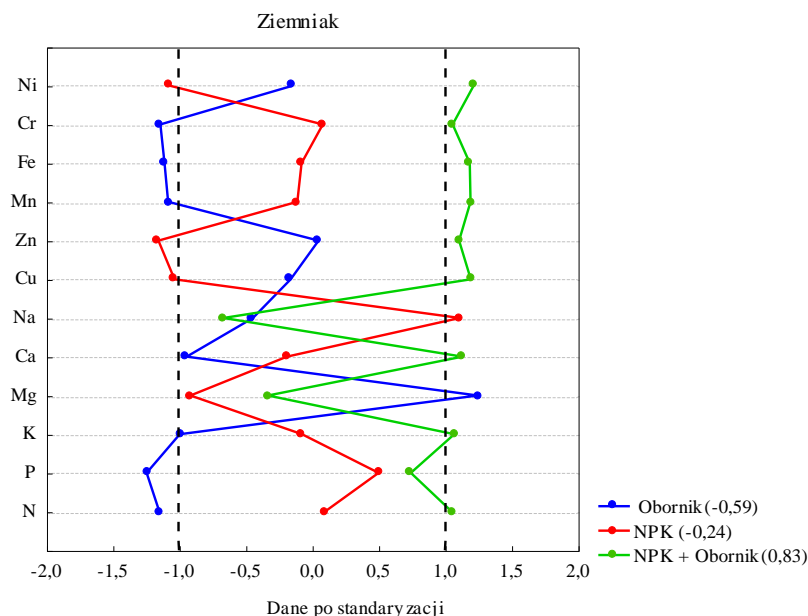
Podobnie jak w przypadku ziemniaka i jęczmienia plon rzepaku ozimego był istotnie determinowany sposobem nawożenia. Największy osiągnięto na obiekcie, gdzie zastosowano nawożenie mineralne w połączeniu z obornikiem (tab. 19). Według Suwary i in. [2018] spadek plonowania na obiekcie nawożonym wyłącznie obornikiem był spowodowany mniejszą dostępnością składników mineralnych. Podobnie jak w poprzednich latach plon na obiekcie nawożonym wyłącznie NPK przybrał wartość pośrednią. Nawożenie determinowało również istotnie zawartość makro- i mikroelementów (tab. 20-21, 23-34). Największe ich ilości odnotowano na obiekcie nawożonym NPK+O. Jaskulska i Urbanowski [2018] potwierdzają,

że najbardziej korzystny sposób nawożenia to stosowanie nawozów mineralnych z obornikiem. Za optymalny uważają połączenie ich z magnezem oraz regularnym wapnowaniem.

Na podstawie obliczonej analizy wariancji stwierdzono, że plon pszenicy był istotnie determinowany sposobem nawożenia. Najmniejszą jego wartość ($2,91 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$) zauważono na obiekcie nawożonym obornikiem. Dodatek NPK skutkował wzrostem plonowania o 27,8%. Z badań przeprowadzonych przez Suwarę i in. [2018] wynika, że największe plony pszenicy osiągnięto na obiekcie nawożonym mineralno-organicznie. Eliminacja nawożenia mineralnego z dawki spowodowała uzyskanie mniejszego plonowania o 43% w stosunku do obiektu nawożonego obornikiem+NPK. Na obiekcie nawożonym wyłącznie mineralnie jego wartość w stosunku do poprzedniego obiektu była niższa o 6,7%. Na obiekcie nawożonym mineralno-organicznie odnotowano także największe wartości cynku, manganu i żelaza w ziarnie pszenicy ozimej. Podobne tendencje zaobserwowano w 6 rotacji prowadzonego doświadczenia. Z badań Stępnia i in. [2018] wynika, że azot i fosfor to pierwiastki których niedobór w największym stopniu ogranicza plonowanie omawianego gatunku.

Podobnie jak w przypadku próbek materiału glebowego, uzyskane wyniki składu mineralnego plonów głównych uprawianych roślin podsumowano w oparciu o podstawy analizy intraprofilowej, polegającej na porównaniu przebiegu profilów wielocechowych zestawianych w trzy linie odpowiadające zespołom wartości wszystkich cech stwierdzonych na obiektach z różnym sposobem nawożenia ziemniaka w 1. roku rotacji (obornik, NPK, obornik+NPK). W celu wzajemnej porównywalności wartości cech poddano standaryzacji. Dla zobrazowania położenia poszczególnych profili obliczono ich średnie wartości. Rezultaty tego opracowania przedstawiono graficznie na rysunkach 25-29 (liniami przerywanymi oznaczono przedział \pm jedno odchylenie standardowe każdej z cech).

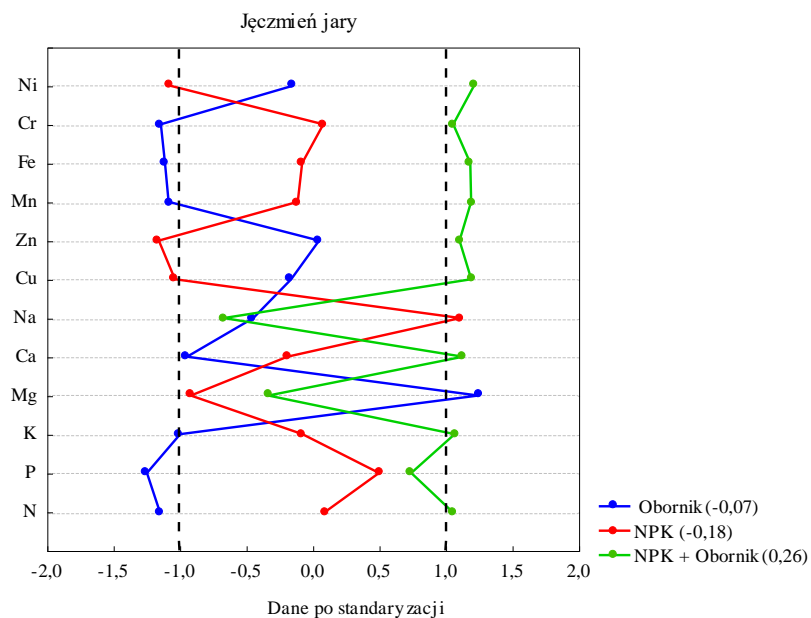
Na rysunku 25 przedstawiono profil wielocechowy składu mineralnego ziemniaka w czteroletnim zmianowaniu. Okazało się, że najkorzystniej na ten skład oddziaływało łączne nawożenie obornikiem i NPK. Potwierdza to przebieg poniższego profilu, sytuując się najczęściej w prawej (dodatniej) części układu. Natomiast profil obiektu nawożonego obornikiem oraz wyłącznie NPK przekraczają średnie układu tylko w odniesieniu odpowiednio: do magnezu oraz fosforu i sodu.



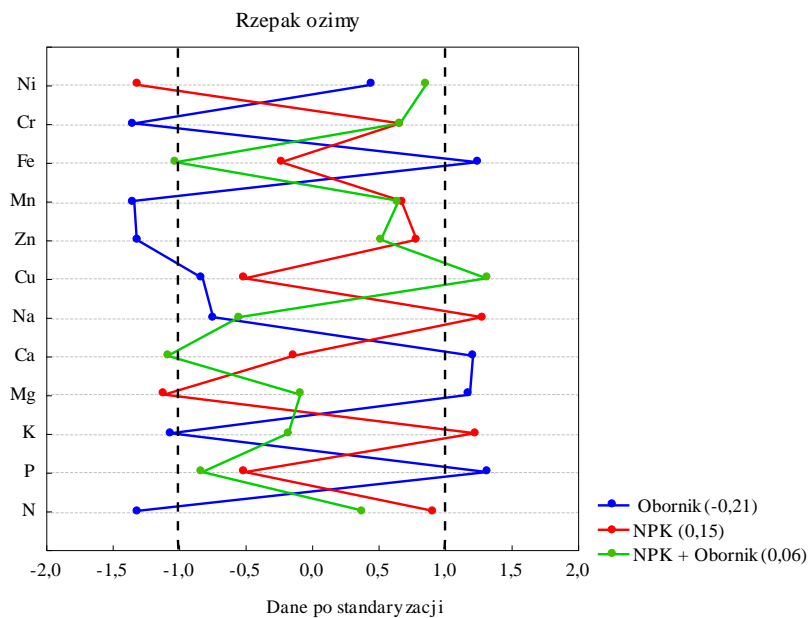
Rys. 25 Profil wielocechowy składu mineralnego ziemniaka w czteroletnim zmianowaniu (2014)

Przebieg profilu wielocechowego składu mineralnego jęczmienia jarego jest niemal identyczny jak w przypadku ziemniaka, a potwierdzają to następcze działanie obornika w pierwszym roku po jego zastosowaniu, gdzie profil przekracza średnią układu jedynie w odniesieniu do magnezu oraz aplikacja NPK - przekroczone średnie w stosunku do fosforu i sodu (rys. 26). Opisany profil jęczmienia jarego zdecydowanie wskazuje na korzystne działanie nawożenia mineralno-organicznego na skład mineralny plonu ziarna tego zboża, sytuując się najczęściej w prawej części układu.

Działanie następcze obornika zanika w drugim roku, na co wskazuje przebieg profilu wielocechowego składu mineralnego rzepaku ozimego w czteroletnim zmianowaniu (rys. 27). Po zastosowaniu nawozów mineralnych profil przekracza średnią układu w odniesieniu do azotu, potasu, sodu, cynku, manganu i chromu. Aplikacja wyłącznie obornika zdecydowała o przekroczeniu średniej układu w odniesieniu do fosforu, magnezu, wapnia, żelaza i niklu, natomiast łączne zastosowanie badanych rodzajów nawożenia: azotu, miedzi, cynku, chromu i niklu.

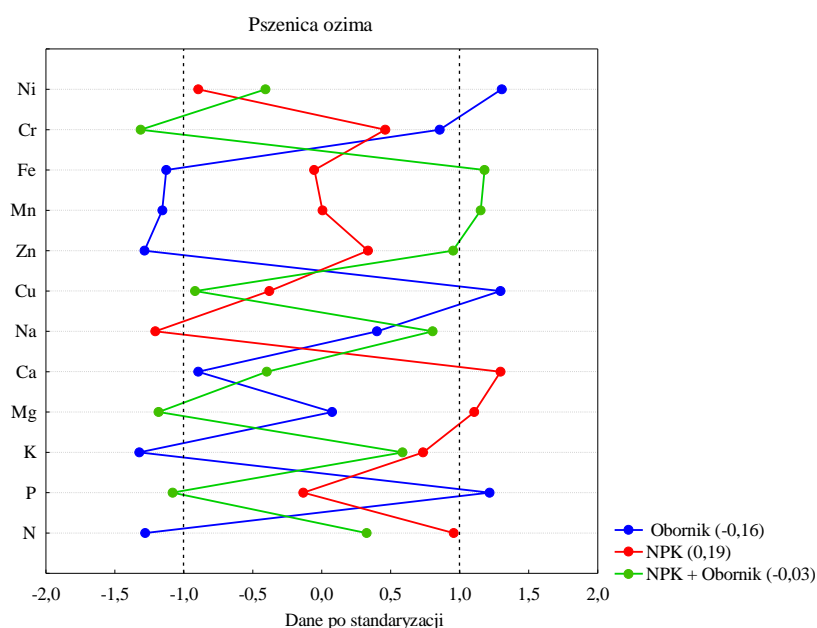


Rys. 26 Profil wieloechowy składu mineralnego jęczmienia jarego w czteroletnim zmianowaniu (2015)



Rys. 27 Profil wieloechowy składu mineralnego rzepaku ozimego w czteroletnim zmianowaniu (2016)

Profil wieloechowy składu mineralnego, który w ostatnim roku prowadzenia doświadczenia dotyczył ziarna pszenicy ozimej (rys. 28) wskazuje, że na obiekcie z łączną aplikacją obornika i NPK przekroczone średnią układu w stosunku do N, K, Na, Zn, Mn i Fe. Po prawej, dodatniej części układu znajdują się również P, Na, Cu, Cr i Ni (po oborniku) oraz N, K, Mg, Ca, Zn i Cr (po zastosowaniu NPK).



Rys. 28. Profil wieloechowy składu mineralnego pszenicy ozimej w czteroletnim zmianowaniu (2017)

5.2.3. Ocena produktywności płodozmianu

W przeprowadzonych badaniach własnych stwierdzono, że rodzaj nawożenia ziemniaka w 1 roku 11. rotacji zmianowania różnicował istotnie plonowanie gatunków wyrażone w jednostkach zbożowych [tab. 35]. Ocena produktywności płodozmianu stanowiła przedmiot badań Nasalskiego i in. [2008], którzy stwierdzili, że uprawa roślin okopowych prowadzi do wzrostu kosztów w skali całkowitego zmianowania. Autorzy podają, że uprawa międzyplonów, które w gospodarstwach spełniają rolę nawozową generują dodatkowe koszty, szczególnie w gospodarstwach ekologicznych. Wprawdzie nie ma z nich bezpośrednich zysków, jednak wywierają istotny wpływ na plonowanie roślin następczych.

Tabela 35. Wpływ rodzaju nawożenia ziemniaka w I. roku 11. rotacji na plonowanie roślin uprawianych w 11. rotacji zmianowania wyrażone w jednostkach zbożowych

Rotacja/ Lata	Gatunek uprawianej rośliny	Stosowane nawożenie			Średnia dla gatunku
		Obornik	NPK	Obornik + NPK	
11/2014	ziemniak	27,87	47,28	51,94	42,36 a
11/2015	jęczmień	24,06	31,63	37,44	31,04 c
11/2016	rzepak	29,02	37,53	50,76	39,10 b
11/2017	pszenica	32,01	41,36	44,33	39,23 b
Średnia dla sposobu nawożenia ziemniaka		28,24 c	39,45 b	46,12 a	28,24

Najkorzystniejszym sposobem nawożenia okazała się łączna aplikacja obornika i nawozu mineralnego. Na omawianym obiekcie osiągnięto największe plony - 46,12 jednostek zbożowych. Zarówno stosowanie nawożenia mineralnego jak i naturalnego skutkowało uzyskaniem mniejszego efektu plonotwórczego, odpowiednio o: 14,5 i 38,8%. Wpływ zastosowanego nawożenia naturalno-mineralnego na produktywność płodozmianu stanowił przedmiot badań Wesołowskiego [2003]. Stwierdził on, że najkorzystniejszym rodzajem nawożenia ze względu na plonowanie było łączne zastosowanie obornika i nawozów mineralnych. Rezygnacja z obornika w dawce skutkowała zmniejszeniem średniego plonu w rotacji o około 30%. Podobne wyniki uzyskano w badaniach własnych. Jaskulska i Jaskulski [2003] również analizowali wpływ łącznej aplikacji nawożenia mineralno-naturalnego na plon ogółem w zmianowaniu. Odnotowali oni, że najkorzystniejszym rodzajem nawożenia jest łączna aplikacja obornika połączona z regularną aplikacją nawozów wapniowych. Jak podają autorzy, dzięki temu zabiegowi następuje zwiększenie poziomu substancji organicznej w glebie, porowatości gleby a także zatrzymywania wody. Omawiany rodzaj nawożenia wywierał również pozytywny wpływ na odczyn gleby i jej pojemność sorpcyjną.

W przeprowadzonych badaniach stwierdzono, że największy łączny plon w czterolecu odnotowano na obiekcie nawożonym obornikiem w połączeniu z nawozami mineralnymi - 184,5 jednostki zbożowe [tab. 36]. Aplikacja nawożenia mineralnego oraz nawożenia naturalnego doprowadziła do spadku łącznego plonu w czterolecu odpowiednio o: 14,5% i 38,8%. Łącznie w 11. rotacji zmianowania zebrano 455,23 t·ha⁻¹. Z obiektu, gdzie zastosowano obornik+NPK ogólny plon stanowił 40,52%, a na obiekcie z aplikacją obornika - 24,81%. Masa plonu bulw ziemniaka była największa i stanowiła 27,92% plonu łącznego, a jęczmienia najmniejsza - 20,46%.

Tabela 36. Plon łączny w czteroleciu w zależności od gatunku rośliny i sposobu nawożenia ziemniaka w I. roku 11. rotacji zmianowania wyrażony w jednostkach zbożowych

Rotacja/ Lata	Gatunek uprawianej rośliny	Stosowane nawożenie			Średnia dla gatunku	Udział w plonie łącznym
		Obornik	NPK	Obornik + NPK		
11/2014	ziemniak	27,9	47,3	51,9	127,1	27,9
11/2015	jęczmień	24,1	31,6	37,4	93,1	20,5
11/2016	rzepak	29,0	37,5	50,8	117,3	25,8
11/2017	pszenica	32,0	41,4	44,3	117,7	25,9
Suma plonów z obiektu		112,9	157,8	184,5	455,2	100,0
Udział w plonie łącznym [%]		24,8	34,7	40,5	100,0	----

W przeprowadzonych badaniach stwierdzono, że największy plon białka w zmianowaniu uzyskano z obiektu nawożonego naturalno-mineralnie - 787,4 kg·ha⁻¹ [tab. 37]. Wpływ sposobu nawożenia azotem i cynkiem na plon białka zbóż badali Knapowski i in. [2010]. Stwierdzili, że zastosowane nawożenie różnicowało istotnie wartość omawianej cechy. Autorzy podają, że największą zawartość białka odnotowano po aplikacji cynku w dawce 0,30 kg·ha⁻¹. Był on większy od stwierdzonego w ziarnie zebranych z pozostałych obiektów badawczych odpowiednio o 15,2 i 35,1%.

Tabela 37. Wpływ sposobu nawożenia ziemniaka na plon białka plonu głównego roślin uprawianych w zmianowaniu [kg·ha⁻¹]

Rotacja/ Lata	Gatunek uprawianej rośliny	Stosowane nawożenie			Średnia dla gatunku
		Obornik	NPK	Obornik + NPK	
11/2014	ziemniak	1048,6	1975,7	2336,7	1787,0 a
11/2015	jęczmień	193,5	313,0	414,5	307,0 b
11/2016	rzepak	21,2	34,8	44,8	33,6 c
11/2017	pszenica	210,2	353,1	353,8	305,7 b
Suma plonów z obiektu		368,4 c	669,1 b	787,4 a	608,3

Natomiast zastosowanie nawozu mineralnego oraz naturalnego determinowało niższe wartości obliczonej cechy, odpowiednio o: 15,0 i 53,2% w porównaniu do odnotowanej dla wyżej wymienionego obiektu. W przeprowadzonych

badaniach stwierdzono, że największy plon łączny białka w czterolecium stwierdzono na obiekcie nawożonym naturalno-mineralnie 3149,8 kg·ha⁻¹ [tab. 38]. Stosowanie nawozu mineralnego i naturalnego doprowadziło do obniżenia poziomu omawianego składnika odpowiednio o 15,02% i 53,21%.

Tabela 38. Plon łączny białka w czterolecium w zależności od gatunku rośliny i sposobu nawożenia ziemniaka w I. roku 11. rotacji zmianowania [kg·ha⁻¹]

Rotacja/ Lata	Gatunek uprawianej rośliny	Stosowane nawożenie			Średnia dla gatunku	Udział w plonie łącznym w %
		Obornik	NPK	Obornik + NPK		
11/2014	ziemniak	1048,6	1975,7	2336,7	5361,0	73,4
11/2015	jęczmień	193,5	313,0	414,5	921,0	12,6
11/2016	rzepak	21,2	34,8	44,8	100,8	1,4
11/2017	pszenica	210,2	353,1	353,8	917,1	12,6
Suma plonów z obiektu		1473,5	2676,6	3149,8	7299,9	100,0
Udział w łącznym plonie białka [%]		20,2	36,7	43,1	100,0	x

Za sumaryczny plon białka w zmianowaniu odpowiada ziemniak - 73,44%. A wśród obiektów nawozowych plon białka pochodzi z nawożenia łącznego [tab. 38]. Potwierdza się pogląd, że zastosowanie obornika w połączeniu z NPK jest plonotwórcze dla wszystkich obiektów nawozowych w 11. rotacji zmianowania. Potwierdzają to również badania Stępnia i in. [2018]. Odnotowali oni, że największy plon łączny oraz plon białka stwierdzono na obiekcie nawożonym naturalno-mineralnie. Rezygnacja z nawozu naturalnego w dawce skutkowała obniżeniem plonu jęczmienia o 40% w stosunku do obiektów, gdzie go nie stosowano. Taką samą tendencję autorzy stwierdzili również w przypadku pszenicy i ziemniaka. Badania nad wpływem obornika i nawozów mineralnych na plon, m.in. plon i zawartość białka w plonie roślin uprawianych w zmianowaniu prowadził Marks i in. [2018]. Odnotowano w nich, że nawożenie obornikiem łącznie z nawozami mineralnymi nawet w monokulturze, prowadzi do utrzymania poziomu plonowania na wysokim poziomie oraz do wzrostu ilości białka w plonie, a tym samym plonu białka. Potwierdzają to także badania Suwary i in. [2018], z których wynika, że największy plon testowanej przez nich rośliny (buraka cukrowego) stwierdzono na obiekcie łącznie nawożonym obornikiem i NPK.

Wpływ łącznej aplikacji obornika i nawozów mineralnych na plon żyta ozimego stanowił przedmiot badań Bleharczyka i in. [2018]. Największy efekt plonotwórczy autorzy uzyskali na obiekcie nawożonym obornikiem z nawozami mineralnymi i to zarówno w zmianowaniu jak i monokulturze.

Taką samą tendencję stwierdzono w plonie jęczmienia jarego i ziemniaka. Zarówno uzyskane wyniki, jak i literatura przedmiotu potwierdzają, że największą produktywnością płodozmianu charakteryzowały się obiekty nawożone naturalno-mineralnie.

6. WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań sformułowano następujące wnioski:

1. Stwierdzono, że w 11. rotacji zmianowania wartości kwasowości hydrolitycznej w glebie były średnio istotnie najwyższe po łącznym zastosowaniu obornika i nawożenia mineralnego (NPK), niezależnie od roku badań, a tym samym od gatunku uprawianej rośliny. Natomiast takiej tendencji nie udokumentowano w przypadku wartości pH, bowiem najwyższe wskaźniki tego parametru uzyskano po zastosowaniu samego obornika, również niezależnie od lat badań. Należy zwrócić uwagę, że po 11. rotacji zmianowania, niezależnie od stosowanego nawożenia, odnotowano zmianę odczynu gleby z obojętnego (1974 r.) do kwaśnego lub bardzo kwaśnego.
2. Wykazano, że zawartości azotu ogółem oraz węgla organicznego były średnio istotnie najwyższe w glebach pobranych spod badanych roślin po aplikacji obornika, w stosunku do pozostałych stosowanych nawozów, za wyjątkiem zawartości Corg. po uprawie rzepaku ozimego.
3. Stwierdzono, że zawartości przyswajalnych form fosforu, potasu i magnezu były średnio istotnie najwyższe w glebach po zastosowaniu wyłącznie obornika, w stosunku do pozostałych obiektów nawozowych, za wyjątkiem zawartości Mg określonej w glebach spod uprawy pszenicy ozimej, gdzie najwyższą zawartość tej cechy odnotowano po łącznej aplikacji obornika i nawożenia mineralnego (NPK).
4. Na ogół średnio istotnie najwyższe zawartości przyswajalnych form miedzi, cynku i manganu w glebach, niezależnie od roku badań, uzyskano po zastosowaniu obornika, w porównaniu do pozostałych badanych nawozów. Takiego kierunku nie stwierdzono w przypadku zawartości żelaza. Średnio najwyższe jego zawartości wykazano zarówno po aplikacji obornika lub łącznej obornika i NPK, za wyjątkiem gleb po uprawie pszenicy ozimej.
5. Zawartości badanych metali ciężkich w analizowanych glebach były mało zróżnicowane. Jednak każdorazowo w przypadku ołowiu, chromu i niklu, średnio najwyższe ich zawartości, stwierdzono po zastosowaniu obornika. Nie dotyczyło to natomiast kadmu, którego zawartości, niezależnie od stosowanych rodzajów nawozów, były poniżej progu detekcji aparatury i wynosiły mniej niż $1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. Należy również zwrócić uwagę, że badane gleby spełniały standardy dla gleb użytkowanych rolniczo.
6. Wykazano, że plon główny uprawianych roślin w 11. rotacji zmianowania, był średnio istotnie najwyższy po łącznej aplikacji nawozu naturalnego

i nawożenia mineralnego, w stosunku do pozostałych badanych nawozów.

7. Nie stwierdzono kierunkowych zmian w zawartościach podstawowych makroskładników w plonie głównym badanych roślin. Zależały one zarówno od rodzajów aplikowanego nawożenia jak i gatunku uprawianej rośliny. W przypadku azotu ogólnego średnio istotne najwyższe jego zawartości uzyskano w bulwach ziemniaka i ziarnie jęczmienia jarego po łącznym zastosowaniu obornika i NPK, natomiast w nasionach rzepaku ozimego i ziarnie pszenicy ozimej – po aplikacji jedynie nawozów mineralnych.
8. Podobną zależność jak w przypadku azotu odnotowano dla zawartości fosforu, potasu i magnezu w plonie głównym. Najwyższe średnie istotne zawartości tych makroskładników stwierdzono po zastosowaniu obornika. Dotyczyło to na ogół wszystkich uprawianych roślin. Natomiast w przypadku wapnia, najwyższe jego zawartości uzyskano wyłącznie po łącznej aplikacji obornika i NPK.
9. Najwyższą istotną zawartość badanych mikroelementów w bulwach ziemniaka stwierdzono po łącznej aplikacji obornika i nawozów mineralnych. Nawożenie to wpłynęło również na uzyskanie istotnie najwyższej ilości Zn, Mn i Fe w ziarnie jęczmienia i pszenicy. Z kolei największej miedzi w plonie zbóż odnotowano po aplikacji obornika. Nawożenie NPK determinowało uzyskanie największej zawartości cynku i manganu, aplikacja obornika – żelaza, a łączne stosowanie obornika i NPK – miedzi, w nasionach rzepaku ozimego.
10. W plonie głównym ziemniaka, jęczmienia jarego i rzepaku ozimego najwyższą zawartość chromu stwierdzono pod wpływem łącznej aplikacji obornika i nawozów mineralnych, natomiast w ziarnie pszenicy po zastosowaniu obornika. Z kolei w wyniku łącznego nawożenia obornikiem i nawozami mineralnymi najwyższą zawartość niklu ogólnego odnotowano w bulwach ziemniaka i nasionach rzepaku, a aplikacja wyłącznie obornika determinowała jego najwyższą ilość w plonie głównym badanych zbóż. Uzyskane zawartości ołowiu i kadmu w plonach badanych roślin były mniejsze niż $1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. Zawartości powyższych metali nie przekraczały wartości granicznych dla uzyskanego surowca w kontekście jego bezpieczeństwa dla przemysłu rolno-spożywczego.

Reasumując należy stwierdzić, że wieloletnie (44 lata) nakładające się nawożenie obornikiem, nawozami mineralnymi NPK) oraz łączna ich aplikacja powodowały zmiany wartości wskaźników jakościowych gleby (zmniejszenie wartości pH gleby, wzrost wartości Hh, zmniejszenie zawartości $N_{\text{og.}}$, $C_{\text{org.}}$, przyswajalnych form makro- i mikroelementów w glebie). Przy czym najmniejszy ich spadek odnotowano po zastosowaniu obornika. Powyższe

zmiany mogły mieć wpływ na uzyskane wartości cech ilościowych i jakościowych plonu głównego roślin uprawianych w 11. rotacji zmianowania.

7. LITERATURA

- Allen-King R., Grathwohl P., Ball W., 2002. New modeling paradigms for the sorption of hydrophobic organic chemicals to heterogenous carbonaceous matter in soils, sediments and rocks. *Adv. Water. Resour.*, 25, 985-1016.
- Antonkiewicz J., Łabętowicz J. 2016. Chemical innovation in plant nutrition in a historical continuum from ancient Greece and Rome until modern time. *Chem. Didact. Ecol. Metrol.*, (1-2), 29-43.
- Astel A., Czyżyk A., Parzych A., 2014. Fitoremediacja metodą obniżania toksyczności gleb zanieczyszczonych metalami ciężkimi. *LAB*, 19, 4, 6-12.
- Badora A. 2002. Mobilność cynku i miedzi w glebie lekkiej w zależności od stosowania wieloletniego nawożenia azotem i potasem. *Zesz. Probl. Post. Nauk Roln.*, 482, 21-36.
- Balík J., Kulhánek M., Cerný J., Sedlár O., Suran P., Asrade D.A. 2022. The influence of organic and mineral fertilizers on the quality of soil organic matter and glomalin content. *Agronomy*, 12, 1375. <https://doi.org/10.3390/agronomy12061375>
- Barczak B., Cwojdziański W., Nowak K. 1999. Wpływ nawożenia mineralnego i organicznego na niektóre właściwości gleby w statycznym doświadczeniu polowym. *Zesz. Probl. Post. Nauk Roln.*, 467, 177-183.
- Barczak B., Skinder Z., Piotrowski R. 2017. Sulphur as a factor that affects nitrogen effectiveness in spring rapeseed agrotechnics. Part III. Agronomic use efficiency of nitrogen. *Acta Sci. Pol., Agricultura*, 7(2), 3-10.
- Barlóg P., Hlisnikovský L., Kunzová E., 2020. Concentration of trace metals in winter wheat and spring barley as a result of digestate, cattle slurry, and mineral fertilizer application. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 27, 4769–4785. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-07304-2>.
- Barszczewski J., Ducka M. 2013. Gospodarka cynkiem na łące trwałej łąkowej w warunkach zróżnicowanego nawożenia. *Woda Środ. Obsz. Wiej.*, 13, 1(41), 5-14.
- Bečka D., Bečková L., Tomášek J., Mikšík V., Vicianová M. (2024): Effects of various nitrogen fertilisers applied in autumn on growth parameters, yield and quality of winter oilseed rape. *Plant Soil Environ.*, 70, 317–325. <https://doi.org/10.17221/68/2024-PSE>
- Bednarek W., Tkaczyk P., Dresler S. 2008. Zawartość metali ciężkich jako kryterium oceny jakości ziarna pszenicy ozimej. *Acta Agroph.*, 12(2), 315-326.
- Bednarek, W., Dresler, S., Tkaczyk, P., Hanaka, A., 2012. Wpływ gnojowicy i NPK na wybrane właściwości sorpcyjne gleby. *J. Elem.*, 17(4), 547–557. doi.org/10.5601/jelem.2012.17.4.01
- Berti A., Marta A.D., Mazzoncini M., Tei F. 2016. An overview on long-term agroecosystem experiments: Present situation and future potential. *Eur. J. Agron.*, 77, 236-241.
- Bhatt M., Singh A.P., Singh V., Kala D.C., Kumar V. 2019. Long-term effect of organic and inorganic fertilizers on soil physico-chemical properties of a silty clay loam soil under rice-wheat cropping system in Tarai region of Uttarakhand. *J. Pharm. Phytoch.*, 8(1), 2113-2118.
- Bilski Z., Pikosz M. 2020. Zasady układania płodozmianu. *CDR Brwinowo, O/Poznań*, 1-35.

- Blecharczyk A., Małecka I. 2000. Response of potato to organic and mineral fertilization in a long-term experiment. *Folia Pomer. Univ. Technol. Stetin., Agricultura*, 211, 84, 41-46.
- Blecharczyk A., Małecka I., Piechota T., Sawińska Z. 2008. Effect of crop sequence and fertilization on field and chemical composition of cv. Sante potato tubers. *Acta Sci. Pol., Agricultura*, 7(3), 13-19.
- Blecharczyk A., Małecka-Jankowiak I., Sawińska Z., Piechota T., Waniorek W. 2018. 60-letnie doświadczenie w Brodach z uprawą roślin w zmianowaniu i monokulturze. *Eksperymenty wieloletnie w badaniach rolniczych w Polsce. Wyd. Nauk. UWM, Olsztyn* 27–40.
- Błaziak J., 2007. Ocena zmian zawartości mikroelementów w zbożach pod wpływem wapnowania i magnezowania gleby. *Annales UMCS, E, Agricultura*, 62 (1), 77-84.
- Brodowska S.M. 2021. Regulacja odczynu gleby to podstawa nawożenia. *Wiad. Rol.* (wzp.pl)
- Brzozowski J., Brzozowska I., Witkowski B. 2005. Wpływ herbicydów i mieszanin herbicydowych na zachwaszczenie i plonowanie pszenicy ozimej. *Zesz. Probl. Post. Nauk Roln.*, 507(1), 55-62.
- Brzozowski J., Brzozowska I. 2016. Zawartość makroelementów w ziarnie pszenżyta jarego w zależności od metody odchwaszczania i poziomu nawożenia azotowego. *Fragm. Agron.*, 33(2), 15-22.
- Buczek J., Jasiewicz Cz. 2000. Występowanie ołowiu, kadmu i cynku w zbożach uprawianych w sąsiedztwie drogi E4 Tarnów-Rzeszów-Przemyśl. *Zesz. Probl. Post. Nauk Roln.*, 471, 865-872.
- Budanov N., Aitbayev T., Buribayeva L., Zhytkibayev A., Yertayeva Z. 2023. Impact of different organic fertilizers on soil available nutrient contents, potato yield, tuber nitrate content. *Eurasian J. Soil Sci.*, 12(3), 215-221. DOI: 10.18393/ejss.1260843
- Cieciura-Olczyk M., Prośba-Białczyk U. 2018. Naturalne i organiczne nawożenie ziemniaka jadalnego. *Ziem. Pol.* 3, 19–24.
- Cieciura-Olczyk M. 2019. Wpływ nawożenia na plonowanie ziemniaka jadalnego. *Fragm. Agron.* 36(3), 1–11.
- Ciećko Z., Wyszowski M., Żołnowski A., Krzywy J. 2000. Modification of the content of some nutrients in potato tubers as the result of NPK and Mg fertilization. *Biul. IHAR*, 213, 125-129.
- Ciesielska J., Malusà E., Sas Paszt L. 2011. Nawozy i środki poprawiające właściwości gleby stosowane w rolnictwie ekologicznym. Komentarz do Załącznika I rozporządzenia Komisji (WE) nr 889/2008 ustanawiającego szczegółowe zasady wdrażania rozporządzenia Rady (WE) nr 834/2007 w sprawie produkcji ekologicznej i znakowania produktów ekologicznych w odniesieniu do produkcji ekologicznej, znakowania i kontroli, 1-31.
- COBORU, 2019a. Lista odmian zalecanych (LOZ) do uprawy na rok 2019 w województwie kujawsko-pomorskim. Załącznik nr 1, 1-3.
- COBORU, 2019b. Lista opisowa odmian roślin rolniczych. Zbożowe – jęczmień, owies pszenica, pszenżyto, żyto, kukurydza, 1-202.
- COBORU, 2020. Lista opisowa odmian roślin rolniczych. Ziemniak, 1-44.
- Curyło T., Jasiewicz C. 1997. Porównanie działania nawozów mineralnych i organiczno-mineralnych na pobieranie oraz toksyczność kadmu i niklu dla roślin.

- Zesz. Probl. Post. Nauk Roln., 448, 45-52.
- Cwojdziański W., Majcherczak E. 1996. Wpływ 20-letniego nawożenia mineralnego i organicznego na wielkość plonu i niektóre właściwości gleby. Zesz. Nauk. AR Szczecin, Roln., 62(172), 77-84.
- Cwojdziański W., Nowak K. 2000a. Wpływ nawożenia na wysokość i jakość plonu roślin w 6. rotacji statycznego doświadczenia nawozowego. Folia Pomer. Univ. Technol. Stetin., Agricultura, (84)211, 63-68.
- Cwojdziański W., Nowak K. 2000b. Wpływ nawożenia na wybrane właściwości gleby w statycznym doświadczeniu nawozowym. Folia Pomer. Univ. Technol. Stetin., Agricultura, 84(211), 69-74.
- Cwojdziański W., Nowak K. 2002. Wybrane właściwości gleby w prowadzonym od 28 lat statycznym doświadczeniu nawozowym. Zesz. Probl. Post. Nauk Roln., 484, 87-94.
- Cwojdziański W., Nowak K., Majcherczak E. 1993. Wpływ nawożenia organicznego i mineralnego na niektóre właściwości gleby w statycznym doświadczeniu nawozowym. Zesz. Nauk. AR Kraków, 278(37), 373-381.
- Cwojdziański W., Spychaj-Fabisiak E. 1996. Wpływ wieloletniego nawożenia mineralnego i mineralno-organicznego na koncentrację rodników paramagnetycznych i wybrane elementy żyzności gleby. Zesz. Nauk. AR Szczecin, Rolnictwo, 62(172), 85-92.
- Czech T., Baran A., Wieczorek J. 2014. Zawartość metali ciężkich w glebach i roślinach z terenu gminy Borzęcin (województwo małopolskie). Inż. Ekol., 37, 89-98. DOI: 10.12912/2081139X.20
- Czczot, H., Majewska, M., 2010. Cadmium - exposure and its effects on health. Farm. Pol., 66(4), 243-250.
- Czuba R. 2000. Mikroelementy we współczesnych systemach nawożenia. Zesz. Probl. Post. Nauk Roln., 471, 161-170.
- Deszczyński J. 2018. Żarłoczny jak... rzepak. Top Agr., 11, 72-74.
- Dąbrowska G., Gos A., Mierek-Adamska A. 2009. Rośliny modyfikowane genetycznie a strategię oczyszczania gleb z metali ciężkich. Post. Biol. Kom., 3(4), 649-662.
- Dębski B., Gralak M., Nowicki T., Bertrandt J., Kłos A. 2016. Zmiany zawartości chromu w częściach naziemnych komosy ryżowej (*Chenopodium quinoa* Willd.) w czasie wegetacji. Probl. Hig. Epid., 1, 91-94.
- Dick C.D., Thompson N.M., Epplin F.M., Arnall D.B. 2016. Managing late-season foliar nitrogen fertilization to increase grain protein for winter wheat. Agron. J., 108(6), 2329-2338. DOI: 10.2134/agronj2016.02.0106
- Dolijanović Ž., Nikolić R.S., Kovacević D., Djurdjić S., Miodragović R., Todorović-Jovanovic M., Djordjević P.J. 2019. Mineral profile of the winter wheat grain: Effects of soil tillage systems and nitrogen fertilization. Appl. Ecol. Environ. Res., 17(5), 11757-11771.
- Domagała K. 2017. Rola i znaczenie materii organicznej dla żyzności gleb. <https://www.sodr.pl/informacje-branzowe/produkcja-roslinna-publikacje>
- Drozd K., 2021. Wapno defekacyjne, czyli tańszy sposób na regulację odczynu gleby. Wiad. Rol., 41-43.
- Dziamba S., Jackowska I. 2001. Wpływ niektórych czynników na skład chemiczny

- ziarna pszenicy jarej. Biul. IHAR, 218-219, 217-122.
- Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej – Rozporządzenie Komisji (WE) Nr 1881/2006 z dnia 19.12.2006 r.
- Fotyma M. 2010. Chemia zażegnała widmo głodu na świecie. *Żyw.-Naw. Chemik* 64(7-8), 499-510.
- Franco-Uría A., López-Mateo C., Roca E., Fernández-Marcos M.L. 2009. Source identification of heavy metals in pastureland by multivariate analysis in NW Spain. *J. Hazard. Mater.*, 165, 1008–1015.
- Frączek K., Ropek D., Bulski K. 2016. Ocena zanieczyszczenia chemicznego i mikrobiologicznego bulw ziemniaka uprawianego w otoczeniu składowiska komunalnego. *Zesz. Probl. Post. Nauk Roln.*, 587, 103-113.
- Gaj R. 2010. Influence of different potassium fertilization level on nutritional status of winter wheat and on yield during critical growth stage. *J. Elem.*, 15(4), 629-637. DOI: 10.5601/jelem.2010.15.4.629-637
- Gajewska M., Krysztoforski M. 2019. Nawozy w rolnictwie ekologicznym. CDR Brwinowo, O/ Radom, 1-24.
- Gambuś F., Rak M., Wieczorek J. 2004. Wpływ niektórych właściwości gleby na fitoprzyzwajalność i rozpuszczalność cynku, miedzi i niklu w glebie. *Zesz. Probl. Post. Nauk Roln.*, 502, 71-79.
- Gąsior J. 1997. Wpływ sposobu uprawy i nawożenia azotem na występowanie objawów chorobowych w różnych terminach selekcji negatywnej na plantacji nasiennej ziemniaków. *Zesz. Nauk. AR Kraków. Roln.*, 34, 71-79.
- Geng Y., Cao G., Wang W., Wang S. 2019. Effects of equal chemical fertilizer substitutions with organic manure on yield, dry matter, and nitrogen uptake of spring maize and soil nitrogen distribution. *Res. Art.* 1-16.
- geoportal.gov.pl, 2022, GeoPortal MAPY.
- Giel-Pietraszuk M., Hybza K., Chełchowska M., Barciszewski J. 2012. Mechanizmy toksyczności ołowiu, *Post. Biol. Kom.* 39(2), 217–248.
- Głodowska M., Gałązka A., 2018. Intensyfikacja rolnictwa a środowisko naturalne. *Zesz. Probl. Post. Nauk Roln.* 592, 3–13.
- Gniewowska E. 2016. Nawożenie ziemniaka przed sadzeniem. Uprawa ziemniaka – nawożenie przed sadzeniem. <https://polifoska.pl/porady/218-nawozenie-ziemniaka-przed-sadzeniem>.
- Gondek K. 2009. The effect of fertilization on the content of mobile forms of selected microelements in soil and their leaching in a pot experiment. *Acta Agroph.* 2009, 13(1), 89-101.
- Gondek K., Gondek A. 2010. Wpływ nawożenia mineralnego na plonowanie i zawartość wybranych makro i mikroelementów w pszenicy jarej. *J. Res. Appl. Agric. Eng.*, 55(1), 30-36.
- Górka A., Kogut A., Krzystyniak A. 2017. Zawartość wybranych metali ciężkich – ołowiu i kadmu w glebach i ich toksyczny wpływ na rozwój roślin. *Analit.* 3, 32–39.
- Górski D., 2020. Co trzeba wiedzieć o fosforze i nawozach fosforowych? *Przed. Rol.*, 1, 13-17.
- Gräber I., Hansen J., Olesen S., Petersen J., Rstergaard H., Krogh L. 2005. Accumulation of copper and zinc in Danish agricultural soils in intensive pig

- production areas. Dan. J. Geog., 105(2), 16-22.
- Grobelak A., Kacprzak M., Fijałkowski K. 2010. Fitoremediacja – niedoceniony potencjał roślin w oczyszczaniu środowiska. J. Ecol. Health, 14, 6.
- Grocholski J., Kulczycki G. 2004. Zawartość mikroelementów w ziarnie i słomie wybranych odmian pszenicy ozimej. Zesz. Probl. Post. Nauk Roln., 215-221
- Gruca-Królikowska S., Waclawek W. 2006. Metale w środowisku. Cz. II. Wpływ metali ciężkich na rośliny. Chemia, Dyd., Ekol., Metr., 11 (1-2), 41-56.
- Jakubowski P. 2015. Plon i skład chemiczny bulw ziemniaka w warunkach zróżnicowanego nawożenia mineralnego i naturalnego. Praca magisterska 6.07.2015 r. WRiB, PBŚ Bydgoszcz.
- Jankowska-Huflejt H. 2006. Comparison of the impact of long-term fertilization with mineral fertilizers and farmyard manure on the state of permanent grassland on mineral soil. Naw. Nawoż. 4(29), 123-134.
- Jankowski K., Budzyński W. 2000. Wpływ uproszczenia uprawy roli i sposobu regulacji zachwaszczenia na plonowanie i koszt produkcji rzepaku ozimego. II. Koszty produkcji nasion. Rośliny Oleiste, 21, 503-511.
- Janowiak J., Murawska B., Spychaj-Fabisiak E. 1997. Zawartość niklu i kadmu w różnych typach gleb użytkowanych rolniczo. Zesz. Probl. Post. Nauk Roln. 448, 261-268.
- Jaskulska I. 2003. Wpływ wieloletniego zróżnicowanego nawożenia na niektóre właściwości chemiczne warstwy ornej i podornej gleby. Fragm. Agron., 1(77), 29-39.
- Jaskulska I., Jaskulski D. 2003. Wpływ wieloletniego nawożenia na kształtowanie właściwości gleby. Post. Nauk Rol., 4, 21-35.
- Jaskulska I., Urbanowski S. 2018. Wieloletnie doświadczenie nawozowe w Mochełku – źródło naukowej wiedzy rolniczej. [red.: Marks M., Jastrzębska M., Kostrzevska M.K. W: Eksperymenty wieloletnie w badaniach rolniczych w Polsce]. Wyd. Nauk. UWM, Olsztyn, 74-95.
- Jaśkiewicz, B. i Jasińska, M. 2019. Zawartość makroelementów w ziarnie pszenżyta ozimego w zależności od wybranych elementów agrotechniki. Pol. J Agron. 37, 16–21. DOI:<https://doi.org/10.26114/pja.iung.379.2019.37.03.9>.
- Johnston A.E., Poulton P.R. 2018. The importance of long-term experiments in agriculture: their management to ensure continued crop production and soil fertility; the Rothamsted experiment. Eur. J. Soil Sci. 69, 113-125.
- Kabata-Pendias A. 2000. Biogeochemia kadmu. Kadm w środowisku - problemy ekologiczne i metodyczne. Zesz. Nauk. Kom. Człowiek i Środ. PAN, 26, 17-24.
- Kalembasa S., Kuziemska B., Kalembasa D., Popek M., 2014. Wpływ wapnowania i dodatku minerałów organicznych na plonowanie oraz zawartość azotu, fosforu i siarki w biomacie kupkówki pospolitej (*Dactylis glomerata* L), uprawianej w warunkach zróżnicowanej zawartości niklu w glebie. Acta Agroph. 21(1), 35-50.
- Kalinowski M., 2018a. Od formy azotu zależy jego dostępność i szybkość działania. Tyg. Por. Roln. 10, 1-2.
- Kalinowski M., 2018b. Azotu w glebie jest pod dostatkiem. Tyg. Por. Roln., 10, 3-5.
- Kawecka W., Rychlik E., Rachtan-Janicka J., Wrońska A. 2013. Obecność kadmu i ołowiu w warzywach i zbożach pochodzących z uprawy konwencjonalnej

- i ekologicznej. *J. Ecol. Health.*, 17(1), 17-21.
- Klaczyński E. 2015. Fosfor w środowisku, jego znaczenie i możliwości odzysku z osadów ściekowych. *ABC Techn.*, 35-41.
- Klikocka H., Szostak B., Gaj R., Głowacka A., Narolski B. 2015. Pobranie fosforu z ziarnem pszenżyta jarego na tle uprawy roli i nawożenia mineralnego oraz właściwości chemicznych gleb. *Pol. J. Agron.*, 21, 3-10.
- Klima K., Lepiarczyk A., Łabza T. 2018. Produkcyjne i środowiskowe aspekty uprawy roślin w systemie konwencjonalnym i ekologicznym w wieloletnim doświadczeniu polowym. [red.: Marks M., Jastrzębska M., Kostrzewska M.K. W: *Eksperymenty wieloletnie w badaniach rolniczych w Polsce*]. Wyd. Nauk. UWM, Olsztyn, 134-157.
- Klug D., Steliga T. 2016. Ocena zmian toksyczności gleby skażonej niklem i substancjami ropopochodnymi w procesach fitoremediacji. *Nafta-Gaz*, 72(4), 1-12.
- Knapowski T., Kozera W., Majcherczak E., Barczak B. 2010. Wpływ nawożenia azotem i cynkiem na skład chemiczny i plon białka ziarna pszenżyta jarego. *Fragm. Agron.* 27(4), 45-55.
- KOBIZE (Krajowy Ośrodek Bilansowania i Zarządzania Emisjami). 2019. Krajowy bilans emisji SO₂, NO_x, CO, NH₃, NMLZO, pyłów, metali ciężkich i TZO za lata 2015 - 2017 w układzie klasyfikacji SNAP. Raport syntetyczny.
- Kocoń A. 2014. Efektywność wapnowania oraz nawożenia gleb lekkich-kwaśnych a plonowanie roślin i wybrane wskaźniki żyzności gleby. *Fragm. Agron.* 31(3), 66-74.
- Kończak B., 2020. Znaczenie materii organicznej w glebie oraz działania agrotechniczne wspomagające jej utrzymanie. CDR w Brwinowie O/Radom.
- Kończak-Konarska B., Kuziak M. 2018. Stan zanieczyszczenia gleb metalami ciężkimi. zgora.pios.gov.pl.
- Kopeć M., Mazur K., Klobusicky K., Ondrasek L. 1997. Wpływ nawożenia na zawartość kadmu w runi łąkowej i glebie w długotrwałym statycznym doświadczeniu nawozowym w Czarnym Potoku. *Zesz. Probl. Post. Nauk Roln.*, 448a, 213-219.
- Kopeć M., Gondek K. 2015. Attempt at an application of neural networks for assessment of the nitrogen content in meadow sward on the basis of long-term fertilizer experiments. *J Elem.*, 20, 1, 127-136 .
- Kopeć M., Gondek K. 2016. Znaczenie długotrwałych doświadczeń i problem upływu czasu w metodach badawczych z obszaru nauk przyrodniczych. *Pol. J Sust. Develop.*, 20, 93-104.
- Korobko V.V., Volkov D.P. 2013. The tolerance of seedlings of some varieties of grain sorghum in various types of salinity. *Izviest. Sarat. Uniw., Ser. Chim. Bioł. Ekoł.* 13(2), 107-112, <https://cyberleninka.ru/article/n/ustoychivost-nekotoryh-sortov-zernovogo-sorgo-kraznokachestvennomu-zasoleniyu>.
- Korzeniowska J., Stanisławska-Głubiak E., Lipiński W. 2019. Opracowanie liczb granicznych niedoboru mikroelementów w glebie oznaczanych przy użyciu ekstrahenta Mehlich 3 dla polskich warunków glebowych. Część I. Pszenica. *Soil Sci. Ann.*, 70(4): 314-323.
- Korzeniowska J., Stanisławska-Głubiak E., Lipiński W. 2020. New limit values

- of micronutrient deficiency in soil determined using 1 M HCl extractant for wheat and rapeseed. *Soil Sci. Ann.*, 71(3), 205-214.
- Korzeniowska J., Stanisławska-Głubiak E., Jadczyzsyn T. 2021. Nowy system nawożenia mikroelementami. *St. Rap. IUNG -PIB*, 65(19), 87-98.
- Kot A., Zaremba S., Wyszogrodzka-Koma L. 2009. Ocena skażenia ołowiem zbóż, przetworów zbożowych i ziemniaków z regionu lubelskiego. *Żywn. Nauka Tech. Jak.*, 4(65), 86-91.
- Kowieska A., Jaskowska I., Lipiński P., 2010. Zawartość frakcji węglowodanowych i aminokwasowych w ziarnie pszenicy wyprodukowanym w dwóch następujących po sobie latach, *Acta Sci. Pol., Zootechnica*, 9 (4), 135–146.
- Kozera W., Nowak K., Majcherczak E. Barczak B. 2006. Oddziaływanie dolistnego nawożenia mikroelementami na zawartość makroelementów w bulwach ziemniaka. *J. Elem.*, 11(1), 29-34.
- Kozłowska-Strawska J. 2007. Wpływ nawożenia roślin różnymi związkami siarki na zmiany odczynu gleby. *Zesz. Probl. Post. Nauk Roln.*, 520(2), 635-639.
- Krysztoforski M. 2019. Wapnowanie podstawą żyzności gleb w gospodarstwie ekologicznym. *CDR Brwinowo, O/Radom*.
- Krzywy E., Iżewska A. 2007. Impact of manure and organic fertilizers on the quantity and content yield of heavy metals in spring rape. *Pol. J Chem. Techn.*, 9(3), 60-63.
- Kucharzewski A., Dębowski M., 2000. Odczyn i zawartość mikroelementów w glebach Polski. *Zesz. Probl. Post. Nauk Roln.*, 471, 627-635.
- Kucharzewski A., Nowak L., Dmowski Z., Markowska J. 2002. Zawartość metali ciężkich i siarki w ziemniakach na Dolnym Śląsku. *Zesz. Probl. Post. Nauk Roln.*, 489, 491-497.
- Kukwa A.M., 2016. Cenne resztki poźniwne. *Wiś Maz.* 23, MODR W-wa, 7-8.
- Kulczycki G., Grocholski J. 2004. Zawartość mikroelementów w ziarnie i słomie wybranych odmian pszenicy ozimej. *Zesz. Probl. Post. Nauk Roln.*, 502, 215-221.
- Kuś J. 2015. Glebowa materia organiczna – znaczenie, zawartość i bilansowanie. *St. Rap. IUNG-PIB*, 45(19), 27-53.
- Kuś J., Jończyk K. 2018. Produkcyjne i środowiskowe skutki stosowania różnych systemów gospodarowania w Osinach. [red.: Marks M., Jastrzębska M., Kostrzewska M.K. W: *Eksperymenty wieloletnie w badaniach rolniczych w Polsce*]. Wyd. Nauk. UWM, Olsztyn, 133-157.
- Kutrowska A., Piechalak A., Małecka A., Ciszewska L., Hané A., Sitko K., Małkowski E., Barańkiewicz D., Tomaszewska B. 2016. Endophytic rhizobacteria and companion planting influence on efficiency of assisted phytoextraction. *Proceedings of the 18th International Conference on Heavy Metals in the Environment*, 12-15.09.2016, Ghent, Belgium.
- Kuziemska B., Pakuła K., Pieniak-Lendzion K., Becher M. 2017. Metale ciężkie w glebach położonych wzdłuż szlaków komunikacyjnych. *Zesz. Nauk. UPH w Siedlcach, Ser. Administracja i Zarządzanie*, 112(39), 98–107.
- Laamrani A., Voroney P.R., Berg A.A, Gillespie A.W., March M., Deen B., Martin R.C. 2020. Temporal change of soil carbon on a long-term experimental site with variable crop rotations and tillage systems. *Agronomy*, 10, 1-13.
- Lasoń-Rydel M., Sieczyńska K., Gendaszewska D. 2019. Oznaczenie zawartości metali ciężkich w preparatach kolagenowych przeznaczonych do otoczkowania nasion

- rzepaku. *Tech. Jak. Wyr.*, 64, 24-33.
- Lenart S., Radecki A., Ciesielska A., Perzanowska A. 2018. Wpływ wieloletniego siewu bezpośredniego na właściwości gleby, zachwaszczenie i plonowanie roślin. [red.: Marks M., Jastrzębska M., Kostrzewska M.K. W: *Eksperymenty wieloletnie w badaniach rolniczych w Polsce*]. Wyd. Nauk. UWM, Olsztyn, 156-177.
- Leszczyński W. 2000. The quality of table potato. *Żyw. Nauka Tech. Jak.* 4(25), 5-27.
- Leszczyński W., 2012. Żywnościowa wartość ziemniaka i przetworów ziemniaczanych. *Biul. IHAR*, 266, 6-20.
- Leśniewska B.A. 2019. Metody badania specjacji chromu w wodach i glebie z wykorzystaniem sorbentów selektywnie rozpoznających jony Cr(III) oraz technik łączonych. Autoreferat do wniosku o nadanie stopnia naukowego doktora habilitowanego. Inst. Chemii, WBCh Uniwersytet w Białymstoku.
- Lipiński W. 2013. Ocena zasobności gleb Polski w mikroelementy. *Zesz. Nauk. UP Wrocław, Rol.*, 621, 49-58.
- Lipiński W., Bednarek W. 1997. Występowanie kadmu i niklu w glebach o różnym składzie granulometrycznym. *Zesz. Probl. Post. Nauk Roln.*, 448a, 231-235.
- Lista odmian zalecanych (LOZ) do uprawy na rok 2019 w województwie kujawsko-pomorskim, www.kpodr.pl/wp-content/uploads/2019/02
- Lista Opisowa Odmian Roślin Rolniczych, 2020. Ziemniak. Słupia Wielka.
- Liu Y., Yan Ch., Mei X., He W., Bing S.H., Ding L., Liu S., Fan T. 2010. Long-term effect of chemical fertilizer, straw, and manure on soil chemical and biological properties in northwest China. *Geoderma*, 158(3-4), 173-180. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.04.029>
- Liu Y., Lv Z., Hou H., Lan X., Ji J., Liu X. 2021. Long-term effects of combination of organic and inorganic fertilizer on soil properties and microorganisms in a Quaternary Red Clay. *PLoS ONE* 16(12), e0261387. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0261387>
- Łabętowicz J. 2020. Doświadczalnictwo rolnicze w Europie od XVII do XIX wieku. [red. Łabętowicz J., Radecki A., W: 100 lat doświadczalnictwa rolniczego na Wydziale Rolnictwa i Biologii SGGW]. Wyd. SGGW, Warszawa, 17-30.
- Łabętowicz J., Niedziński T. 2020. Znaczenie długotrwałych doświadczeń polowych dla nauki i praktyki rolniczej. [red. Łabętowicz J., Radecki A., W: 100 lat doświadczalnictwa rolniczego na Wydziale Rolnictwa i Biologii SGGW]. Wyd. SGGW, Warszawa, 281-293.
- Łabętowicz J., Rutkowska B. 2001. Czynniki kształtujące stężenie fosforu w roztworze glebowym gleb rolniczych Polski. *Pr. Nauk. AE Wrocław*, 888, 151-159
- Łabętowicz J., Szymańska M., Stępień W. 2010. Przydatność gipsu do poprawy właściwości fizykochemicznych gleb lekkich. *Roczn. Glebozn.* 61(4), 1-5.
- Ławcewicz J. 2017. Wpływ metali ciężkich na organizm człowieka. *Natur. Prakt.*, 2, 8.
- Maciołek H., Zielińska A., Domarecki T. 2013. The geobiological-chemical effect of cadmium and lead on the natural environment. *J. Ecol. Health.*, 17(2), 63-71.
- Majchrowska-Safaryan A. 2015. Effect of spent mushroom substrate application on nickel content in humus horizon of luvisols under agricultural use. *Acta Agroph.* 4, 397-407.
- Majchrowska-Safaryan A., Pakuła K., Becher M. 2020. The influence of spent

- mushroom substrate fertilization on the selected properties of arable soil. *Environ. Prot. Nat. Res.*, 31, 4(86): 28-34.
- Malinowska, E. 2017. The effect of liming and sewage sludge application on heavy metal speciation in soil. *Bull Environ. Contam. Toxicol.*, 98(1), 105–112.
- Maltas A., Kebli H., Oberholzer H.R., Weisskopf P., Sinaj S. 2018. The effects of organic and mineral fertilizers on carbon sequestration, soil properties, and crop yields from a long-term field experiment under a Swiss conventional farming system. *Land Degr. Develop.*, 29(4), 926–938. <https://doi.org/10.1002/ldr.2913>
- Małecka-Jankowiak I., Sawinska Z., Piechota T., Waniorek W. 2018. 60-letnie doświadczenie nawozowe w Brodach z uprawą roślin w zmianowaniu i monokulturze. [red.: Marks M., Jastrzębska M., Kostrzewska M.K. W: Eksperymenty wieloletnie w badaniach rolniczych w Polsce]. Wyd. Nauk. UWM, Olsztyn, 11-27.
- Marks N. 2009. Zawartość azotanów, azotynów i metali ciężkich w bulwach ziemniaka w zależności od długości okresu przechowywania. *Inż. Rol.* 1(110), 183-187.
- Marks M., Rychcik B., Treder K., Tyburski J. 2018. 50-letnie badania nad uprawą roślin w płodozmianie i monokulturze – źródło wiedzy i pomnik kultury rolnej. [red.: Marks M., Jastrzębska M., Kostrzewska M.K. W: Eksperymenty wieloletnie w badaniach rolniczych w Polsce]. Wyd. Nauk. UWM, Olsztyn, 41–56.
- Maziarek A. 2015. Gleba jako środowisko odżywcze roślin. *OODR*, 1-59.
- Mazur Z., Mazur T. 2016. The influence of long-term fertilization with slurry, manure and NPK on the soil content of trace elements. *J. Elem.*, 21(1), 131-139. DOI: 10.5601/jelem.2015.20.3.517
- Mendra M., Ducka M. 2013. Wpływ zróżnicowanego nawożenia i uwilgotnienia na zawartość fosforu w glebie i runi łąki trwałej łąkowej. *Woda Środ. Obsz. Wiej.*, 13, 3(43), 105–114.
- Mercik S., Stępień M., Pietrzak S. 2004. Przydatność obornika do regeneracji gleb bardzo kwaśnych, ubogich w próchnicę oraz wyczerpanych ze składników pokarmowych. *Zesz. Probl. Post. Nauk Roln.*, 499, 253-260.
- Mercik S., Stępień W. 2006. Crop yields and selected soil properties on manured and not manured fields at the period of many years. *Naw. Nawoż.* 4, 141-149.
- Mierek-Adamska A., Dąbrowska G., Goc A. 2009. Rośliny modyfikowane genetycznie a strategię oczyszczania gleb z metali ciężkich. *Post. Biol. Kom.*, 36 (4), 649-662.
- Molas J., Baran S. 2004. Relationship between the chemical form of nickel applied to the soil and its uptake and toxicity to barley plants (*Hordeum vulgare* L.). *Geoderma*, 122, 2-4, 247-255.
- Murawska B., Kondratowicz-Maciejewska K., Spychaj-Fabisiak E., Różański Sz., Knapowski T., Rutkowska B. 2017. The impact of long-term application of inorganic nitrogen fertilizers and manure on changes of selected properties of organic matter in sandy loam soil. *JCEA* 18(3), 542-553.
- Murawska B., Lipińska K., Mitura K., Piekut A., Jachymska J. 2015. Mobilność cynku i miedzi w glebie lekkiej w zależności od stosowania wieloletniego nawożenia azotem i potasem. *Infr. Ekol. Ter. Wiej. PAN, O/Kraków*, 3, 677–689.
- Nagiel A., Szulc W. 2020. Effect of liming on cadmium immobilisation in the soil and content in spring wheat (*Triticum aestivum* L.). *Soil Sci. Ann.* 71(1), 93–96.

- <https://doi.org/10.37501/soilsa/121498>
- Nasalski, Z., Rychlik, B., Sadowski, T. 2008. Efficiency of change of plants cultivation from conventional to ecological agriculture system. *Acta Sci. Pol., Oeconomia*, 7(3), 67-79. <https://js.wne.sggw.pl/index.php/ aspe/article/view/3788>
- Nazarkiewicz M., Kaniuczak, J. 2012. Wpływ wapnowania i nawożenia mineralnego na zawartość przyswajalnych form fosforu, potasu i magnezu w glebie pólowej. *Rocz. Glebozn.*, 63(1), 1-6.
- Nowak K., Majcherczak E., 2002. Skład aminokwasowy białka plonu roślin uprawianych w 4-letnim cyklu zmianowania w zależności od nawożenia i wapnowania. *Zesz. Probl. Post. Nauk Roln.*, 484, 441-449.
- Nyiraneza J., Snapp S. 2007. Integrated management of inorganic and organic nitrogen and efficiency in potato systems. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 71, 1508-1515.
- Ochal P., 2015. Aktualny stan i zmiany żyzności gleb w Polsce. *St. Rap. IUNG-PIB*. 45(19), 9-25.
- Ochal P., 2019. Wpływ odczynu gleby na przyswajalność składników pokarmowych. nawozy.eu.
- Ochal P., Smreczak B., 2020. Zakwaszenie gleby i aktualne zagadnienia wapnowania. *St. Rap. IUNG-PIB Puławy*, 63(17), 9-19.
- Ochocka K. 2021. Metal kontra organizm - jak nikiel może skomplikować życie? silniwchorobie.pl/356/metal-kontra-organizm-jak-nikiel-moze-skomplikowac-zycie.
- Ociepa E., Pachura P., Ociepa-Kubicka A. 2014. Wpływ niekonwencjonalnego nawożenia na migrację metali ciężkich w układzie gleba-roślina. *Inż. Ochr. Środ.*, 17(2), 325-338.
- Ociepa A., Pruszek K., Lach J., Ociepa E. 2008. Influence of long-term cultivation with manure and sludge on the increase of heavy metals content in soils. *Ecol. Chem. Eng. S.*, 15(1), 103-109.
- Ociepa E. 2011. Wpływ nawożenia na zmianę rozpuszczalności cynku i niklu w glebie oraz pobieranie tych metali przez kukurydzę i ślazowiec pensylwański. *Inż. Ochr. Środ.*, 14(1), 41-48.
- Paczyńska D., 2012. Jęczmień jary. *MODR Karniowice*, 1-28.
- Paluszek I. 2013. Wpływ przydatności rolniczej gleb pólowych wytworzonych z glin zwałowych na ich strukturę agregatową. *Acta Agroph.* 20(3), 437-449.
- Petrosyan K., Ślusarczyk J. 2019. Antropogeniczne zmiany środowiska naturalnego a rolnictwo. [Chwil M., Skoczylas M.M. (red.), W: Współczesne badania nad stanem środowiska i leczniczym wykorzystaniem roślin]. Wyd. UP Lublin, 9-16.
- Pietrzak S., Nawalny P. 2008. Pierwotne i wtórne pokrywy lessowe – warunki powstawania, występowanie i znaczenie gospodarcze. *Woda Środ. Obsz. Wiej.*, 8, 2B (24), 117-126.
- Pikuła D. 2014. Racjonalne gospodarowanie nawozami naturalnymi i organicznymi. *Studia i raporty IUNG-PIB Puławy*, 37(11), 57-68.
- Pikuła D. 2015. Environmental aspects of managing the organic matter in agriculture. *Econ. Reg. Stud.* 8(2), 98-112.
- Pikuła D. 2018. Wykorzystanie właściwości spektralnych kwasów huminowych do oceny właściwości próchnicy. *St. Rap. IUNG-PIB Puławy*, 56(10), 99-109.
- Pikuła D. 2019. Praktyki zapobiegające stratom węgla organicznego z gleby. *St. Rap.*

- IUNG-PIB Puławy, 59(13), 77-91.
- Pikuła D. 2021. Wskaźniki oceny materii organicznej i możliwości wykorzystania ich w praktyce rolniczej. St. Rap. IUNG-PIB Puławy, 65(19), 63-76.
- Pikuła D., Rutkowska A. 2020. Selected chemical properties of sandy soil after 36 years of differential fertilization with mineral nitrogen and manure without liming in two crop rotation. *Soil Sci. Ann.* 71(3), 246–251.
- Płaza A. 2004. Skład chemiczny bulw ziemniaka jadalnego w warunkach zróżnicowanego nawożenia organicznego. *Annales UMCS, E*, 59(3), 1327-1334.
- Podlaski S. Łabętowicz J. 2020. Najstarsze rolnicze stacje doświadczalne. [W: 100 lat doświadczalnictwa rolniczego na Wydziale Rolnictwa i Biologii SGGW]. Wyd. SGGW, Warszawa, 31-53.
- Podleśna A. 2015. Wpływ nawozów siarkowych na odczyn i zasobność gleb w składniki pokarmowe. *Studia i Raporty IUNG-PIB Puławy*, 45(19), 97-112. DOI: 10.26114/sir.iung.2015.45.06
- Podleśna A., Podleśny J., Klikocka H. 2017. Wpływ nawożenia siarką i azotem na azotowo-fosforową gospodarkę kukurydzy. *Przem. Chem.*, 1(6), 188-191.
- PTG 2019. Systematyka gleb Polski.
- Puła J., Łabza T. 2004. Wpływ nawożenia organicznego na zawartość składników mineralnych w warstwie ornej gleby lekkiej. *Annales UMCS, E*, 59(3), 1505-1511.
- Pyryt B., Kolenda H. 2006. The effect of a potato cultivar and cooking methods on the content of cadmium and lead in tubers after cooking. *Żywn. Nauka Tech. Jak.*, 13, 1(46), 114-120.
- Rabikowska B. 2000. Zawartość i pobranie miedzi, manganu i cynku przez jęczmień jary uprawiany w warunkach wieloletniego zróżnicowanego nawożenia obornikiem i azotem. Cz. I. Zawartość Cu, Mn i Zn w ziarnie i w słomie. *Zesz. Probl. Post. Nauk Roln.* 471, 463-471.
- Rabikowska B., Piszcz U. 2005. Oddziaływanie nawożenia obornikiem i azotem na bilans potasu w doświadczeniu wieloletnim. *Fragm. Agron.*, 22, 1(85), 225-237.
- Rabikowska B., Piszcz U. 2004. Wpływ zróżnicowanego nawożenia azotem na wykorzystanie miedzi, manganu i cynku z obornika w czteroletnim zmianowaniu. *Zesz. Probl. Post. Nauk Roln.*, 502, 267-275, 287-296.
- Rocznik Statystyczny Rolnictwa 2023. (red. Rozkrut D.). Główny Urząd Statystyczny, Zak. Wyd. Stat. w W-wie. file:///C:/Users/PChR%20-%20knap/Downloads/rocznik_statystyczny_rolnictwa_2023_2_2.pdf
- Rogóż A. 2009. Zawartość pierwiastków śladowych w glebach i wybranych roślinach okopowych. Część II. Zawartość manganu i żelaza. *Zesz. Probl. Post. Nauk Roln.* 541, 2, 365-373.
- Rosada J., Przewocka M. 2016. Zawartość miedzi, ołowiu i kadmu w glebach i roślinach uprawianych w pobliżu huty miedzi „Głogów”. *Zesz. Nauk. UZ* 163, Inż. Środ. 43, 107-118.
- Rozporządzenie Komisji (UE) NR 488/2014 z 12.05.2014 r. zmieniające rozporządzenie (WE) nr 1881/2006 w odniesieniu do najwyższych dopuszczalnych poziomów kadmu w środkach spożywczych.
- Rozporządzenie Ministra Środowiska w sprawie standardów jakości gleby i standardów jakości ziemi z 9.09.2002 r. (Dz. U. z 4.10.2002 r., Dz.U.02.165.1359).

- Rozporządzenie Rady Ministrów z 5.06.2018 r. w sprawie przyjęcia Programu działań mających na celu zmniejszenie zanieczyszczenia wód azotanami pochodzącymi ze źródeł rolniczych oraz zapobieganie dalszemu zanieczyszczeniu.
- Rudzińska-Mękal B., Mikos-Bielak M. 2001. Magnesium content in potato tubers following the application of synthetic growth regulators. *Biul. Magn.* 6(1), 59-65.
- Rusnak J. 2017. Jak poprawić żyzność gleby? MODR Karniowice, 1-44.
- Rutkowska B., Murawska B., Spychaj-Fabisiak E., Różański Sz., Szulc W., Piekut A. 2015. Evaluation of the mercury content of loamy sand soil after long-term nitrogen and potassium fertilization. *Plant Soil Environ.* 61, 12, 537-543.
- Rutkowska B., Szulc W., Łabętowicz J. 2009. Influence of soil fertilization on concentration of microelements in soil solutions of sandy soil. *J. Elem.*, 14(2), 349-355.
- Rytel E. 2010. Chosen pro- and anti- nutritional substances in potatoes and changes in their content during potato processing for food products. *Zesz. Probl. Post. Nauk Roln.* 557, 43-61.
- Ryżak M., Bartmiński P., Bieganski A. 2009. Metody wyznaczania rozkładu granulometrycznego gleb mineralnych. *Acta Agroph.*, 175, 1-97.
- Sady W., Smoleń S. 2004. Wpływ czynników glebowo-nawozowych na akumulację metali ciężkich w roślinach, 269-277, X Ogóln. Symp. Nauk. Efektywność stosowania nawozów w uprawach ogrodnich. Kraków, 17-18.06.2004.
- Sapek B., 2014. Nagromadzenie i uwalnianie fosforu w glebach – źródła, procesy, przyczyny. *Woda Środ. Obsz. Wiej.* 14, 1(45), 77-100.
- Sawicka B., Skiba D., Pszczółkowski P., Krochmal-Marczak B. 2022. Jerusalem Crischoke Food Science and Technology: *Helianthus tuberosus*, 7, 5, 45-90.
- Sądej W., Przekwas K., Bartoszewicz J. 2004. Zmienność plonu i składu chemicznego bulw ziemniaka w warunkach zróżnicowanego wieloletniego nawożenia. *Ann. UMCS, Sec. E, Agric.* 59(1), 83-92.
- Serpil S. 2012. Investigation of effect of chemical fertilizers on environment. ICESD (Intern. Conf. on Environmental Science and Development) Hong Kong, 287–292.
- Simon T. 2008. The influence of long-term organic and mineral fertilization on soil organic matter. *Soil & Water Res.*, 3(2), 41–51.
- Sisay A., Sisay T. 2019. The principal role of organic fertilizer on soil properties and agricultural productivity - a review. *Agr. Res. Tech.*, 22(2), 556192. DOI: 10.19080/ARTOAJ.2019.22.556192
- Skwierawska M., Zawartka L., Zawadzki B. 2008. The effect of different rates and forms of sulphur applied on changes of soil agrochemical properties. *Plant Soil Environ.*, 54(4), 171-177.
- Stępień W., Kobińska M. 2019. Effect of long-term organic and mineral fertilisation on selected physico-chemical soil properties in rye monoculture and five-year crop rotation. *Soil Sci. Ann.*, 70(1), 34-38.
- Stępień W., Mercik S., Kostusiak A. 2020. Stacja Doświadczalna Wydziału Rolnictwa i Biologii (obecnie Instytutu Rolnictwa) w Skierniewicach im. Profesora Mariana Górskiego. [red. Łabętowicz J., Radecki A., W: 100 lat doświadczalnictwa rolniczego na Wydziale Rolnictwa i Biologii SGGW]. Wyd. SGGW, Warszawa, 197-220.

- Stępień W., Sosulski T., Szara E. 2018. Współdziałanie nawożenia mineralnego i organicznego w świetle trwałych doświadczeń nawozowych. [red.: Marks M., Jastrzębska M., Kostrzewska M.K. W: Eksperymenty wieloletnie w badaniach rolniczych w Polsce]. Wyd. Nauk. UWM, Olsztyn, 11-26.
- Sulek A., Leszczyńska D. 2016. Nawożenie zbóż jarych w warunkach zmieniającego się klimatu. St. Rap. IUNG-PIB Puławy, 50(4), 53-64.
- Suwara I., Gawrońska-Kulesza A. 2005. Wpływ systemów nawożenia na kształtowanie się wybranych właściwości gleby lekkiej. *Fragm. Agron.*, 22, 1(85), 290-297.
- Suwara I., Lenart S., Gawrońska-Kulesza A., Wymułek A. 2018. Produkcyjne i środowiskowe efekty wieloletniego nawożenia organicznego i mineralnego w dwóch zmianowaniach. [red.: Marks M., Jastrzębska M., Kostrzewska M.K. W: Eksperymenty wieloletnie w badaniach rolniczych w Polsce]. Wyd. Nauk. UWM, Olsztyn, 57-71.
- Systematyka gleb Polski. 2019. Polskie Towarzystwo Gleboznawcze, Komisja Genezy Klasyfikacji i Kartografii Gleb. Wyd. UP Wrocław, PTG, Wrocław–Warszawa.
- Szczepaniak W., 2022. Wpływ odczynu gleby na życie roślin. KPODR Minikowo, 1-98.
- Szulc W., Rutkowska B., Bomze K., Felak E. 2007. The influence of long-term differentiated crop rotation and fertilization on content of microelements in soil. *Fragm. Agron.*, 24(93), 248-253.
- Szymoniak A. 2016. Poziom pierwiastków śladowych w wybranych warzywach. *Eduk. Biol. Środ.* 3, 48-53.
- Terzić D., Popović V.M., Malić N., Ikanović J., Rajčić V., Popović S., Lončar M., Lončarević V. 2019. Effects of long-term fertilization on yield of siderates and organic matter content of soil in the process of recultivation. *J. Anim. Plant Sci.*, 29(3), 790-795.
- Thomas C.L., Acquah G., Whitmore A.P., McGrath S.P., Haefele S.M. 2019. The effect of different organic fertilizers on yield and soil and crop nutrient concentrations. *Agronomy*, 9(12), 776, 1-16.
- Trawczyński C., Prokop W. 2017. Wpływ nawozów wieloskładnikowych z dodatkiem alg morskich na plon i jakość bulw ziemniaka. *Fragm. Agron.*, 34(3), 109–118.
- Triberti L., Nastri A., Baldoni G. 2016. Long-term effects of crop rotation, manure and mineral fertilisation on carbon sequestration and soil fertility. *Eur. J Agr.*, 74, 47-55.
- Ukalska-Jaruga A., Smreczak B., Klimkowicz-Pawlas A., Maliszewska-Kordybach B. 2015. Rola materii organicznej w procesach akumulacji trwałych zanieczyszczeń organicznych (TZO) w glebach. *Pol. J Agron.*, 20, 15–23.
- Urbanowski S. 1999. Wpływ wieloletniego nawożenia na cechy jakościowe płodów rolnych. *Zesz. Probl. Post. Nauk Roln.*, 465, 103-112.
- Viet H.Q., 2023. Influence of 96 years of mineral and organic fertilization on selected soil properties: a case study from long-term field experiments in Skierniewice, central Poland. *Soil Sci. Ann.*, 74(1), 161945, 1-11. doi.org/10.37501/soilsa/161945
- Wach D., 2020. Potas w glebie i roślinie – aktualny stan wiedzy. *Studia i Raporty IUNG-PIB Puławy*, 63(17), 67-84.
- Wachowski A. 2018. Obornik – stosowanie jest sztuką. *Agro Profil*. <https://agropofil.pl/wiadomosci/uprawa/obornik-stosowanie-jest-sztuka/>.

- Wacławowicz R. 2008. Zmiany w siedlisku glebowym wywołane następczym wpływem nawożenia organicznego i azotowego. *Probl. Inż. Roln.* 2, 69-79.
- Wesołowski P. 2003. Wpływ terminów stosowania obornika i nawozów mineralnych na produktywność łąki oraz niektóre właściwości wód gruntowych. *Zesz. Probl. Post. Nauk Roln.*, 494, 517-523.
- Wiater J., Łukomski A. 2003. Wpływ współdziałania osadów z mleczarni z nawozami mineralnymi na plonowanie rzepaku i jego skład chemiczny. *Zesz. Probl. Post. Nauk Roln.*, 494, 533-540.
- Wiechuła D., Loska K., Jonderko W. 2012. Ocena zanieczyszczenia niklem pokrzywy zwyczajnej (*Urtica Dioica* L.) z terenu województwa śląskiego. *Bromat. Chem. Toksykol.*, 45, 1, 20-25.
- Wieczorek J., Baran A. 2013. Assessment of possible zinc accumulation in soils in the zone of possible zinc accumulation in soils in the zone of potential zinc-works influence. *Ecol. Chem. Eng. A*, 20(1), 109-115.
- Wierzbička A. 2013. Zawartość wybranych składników mineralnych w ziemniakach ekologicznych a wartość żywieniowa. *Ziem. Pol.*, 2, 24-28.
- Wierzbička A., Trawczyński C. 2011. Czynniki wpływające na pobranie i wykorzystanie azotu przez jadalne i skrobiowe odmiany ziemniaka. *Biul. IHAR*, 259, 203-210.
- Wierzbowska J. 2006. Gospodarka wapniem i magnezem w roślinach pszenicy jarej w warunkach stosowania regulatorów wzrostu i zróżnicowanych dawek potasu. *J. Elem.*, 11(1), 109-118.
- Wikarek-Paluch E., Rosik-Dulewska C. 2020. Biodostępność wybranych zanieczyszczeń w gruntach zdegradowanych chemicznie. *Inst. Pod. Inż. Środ. PAN*, 1-187.
- Wilczewski E., Szczepanek M., Piotrowska-Długosz A., Wenda-Piesik A. 2013. Effect of nitrogen rate and stubble catch crops on concentration of macroelements in spring wheat grain. *J. Elem.*, 18(3), 481-494. DOI: 10.5601/jelem.2013.18.3.12
- Wiśniowska-Kielian B., Klima K. 2010. Estimate of available phosphorus and potassium forms content in the winter wheat soils from organic and conventional farms on the background their selected properties. *Ecol. Chem. Eng., A*, 17(4-5), 509-518.
- Właśniewski S., Nazarkiewicz M., Hajduk E., Marchel M., Kaniuczak J. 2019. Nickel content in grain of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) and spring barley (*Hordeum vulgare* L.) cultivated on loessial soil, depending on liming and mineral fertilization. *J. Elem.*, 24(1), 257-266. DOI: 10.5601/jelem.2018.23.2.1653
- Wojciechowska-Mazurek M., Starska K., Brulińska-Ostrowska E., Plewa M., Biernat U., Karłowski K.L., 2008. Monitoring zanieczyszczenia żywności pierwiastkami szkodliwymi dla zdrowia. Cz. I. Produkty zbożowe pszenne, warzywne, cukiernicze oraz produkty dla niemowląt i dzieci (rok 2004). *Rocz. PZH*, 59(3), 251-266.
- Wojtkowiak K., Stępień A., Warechowska M., Konopka I., Klasa A. 2014. Effect of fertilisation technique on some indices of nutritional value of spring triticale grain. *J. Elem.*, 19(1), 229-242. DOI: 10.5601/jelem.2014.19.1.590
- Wróblewska- Borek M. 2015. Metale ciężkie w glebie: jak sobie z nimi radzić? <http://www.agrofakt.pl>
- Wszelaczyńska E., Pobereżny J., Janowiak J., Spychaj-Fabisiak E. 2014. Effect

- of organic and nitrogen fertilization on selected components in potato tubers grown in a simplified crop rotation. *J. Elem.*, 19(4), 1153-1166.
- Yobouet Y.A., Adouby K., Trokourey A., Yao B. 2010. Cadmium, copper, lead and zinc speciation in contaminated soils. *Int. J. Eng. Sci. Tech.*, 2(5), 802-812
- Zboińska M., 2018. W jaki sposób rośliny pobierają i asymilują azot? Ed. *Biol. Środ.*, 2, 19-31.
- Zbroszczyk T., Nowak W. 2009. Wpływ poziomu ochrony i nawożenia azotem na plonowanie i skład chemiczny ziarna kilku odmian jęczmienia jarego pastewnego. Część I. Plonowanie. *Biul. IHAR*, 251, 137-144.
- Zimny L., Waclawowicz R., 2007. Zmiany właściwości fizycznych gleby w uprawie buraka cukrowego pod wpływem zagęszczania roli oraz zróżnicowanego nawożenia organicznego. *Zesz. Nauk. UP Wrocław, Inż. Rol.* 552(6), 55–64.
- Żukowska G., Myszura M., Baran S., Wesółowska S., Pawłowska M., Dobrowolski Ł., 2016. Rolnictwo a łagodzenie zmian klimatu. *Probl. Ekorozw./Probl. Sustain. Develop.*, 11 (2), 67–74.
- Żurek G., Prokopiuk K. 2011. Zawartości ołowiu, kadmu i chromu w glebach rolniczych przyległych do autostrady A2. *Biul. IHAR*, 262, 175–181. DOI: 10.37317/biul-2011-0015.

STRESZCZENIE

Ocena zawartości pierwiastków w wieloletnim doświadczeniu statycznym w układzie gleba – roślina

Mgr inż. Małgorzata Moskal

Słowa kluczowe: wieloletnie doświadczenie statyczne, obornik, nawożenie mineralne, skład chemiczny gleby, skład chemiczny roślin

Wieloletnie doświadczenia polowe (long-term field experiments) są eksperymentami statycznymi, w których w sposób trwały przez więcej niż 20 lat stosuje się te same obiekty badawcze. Pozwalają one na określenie transformacji fizycznych, fizykochemicznych czy też biologicznych gleby w długim okresie czasu. Zmiany te mogą weryfikować żyzność i produktywność rolniczą gleby, które są z kolei determinowane zróżnicowanymi warunkami pogodowymi, glebowymi lub uprawowymi.

Wieloletnie statyczne doświadczenia nawozowe stanowią cenne źródło wiedzy rolniczej i są punktem wyjścia do wnioskowania na temat zmian zachodzących w układzie gleba-roślina. Dzięki nim możliwym stało się określenie wieloletnich zmian właściwości fizykochemicznych gleby decydujących o jej żyzności pod wpływem czynników naturalnych i antropogenicznych. Dają też pełen obraz oddziaływania wielu sposobów nawożenia na poziom plonowania i jakości uprawianych gatunków roślin, a w konsekwencji bezpieczeństwa surowca dla przemysłu rolno-spożywczego i wyprodukowanej żywności. Informacje te są niezbędne by wprowadzić zasady zrównoważonego rolnictwa. Aktualnie na świecie prowadzonych jest ponad 600 wieloletnich doświadczeń nawozowych. Najbardziej znane i zarazem najstarsze jest wieloletnie doświadczenie prowadzone od 1843 roku w Anglii w Stacji Doświadczalnej Rothamsted, w której oceniano wpływ nawozów naturalnych i mineralnych na plonowanie uprawianych roślin. Zarchiwizowane próbki można nawet współcześnie przebadać na zawartość wielu innych składników, których oznaczenie nie było kiedyś możliwe z uwagi na brak odpowiedniego sprzętu i wiedzy, co do ich roli i ewentualnej szkodliwości. Natomiast w Polsce najstarszym tego typu doświadczeniem, prowadzonym od 1923 roku, jest to zlokalizowane w Stacji Doświadczalnej w Skierniewicach. Długotrwałym doświadczeniem nawozowym, którego nie można pominąć było prowadzone w Stacji Badawczej Politechniki Bydgoskiej w Mochelku, założone w 1948 roku. Jednym z badanych czynników był sposób rekultywacji, drugim natomiast dawki nawożenia (NPK, naturalne – obornik).

Kluczowym zabiegiem agrotechnicznym jest nawożenie. Intensywna uprawa roślin w połączeniu z uproszczonym zmianowaniem, a co za tym idzie przewagą zbóż w warunkach gleb lekkich powoduje obniżenie zawartości próchnicy, która ma istotne znaczenie w utrzymaniu jej żyzności, struktury

i wilgotności. Bardzo wartościowym źródłem materii organicznej są nawozy naturalne, spośród których najcenniejszym jest obornik. Zasady aplikacji, zarówno nawozów mineralnych jak i naturalnych oraz organicznych, są szczegółowo opisane w ustawie o nawozach i nawożeniu z dnia 10 lipca 2007 roku. Ma to bezpośrednie przełożenie na opłacalność produkcji.

Podstawowym czynnikiem determinującym żyzność gleby, a co za tym idzie zawartości makro- i mikropierwiastków, jest jej pochodzenie ukształtowane przez procesy glebotwórcze. O żyzności gleby decyduje także zawartość materii organicznej, w której bardzo ważną rolę pełni próchnica, uczestnicząca, m.in. w procesie tworzenia struktury gruzełkowej gleby. Znaczący wpływ na jej poziom w glebie ma nawożenie, zmianowanie, a także sposób zagospodarowania słomy. Zawiera ona pierwiastki takie jak azot, fosfor, magnez itp., które stopniowo przechodzą w formy przyswajalne, a ich ilość powinna zaspokajać potrzeby pokarmowe roślin. Składniki mineralne są niezbędne dla prawidłowego wzrostu i rozwoju roślin uprawnych. Jednak ich nadmiar w środowisku jest zjawiskiem niepożądanym. W wyniku intensywnych opadów deszczu w połączeniu z dawkami nawozów, dochodzić może do zanieczyszczenia wód powierzchniowych i podziemnych.

Metale ciężkie mogą być wnoszone do gleby wraz ze stosowanymi nawozami, opadami atmosferycznymi a także środkami ochrony roślin. Glebami najbardziej wrażliwymi na ten rodzaj zanieczyszczeń są te ubogie w wodę i składniki pokarmowe. Nagromadzenie się metali ciężkich w roślinach przeznaczonych do konsumpcji stanowi zagrożenie dla ludzi i zwierząt, tym samym coraz więcej uwagi poświęca się badaniu składu chemicznego roślin używanych w przemyśle kosmetycznym, farmaceutycznym a zwłaszcza spożywczym. Badania te prowadzi się w celu zapobieżenia przenikaniu metali ciężkich do organizmu ludzkiego. W ostatnim czasie odnotowuje się wzrost skażenia gleby metalami ciężkimi. Do najbardziej toksycznych spośród nich zaliczamy m.in.: ołów, kadm, chrom i nikiel, które kumulując się zmniejszają jej rolniczą przydatność. Z uwagi na niewielką podatność na wymywanie, niezbędnym jest monitorowanie ich zawartości w glebie.

Wszystkie zagadnienia związane ze statycznymi doświadczeniami nawozowymi nie zostały jeszcze do końca poznane. W związku z ciągłym rozwojem przemysłu rolniczego, w tym wprowadzaniem do handlu nowych nawozów, m.in. ekologicznych, posiadających zdolność wiązania azotu atmosferycznego, zawierających stymulatory wzrostu, istnieje konieczność ciągłej kontynuacji tego typu doświadczeń. Mają one na celu, podobnie jak dotychczas, określenie ich długofalowego wpływu na właściwości fizykochemiczne gleb, determinując ich żyzność oraz na uprawiane rośliny w kontekście wielkości i jakości plonu. Zatem, nie budzi wątpliwości fakt, że prowadzenie dalszych wieloletnich nawozowych doświadczeń statycznych jest konieczne.

W związku z powyższym przedmiotem przedstawionej dysertacji była ocena zawartości pierwiastków w wieloletnim doświadczeniu statycznym w układzie

gleba – roślina, którą przeprowadzono na podstawie danych uzyskanych z analiz próbek materiału glebowego i roślinnego z 11. rotacji zmianowania. Doświadczenie to było zlokalizowane w Stacji Badawczej Wydziału Rolniczego Akademii Techniczno-Rolniczej (obecnie Wydział Rolnictwa i Biotechnologii Politechniki Bydgoskiej) w Wierzchucinku, Zostało ono założone w 1973 roku przez prof. dr hab. inż. Wojciecha Cwojdzńskiego i było kontynuowane przez pracowników ówczesnej Katedry, później Zakładu, a od kilku lat Pracowni Chemii Rolnej.

Hipoteza badawcza zakładała, że stosowane systematycznie przez 44 lata, nawożenie obornikiem, mineralne - NPK oraz łączne (obornik + NPK) mogą korzystnie lub negatywnie oddziaływać i kształtować podstawowy skład mineralny gleby, a tym samym wpływać na wielkość plonu i determinować jego jakość, w tym skład chemiczny (pierwiastkowy). Zakładała również, że może decydować o zawartości metali ciężkich w glebie, a tym samym w plonie głównym testowanych roślin i negatywnie determinować przydatność uzyskanego surowca roślinnego w kontekście bezpieczeństwa dla przemysłu rolno-spożywczego. Głównym celem badań było oszacowanie zmian wartości wybranych parametrów gleby i wskaźników jakościowych plonu głównego badanych roślin uprawnych w 11. rotacji zmianowania, pod wpływem nakładającego się nieprzerwanie od 44. lat nawożenia (obornik, nawożenie mineralne NPK, obornik+NPK). Na podstawie celu głównego sformułowano cele szczegółowe: i) określenie zmian wartości wskaźników zakwaszenia gleby pod wpływem wieloletniego nakładającego się nawożenia, ii) oszacowanie wpływu długotrwałego, nakładającego się nawożenia, szczególnie nawozem naturalnym w postaci obornika, na zawartości N-ogółem i C-organicznego w glebie, iii) określenie zmian w zawartości makro- i mikroelementów oraz metali ciężkich w glebie pod wpływem badanego nawożenia, iiii) ustalenie, który z aplikowanych rodzajów nawożenia będzie decydował/świadczył o uzyskaniu największego efektu plonotwórczego plonu głównego roślin uprawianych w zmianowaniu, iiii) oszacowanie zmian w zawartości wybranych makro- i mikropierwiastków (N, P, K, Mg, Cu, Zn, Mn i Fe) oraz zawartości Pb, Cd, Cr i Ni w plonie głównym roślin uprawianych w zmianowaniu (ziemniak, jęczmień jary, rzepak ozimy, pszenica ozima).

Eksperyment prowadzono na glebie płowej typowej, klasy bonitacyjnej III a, wytworzonej z gliny zwałowej falistej moreny dennej, zaliczanej do kompleksu żytznego bardzo dobrego. Pod względem gatunku jest to piasek gliniasty mocny, położony na glinie lekkiej pylastej. Badanym czynnikiem w omawianym doświadczeniu był rodzaj nawożenia. Stosowano nawożenie: i) naturalne w postaci obornika (OB) w dawce $40 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ w ciągu jednej rotacji zmianowania, co stanowiło $424 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ NPK; ii) mineralne (NPK), tj. NPK w ilości $1339 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ w ciągu jednej rotacji zmianowania, iii) naturalno-mineralne w postaci obornika w dawce $40 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ i nawozów mineralnych (OB+NPK), co stanowiło $1763 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ NPK w ciągu jednej rotacji zmianowania.

W doświadczeniu uprawiano cztery rośliny w płodozmianie, obejmującym w jednej rotacji następujące gatunki: ziemniak jadalny, jęczmień jary, rzepak ozimy oraz pszenicę ozimą. Ustalając dawki nawożenia mineralnego, zgodnie z zaleceniami obowiązującymi w latach 70. ubiegłego wieku, zakładano plon odpowiadający 45 jednostkom zbożowym z 1 ha. Dawki NPK pod ziemniaka jadalnego wynosiły odpowiednio 150, 52 i 249 kg·ha⁻¹. Co 4 lata pod ziemniaki stosowano obornik w dawce około 40 t·ha⁻¹, w zależności od zawartości w nim azotu. W uprawie jęczmienia jarego aplikowano dawki NPK odpowiednio 70, 24 i 83 kg·ha⁻¹. Z kolei pod rzepak ozimy dawki NPK zastosowano odpowiednio w ilości: 200, 70 i 166 kg·ha⁻¹. W przypadku pszenicy ozimej, kończącej analizowaną w pracy 11. rotację zmianowania, aplikowano NPK w ilościach odpowiednio: 120, 39 i 116 kg·ha⁻¹.

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że wieloletnie, nakładające się badane rodzaje nawożenia spowodowały obniżenie wartości pH gleby oraz wzrost wartości kwasowości hydrolitycznej (za wyjątkiem obiektu, gdzie aplikowano obornik). Po 11. rotacji zmianowania odnotowano zmianę odczynu gleby z obojętnego (1974 r.) do kwaśnego lub bardzo kwaśnego. Stwierdzono zmniejszenie zawartości azotu ogółem oraz węgla organicznego w glebie w stosunku do wartości tych cech uzyskanych przed założeniem doświadczenia. Zmiany te były najmniejsze po zastosowaniu obornika, natomiast największe po aplikacji nawozów mineralnych. Długotrwała (44 lata) aplikacja testowanych rodzajów nawożenia skutkowała zmniejszeniem zawartości badanych przyswajalnych form makro- i mikroelementów w glebie. Najmniejszy ich ubytek zauważono po zastosowaniu nawozu naturalnego (za wyjątkiem Fe, gdzie najkorzystniejsze okazało się łączne nawożenie obornikiem i NPK). Z kolei badane gleby, ze względu na zawartość w nich metali ciężkich, spełniały standardy dla gleb użytkowanych rolniczo.

Wykazano, że plon główny roślin uprawianych w 11. rotacji zmianowania był istotnie najwyższy po łącznej aplikacji nawozu naturalnego i nawożenia mineralnego, w stosunku do pozostałych badanych obiektów nawozowych. Natomiast zawartości podstawowych makroskładników w plonie głównym badanych roślin uprawnych zależały od rodzaju aplikowanego nawożenia. Istotnie najwyższe zawartości azotu ogólnego uzyskano w bulwach ziemniaka i ziarnie jęczmienia jarego po łącznym zastosowaniu obornika i NPK, natomiast w nasionach rzepaku ozimego i ziarnie pszenicy ozimej – po aplikacji jedynie nawozów mineralnych. Najwyższe istotne zawartości P, K i Mg stwierdzono po zastosowaniu obornika. Zawartości badanych mikroelementów w bulwach ziemniaka były istotnie najwyższe po łącznej aplikacji obornika i nawozów mineralnych. Nawożenie to wpłynęło również na uzyskanie istotnie najwyższej zawartości Zn, Mn i Fe w ziarnie jęczmienia i pszenicy. Z kolei najwięcej miedzi w plonie zbóż odnotowano po aplikacji obornika. Nawożenie mineralne determinowało uzyskanie największej zawartości cynku i manganu, aplikacja obornika – żelaza, a łączne stosowanie obornika i NPK – miedzi, w nasionach rzepaku ozimego. Akumulacja ołowiu, kadmu, chromu i niklu w plonie

głównym roślin uprawianych w zmianowaniu nie przekraczała wartości granicznych dla uzyskanego surowca w kontekście jego bezpieczeństwa dla przemysłu rolno-spożywczego.

Reasumując należy stwierdzić, że wieloletnie (44 lata) nakładające się nawożenie obornikiem, nawozami mineralnymi NPK) oraz łączna ich aplikacja powodowały zmiany wartości wskaźników jakościowych gleby (zmniejszenie wartości pH gleby, wzrost wartości Hh, zmniejszenie zawartości Nog., Corg., przyswajalnych form makro- i mikroelementów w glebie). Przy czym najmniejszy ich spadek odnotowano po zastosowaniu obornika. Powyższe zmiany mogły mieć wpływ na uzyskane wartości cech ilościowych i jakościowych plonu głównego roślin uprawianych w 11. rotacji zmianowania.

ABSTRACT

An assessment of element contents in a long-term static experiment in the soil/plant relationship

Malgorzata Moskal, MSc

Keywords: long-term static experiment, manure, mineral fertilisation, soil chemical composition, plant chemical composition

Long-term field experiments are static experiments in which the same research objects are used continuously for more than 20 years. They allow the researchers to determine any physical, physicochemical, or biological transformations of the soil in the long-term. These changes can verify the fertility and agricultural productivity of the soil, which are in turn determined by the varied weather, soil and growing conditions.

Multi-year static fertilisation experiments provide a valuable source of agricultural information, and are a starting point for reaching conclusions about changes occurring in the soil/plant relationship. They have made it possible to determine changes of the physicochemical properties of the soil, taking place over many years, that define its fertility under the influence of both natural and anthropogenic factors. They also provide the full picture of how various fertilisation methods affect the yield level as well as the quality of the grown plant species, and eventually the safety of the material for the agricultural and food industry, and of the food produced. This information is necessary to implement the sustainable agriculture principles. Currently, over 600 long-term fertilisation experiments are being run globally. The best known one, and also the oldest, is the long-term experiment having been run since 1843 in England, at the Rothamsted Experimental Station, where the effect of natural and mineral fertilisers on the yields of the grown plants has been assessed. The archived samples can even be tested now for the content of various components that were impossible to be determined in the past due to the lack of suitable equipment; to find out what their role might be and whether they are potentially harmful. The oldest such experiment in Poland, started in 1923, is that at the experimental station in Skierniewice. Another long-term fertilisation study that cannot be ignored is the one run at the research facility in Mochełek, belonging to the Bydgoszcz University of Science and Technology, which was set up in 1948. One of the factors under observation was the method of revegetation; while the other — the fertilisation doses (NPK, natural - manure).

The key agricultural measure is fertilisation. Intensive growing of plants combined with simplified crop rotation, and the resulting predominance of cereals on light soils, leads to decreased content of humus, which is significant in terms of retaining the fertility, structure, and moisture of the soil.

One very valuable source of organic matter are natural fertilisers, among which manure is the most precious one. Application rules, in the case of mineral, natural and organic fertilisers, are set forth in detail in the fertilisers and fertilising act of 10th July 2007. This directly affects the profitability of production.

The key factor that determines the soil's fertility, and therefore the macro and micro elements content, is the origin of the soil, shaped by the soil-forming processes. The soil fertility also determines the content of organic matter, in which humus has a very important role; it participates, for example, in the development of the granular soil structure. Its level in the soil is significantly affected by fertilisation, crop rotation as well as the method of bringing straw into cultivation. It contains such elements as nitrogen, phosphorus, magnesium etc., which gradually transform into their available form, and their amount should satisfy the plants' nutritional needs. Mineral components are necessary for the normal growth and development of crop plants. However, their excessive presence in the environment is not desirable. In combination with fertiliser doses, heavy rain may cause contamination of surface and underground water.

Heavy metals may get into soil together with the fertilisers, precipitation as well as plant care products. The soils that are most vulnerable to this type of contamination are those lacking in water and nutrients. Accumulation of heavy metals in plants intended for consumption creates hazard for people and animals. Therefore more and more attention is being paid to the chemical composition of plants used in the cosmetic, pharmaceutical, and especially food industries. This research is conducted in order to stop heavy metals from getting into human bodies. Recently, heavy metal contamination in soil has been on the increase. Some of the most toxic ones include lead, cadmium, chromium or nickel. When they accumulate in the soil, they reduce its agricultural potential. Due to the fact that they are not very likely to be washed out from the soil, it is necessary to monitor their presence.

Not all aspects of static long-term fertilisation experiments have been fully understood yet. Due to constant development of the agricultural industry, including the increased number of fertilisers now on the market, also environmentally-friendly ones, which can bind atmospheric nitrogen, and which contain growth promoters, such experiments need to be continued. Their purpose, the same as up until now, is to establish their long-term effects on the physicochemical properties of soils, determining their fertility, and on the grown plants in terms of crop size and quality. Hence, there is no question that continuing static long-term fertiliser experiments is necessary.

In connection with the above, the subject of the submitted dissertation was an assessment of element content in a long-term static experiment in the soil/plant relationship, which was conducted based on data obtained from an analysis of soil material and plants samples from the 11th round of crop rotation. The experiment was conducted at the research station of the Faculty of Agriculture at the Agricultural and Engineering University (currently,

the Faculty of Agriculture and Biotechnology at the Bydgoszcz University of Science and Technology) in Wierzchucinek. It was initiated in 1973 by Prof. Wojciech Cwojdzński, PhD Eng. and was then continued by the staff of the department of that time, later to become a unit, and for the past couple of years the Agricultural Chemistry Lab.

The working hypothesis assumed that the regular fertilising for the past 44 years with manure, mineral/NPK, and combined (manure + NPK) may have beneficial or detrimental effects, and may shape the basic mineral composition of the soil; and therefore affect the crop size and determine its quality, including chemical (elemental) composition. The assumption was also that it may determine the heavy metal content in the soil, and therefore in the main crop of the tested plants, as well as negatively determine the usefulness of the obtained plant material in the context of safety for the agricultural and food industry. The chief objective of the research was to estimate the variations in terms of selected soil parameters and the qualitative indicators of the main crop of the plants under examination in the 11th round of the crop rotation, caused by continual fertilisation accumulating for the past 44 years (manure, mineral/NPK fertilisation, manure + NPK). Based on the main objective, additional detailed objectives were established: i) to determine variations in the indicators of soil acidification from multi-year accumulating fertilisation; ii) to estimate the effects of long-term accumulating fertilisation, especially with a natural fertiliser being manure, on N-total and C-organic content in soil; iii) to determine variations in the content of macro and micro elements as well as heavy metals in the soil from the examined fertilisation; iiiii) to establish which of the applied types of fertilisation will determine/prove that the biggest positive effect on yield has been achieved for the plants grown under crop rotation; iiiiii) to estimate variations in the content of selected macro and micro elements (N, P, K, Mg, Cu, Zn, Mn i Fe) as well as content of Pb, Cd, Cr and Ni in the main crop of the plants grown under crop rotation (potatoes, spring barley, winter rape, winter wheat).

The experiment was conducted on typical fallow soil of quality class IIIa, developed from heaped curved clay of ground moraine, considered to be very good for rye. In terms of variety, this is strong clayey sand, situated on top of light dusty clay. The factor examined in the experiment discussed herein was the kind of fertilisation. The following fertilisation was applied: i) natural in the form of manure (OB), at the dose of 40 t·ha⁻¹ within a single crop rotation round, which corresponded to 424 kg·ha⁻¹ NPK; ii) mineral (NPK), i.e. NPK totalling 1339 kg·ha⁻¹ within a single crop rotation round, iii) natural/mineral in the form of manure, at the dose of 40 t·ha⁻¹, and mineral fertilisers (OB+NPK), which corresponded to 1763 kg·ha⁻¹ NPK within a single crop rotation round.

Four plants were grown as part of the experiment in crop rotation. A single rotation included edible potatoes, spring barley, winter rape, and winter wheat. To establish the mineral fertilisation doses, as per the guidelines applied in the

1970s, the expected crop was 45 cereal units from 1 ha. NPK doses for edible potatoes equalled, respectively: 150, 52, and 249 kg ha⁻¹. Every 4 years, manure was used for potatoes at the dose of approx 40 t·ha⁻¹, depending on their nitrogen content. In spring barley growing, the applied NPK doses equalled respectively 70, 24 and 83 kg·ha⁻¹. And, for the winter rape, the NPK doses were respectively: 200, 70, and 166 kg·ha⁻¹. For winter wheat, completing its 11th crop rotation round, analysed in the study, NPK at the following doses was applied: 120, 39, and 116 kg·ha⁻¹.

Based on the conducted research, it was concluded that different types of fertilisation accumulating in the soil have led to a decrease in the soil's pH as well as to an increase in its hydrolytic acidity (except for the facility where manure was applied). Following the 11th round of crop rotation, a change was noted: the soil went from neutral (in 1974) to acidic or very acidic. A lower nitrogen as well as organic carbon content was observed in the soil as compared to before the experiment was set up. The changes were the smallest following the use of manure; whereas the highest changes were seen following the application of mineral fertilisers. A long-term application (44 years) of the tested types of fertilisation resulted in a decreased content of the examined available forms of macro and micro elements in the soil. Their lowest decrease was observed following the use of a natural fertiliser (except for Fe, where the most beneficial option turned out to be the combined fertilisation with manure and NPK). On the other hand, the examined soils, due to the heavy metal content, met the standards for soils used for agriculture.

It was demonstrated that the main crop of the plants grown in the 11th crop rotation round was significantly highest following the combined application of a natural fertiliser and mineral fertilising, as compared to the other examined fertilisation facilities. The content of essential micro-nutrients in the main crop of the examined plants depended on the type of applied fertilisation. Considerably highest contents of total nitrogen were observed in potatoes and spring barley grains following the combined use of manure and NPK; whereas in winter rape seeds and winter wheat grains — after applying only the mineral fertilisers. The highest significant P, K, and Mg contents were found following the application of manure. The contents of the examined micro-nutrients in potatoes were significantly highest following the combined application of manure and mineral fertilisers. Fertilising in this way also contributed to achieving significantly highest contents of Z, Mn, and Fe in the barley and wheat grains. On the other hand, the highest copper content in the cereal crops was noted following the application of manure. Mineral fertilising determined achieving the highest zinc and manganese contents; manure application — iron content; while manure and NPK combined — copper, in winter rape seed. Lead, cadmium, chromium, and nickel contents in the main crop of the plants grown in crop rotation did not exceed the limits for the material in terms of its safety for the agricultural and food industry.

To sum up, long-term (44 years) accumulating fertilisation with manure,

mineral fertilisers/NPK, as well as their combined application resulted in variations in terms of the soil's qualitative indicators (decreased pH, increased Hh, decreased Nog., Corg., available forms of macro and micro elements in the soil). The lowest decrease was observed when using manure. The above variations could have affected the obtained quantitative and qualitative traits of the main crop of the plants grown in the 11th round of crop rotation.

ANEKS

Tabela 39. Wartości wskaźników zakwaszenia gleby (pH i Hh) przed założeniem doświadczenia (1974 r.) oraz po 6. i 10. rotacji zmianowania w zależności od stosowanego nawożenia

Cecha	Rotacja/ Lata	Stosowane nawożenie		
		Obornik	NPK	Obornik + NPK
wartość pH	przed założeniem doświadczenia – 6,8			
	6/1994-98	5,9 a	5,4 b	5,5 b
	10/2010-2013	5,6 a	5,2 b	5,5 a
wartość Hh [cmol(+) \cdot kg ⁻¹]	przed założeniem doświadczenia – 1,43			
	6/1994-98	1,77 c	2,63 b	3,17 a
	10/2010-2013	2,23 a	2,21 b	2,13 c

Tabela 40. Zawartości azotu ogółem i węgla organicznego w glebie [g \cdot kg⁻¹] oraz stosunek C:N przed założeniem doświadczenia (1974 r.) oraz po 6. i 10. rotacji zmianowania w zależności od stosowanego nawożenia

Cecha	Rotacja/ Lata	Stosowane nawożenie		
		Obornik	NPK	Obornik + NPK
N ogółem	przed założeniem doświadczenia – 0,99			
	6/1994-98	0,73 a	0,71 b	0,69 c
	10/2010-2013	0,73 a	0,63 c	0,67 b
C organiczny	przed założeniem doświadczenia – 11,60			
	6/1994-98	10,47 b	8,19 a	9,55 b
	10/2010-2013	11,31 a	9,05 c	9,96 b
C:N	przed założeniem doświadczenia – 11,7			
	6/1994-98	14,3 a	13,7 b	13,0 c
	10/2010-2013	15,40 a	14,27 b	14,90 c

Tabela 41. Zawartości przyswajalnych form fosforu, potasu i magnezu w glebie [mg·kg⁻¹] przed założeniem doświadczenia (1974 r.) oraz po 6. i 10. rotacji zmianowania w zależności od stosowanego nawożenia

Cecha	Rotacja/ Lata	Stosowane nawożenie		
		Obornik	NPK	Obornik + NPK
P przyswajalny	przed założeniem doświadczenia – 65,89			
	6/1994-98	60,22 a	57,20 b	54,18 c
	10/2010-2013	41,37 b	50,90 a	41,53 b
K przyswajalny	przed założeniem doświadczenia – 121,30			
	6/1994-98	74,08 a	70,58 b	66,87 c
	10/2010-2013	54,66 c	60,52 b	74,80 a
Mg przyswajalny	przed założeniem doświadczenia – 61,90			
	6/1994-98	60,49 a	52,93 b	45,22 c
	10/2010-2013	45,05 a	36,02 c	42,26 b

Tabela 42. Zawartości przyswajalnych form miedzi, cynku, manganu i żelaza w glebie [mg·kg⁻¹] przed założeniem doświadczenia (1974 r.) oraz po 6. i 10. rotacji zmianowania w zależności od stosowanego nawożenia

Cecha	Rotacja/ Lata	Stosowane nawożenie		
		Obornik	NPK	Obornik + NPK
Cu przyswajalna	przed założeniem doświadczenia – 4,21			
	6/1994-98	4,03 a	3,33 c	3,47 b
	10/2010-2013	3,92 a	3,11 c	3,23 b
Zn przyswajalny	przed założeniem doświadczenia – 9,34			
	6/1994-98	6,34 a	4,74 c	5,11 b
	10/2010-2013	5,88 a	4,43 c	4,93 b
Mn przyswajalny	przed założeniem doświadczenia - 103,5			
	6/1994-98	98,0 a	89,1 b	85,4 c
	10/2010-2013	95,9 a	87,1 b	83,5 c
Fe przyswajalne	przed założeniem doświadczenia – 857,1			
	6/1994-98	810,5 a	549,1 c	555,0 a
	10/2010-2013	791,1 a	531,6 c	542,2 b

Tabela 43. Zawartości przyswajalnych form ołowiu, kadmu, chromu i niklu w glebie [mg·kg⁻¹] przed założeniem doświadczenia (1974 r.) oraz po 6. rotacji zmianowania w zależności od stosowanego nawożenia

Cecha	Rotacja/ Lata	Stosowane nawożenie		
		Obornik	NPK	Obornik + NPK
Pb przyswajalny	Zawartość w glebie przed założeniem doświadczenia – 13,78			
	6/1994-98	11,7	10,2	12,7
Cd przyswajalny	Zawartość przed założeniem doświadczenia – 0,12-0,17			
	6/1994-98	< 1	< 1	< 1
Cr przyswajalny	Zawartość przed założeniem doświadczenia – 0,12-0,17			
	6/1994-98	11,80	10,67	10,84
Ni przyswajalny	Zawartość przed założeniem doświadczenia – 6,20			
	6/1994-98	5,72	4,92	5,08

Tabela 44. Plon główny roślin uprawianych w 6. rotacji zmianowania (1994-98) w zależności od stosowanego nawożenia

Stosowane nawożenie	Gatunek uprawianej rośliny			
	ziemniak	jęczmień jary	rzepak ozimy	pszenica ozima
obornik	22,08 c	3,32 c	1,14 c	4,28 c
NPK	33,89 b	3,96 b	1,71 b	4,79 b
obornik + NPK	41,43 a	4,71 a	2,15 a	5,24 a

Tabela 45. Zawartości azotu, fosforu, potasu, magnezu, wapnia i sodu w plonie głównym roślin uprawianych w 6. rotacji zmianowania (1994-98), w zależności od stosowanego nawożenia

Zawartość	Stosowane nawożenie	Gatunek uprawianej rośliny			
		ziemniak	jęczmień jary	rzepak ozimy	pszenica ozima
N	obornik	17,61 c	16,04 c	37,68 c	14,55 c
	NPK	19,05 b	17,41 b	39,56 b	18,30 b
	obornik + NPK	19,26 a	18,89 a	40,24 a	19,82 a
P	obornik	2,23 c	3,86 ab	6,41 c	3,55 b
	NPK	2,88 a	3,40 c	7,94 b	4,05 a
	obornik + NPK	2,51 b	4,04 a	9,97 a	4,19 a
K	obornik	8,83 c	4,91 b	9,05 b	3,75 c
	NPK	10,94 a	4,51 c	8,88 bc	3,92 a
	obornik + NPK	9,53 b	5,19 a	9,82 a	3,91 ab
Mg	obornik	1,75 c	1,31 b	3,50 b	2,39 a
	NPK	1,87 b	1,22 c	3,44 bc	2,13 c
	obornik + NPK	1,98 a	1,44 a	3,62 a	2,21 b
Ca	obornik	0,29 c	0,39 bc	2,91 b	0,40 a
	NPK	0,37 a	0,45 a	3,85 a	0,40 a
	obornik + NPK	0,35 ab	0,41 b	3,85 a	0,40 a
Na	obornik	0,15 c	0,36 bc	0,26 a	0,24 a
	NPK	0,24 b	0,42 a	0,24 a	0,26 a
	obornik + NPK	0,35 a	0,39 ab	0,27 a	0,27 a

Tabela 46. Zawartości miedzi, cynku, manganu i żelaza w plonie głównym roślin uprawianych w 6. rotacji zmianowania (1994-98), w zależności od stosowanego nawożenia

Zawartość	Stosowane nawożenie	Gatunek uprawianej rośliny			
		ziemniak	Jęczmień jary	Rzepak ozimy	Pszenica ozima
Cu	obornik	5,32 b	5,57 a	3,91 b	7,62 a
	NPK	5,25 b	5,3 b	3,96 b	5,69 b
	obornik + NPK	5,56 a	5,15 c	4,26 a	5,08 c
Zn	obornik	15,64 a	34,89 a	29,73 ab	25,59 a
	NPK	15,30 ab	25,24 b	27,23 c	24,11 c
	obornik + NPK	13,01 c	24,70 b	30,14 a	33,04 b
Mn	obornik	7,96 c	11,43 c	29,31 b	20,67 c
	NPK	8,54 b	16,89 b	40,47 a	36,01 b
	obornik + NPK	9,70 a	20,67 a	39,58 a	50,81 a
Fe	obornik	48,18 c	43,86 c	70,89 a	34,02 c
	NPK	52,67 b	50,4 b	64,38 b	37,68 b
	obornik + NPK	57,52 a	60,24 a	61,10 c	42,87 a

Tabela 47. Zawartości ołowiu, kadmu, chromu i niklu w plonie głównym roślin uprawianych w 6. rotacji zmianowania (1994-98), w zależności od stosowanego nawożenia

Zawartość	Stosowane nawożenie	Gatunek uprawianej rośliny			
		ziemniak	jęczmień jary	rzepak ozimy	pszenica ozima
Pb	obornik	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0
	NPK	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0
	obornik + NPK	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0
Cd	obornik	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0
	NPK	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0
	obornik + NPK	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0
Cr	obornik	0,06 b	0,15 ab	0,16 c	0,34 a
	NPK	0,08 ab	0,14 b	0,37 a	0,32 ab
	obornik + NPK	0,10 a	0,17 a	0,36 ab	0,12 c
Ni	obornik	0,33 b	0,40 a	0,63 b	0,34 a
	NPK	0,29 b	0,29 b	0,35 c	0,26 b
	obornik + NPK	0,41 a	0,28 b	0,73 a	0,28 b