UNIWERSYTET TECHNOLOGICZNO – PRZYRODNICZY
IM. JANA I JĘDRZEJA ŚNIADECKICH W BYDGOSZCZY
WYDZIAŁ ROLNICZY
KATEDRA BIOCHEMII

Joanna Lemanowicz

Zawartość wybranych frakcji fosforu oraz aktywność fosfatazowa w układzie gleba – roślina pod wpływem nawożenia obornikiem i azotem mineralnym

Rozprawa doktorska przygotowana pod opieką naukową
Prof. dr hab. Jana Kopera

Biblioteka Główna UTP w Bydgoszczy
000000133241

Bydgoszcz 2008

Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy
BIBLIOTEKA GŁÓWNA
D 316

C8 D 52/3

Promotorowi pracy
Panu Prof. dr hab. Janowi Koperowi
składam podziękowanie za rady i pomoc
udzieloną mi w trakcie redagowania niniejszej pracy

SPIS TREŚCI

1. ***Wstęp i cel pracy*** **3**

2. ***Przegląd literatury*** **6**

2.1. Fosfor w glebie, jego zawartość i biogeochemia **6**

2.2. Funkcje i rozmieszczenie fosforu w roślinie **8**

2.3. Wpływ nawożenie obornikiem na zawartość fosforu w glebie i roślinach **10**

2.4. Oddziaływanie nawożenia azotem mineralnym na zawartość fosforu w glebie i roślinach **13**

2.5. Enzymy – ich rola i występowanie **15**

2.5.1. Wpływ nawożenia obornikiem na aktywność fosfatazową w glebie i roślinie **17**

2.5.2. Kształtowanie się aktywności fosfatazowej w glebie i roślinach pod wpływem nawożenia azotem mineralnym **18**

2.6. Wpływ doboru roślin w zmianowaniu na kształtowanie się zawartości fosforu i aktywności fosfataz **19**

2.7. Zmiany zawartości fosforu oraz aktywności fosfatazowej w sezonie wegetacyjnym roślin **20**

2.8. Charakterystyka wybranych frakcji fosforu i fosfomonoesteraz **22**

2.8.1. Fosfor związków organicznych w glebie i roślinie **22**

2.8.2. Fosfor przyswajalny **23**

2.8.3. Fosfataza alkaliczna i kwaśne – ogólna charakterystyka **25**

3. Badania własne **28**

3.1. Materiał badawczy **28**

3.1.1. Opis doświadczenia **28**

3.1.2. Pobieranie materiału glebowego i roślinnego oraz przygotowanie próbek do analiz **32**

3.2. Metodyka badań **33**

3.3. Statystyczne opracowanie wyników **35**

4. Wyniki i dyskusja **36**

4.1. Właściwości chemiczne badanej gleby **36**

4.1.1. Odczyn gleby **36**

4.1.2. Zawartość węgla związków organicznych i azotu ogółem w badanej glebie **37**
4.2. Zawartość wybranych frakcji fosforu w glebie **40**
4.2.1. Zawartość fosforu ogółem **40**
4.2.2. Zawartość fosforu związków organicznych **43**
4.2.3. Zawartość fosforu przyswajalnego **49**
4.3. Aktywność fosfomonoesteraz glebowych **53**
4.4. Zawartość fosforu w analizowanych roślinach **60**
4.4.1. Zawartość fosforu ogółem **60**
4.4.2. Zawartość fosforu związków organicznych **68**
4.5. Dynamika aktywności fosfatazy alkalicznej i kwaśnej w badanych roślinach **77**
4.6. Korelacje pomiędzy zawartością wybranych frakcji fosforu w glebie i roślinach, a ich aktywnością fosfatazową **88**
5.Wnioski. **101**
6. Spis literatury **104**

1. WSTĘP I CEL PRACY

Agroekosystem jest układem całkowicie sztucznym lub przekształconym przez człowieka w celu uzyskania maksymalnych plonów. Podstawowymi cechami ekosystemu rolnego są ciągła uprawa i nawożenie gleby oraz obsiewanie jej uszlachetnionymi gatunkami roślin. Gleba i roślina stanowią systemy wzajemnie powiązane, pomiędzy którymi następuje ciągła wymiana składników pokarmowych. Wzrost i rozwój roślin wymaga ustawicznego przemieszczania się składników pokarmowych z gleby w kierunku korzenia [NOWOTNY-MIECZYŃSKA i in. 1976]. Oznacza to, że w glebach należy uzupełniać każdy z biogennych składników, które pobierane są wraz z plonem roślin, aby nie dopuścić do nadmiernego ich wyczerpania. Poprzez systematyczne stosowanie nawożenia mineralnego, naturalnego oraz organicznego zapobiegamy obniżeniu produktywności gleby, jednocześnie wpływając na jej właściwości fizyko-chemiczne. Stosowane nawozy organiczne stymulują zawartość materii organicznej i jednocześnie przeciwdziałają spadkowi zawartości przyswajalnych składników pokarmowych w glebie. Nawozy mineralne zwykle dodatnio wpływają na plonowanie roślin, należy jednak zaznaczyć, że niekiedy mogą one powodować niekorzystne zmiany w składzie chemicznym roślin poprzez modyfikacje właściwości gleby [STĘPIEŃ 2000]. Z chwilą intensyfikacji rolnictwa i coraz powszechniejszego stosowania nawozów mineralnych i zastąpienia nimi wartości nawozowej roślin strączkowych zaniechano stosowania zmianowania poprawnego biologicznie. Zakłada się, że prawidłowe zmianowanie umożliwia wzrost lub przynajmniej pozwala utrzymać na stałym poziomie żyzność gleby, ponadto ogranicza wymywanie składników pokarmowych do wód gruntowych, a także rozwój chorób i szkodników roślin [SMAGACZ 2000].

Fosfor obok węgla, azotu i siarki, należy do tych biopierwiastków, które odgrywają jedną z najważniejszych funkcji w metabolizmie roślin. Fosfor należy do pierwiastków mało rozpowszechnionych w skorupie ziemskiej, pod względem częstości występowania zajmuje dopiero 12 miejsce. Pomimo, tego że stanowi zaledwie 0,2% masy lądów i oceanów, ma on duży wpływ na rozwój wszystkich organizmów żywych. Z tego powodu jest nazywany „pierwiastkiem życia". Zagadnienie fosforu w agrocenozach jest nadal problemem otwartym, ze względu na znaczenie tego pierwiastka dla roślin, oraz jego funkcji w procesach fizjologicznych.

Zawartość fosforu w glebie zależy od wielu czynników przyrodniczych i antropogenicznych. Do ważniejszych z nich należą: typ, wilgotność i odczyn gleby,

stosowane nawożenie, sposób uprawy, gatunek uprawianych roślin, a także ilość i jakość substancji organicznej oraz obecność jonów wapnia, glinu i żelaza [WEAVER I RITCHIE 1994]. Cykl biogeochemiczny fosforu jest podatny na wszelkie zmiany powodowane przez rolniczą działalność człowieka, gdyż większość stosowanych nawozów mineralnych zawiera ten pierwiastek. Stosowane zabiegi agrotechniczne przyspieszają obieg fosforu w przyrodzie, przez co jego naturalny obieg biogeochemiczny staje się niepełny. Należy zapewniać optymalne zaopatrzenie roślin w fosfor, ponieważ jako jeden z najważniejszych składników w procesie żywienia roślin, jest bezpośrednio odpowiedzialny za zwiększanie produkcji rolniczej [NASH I HALLIWELL 1999]. Ze względu na fakt, że rezerwy przyswajalnego dla roślin fosforu w glebie są wynikiem jego naturalnej zawartości, nawożenia w przeszłości i aktualnego, dla praktyki rolniczej niezbędne jest dokładne rozpoznanie możliwości wykorzystania przez roślinę fosforu pochodzącego z rezerw glebowych, jak i z wprowadzonych nawozów [POTARZYCKI I GRZEBISZ 2001]. Większość dotychczasowych badań poświęcona była mineralnym frakcjom fosforu, natomiast problemy związane z procesem mineralizacji fosforu związków organicznych są nadal mało poznane.

Na podstawie wyników badań uzyskanych z wieloletnich doświadczeń można poznać zarówno zależności jak i zmiany ilościowe i jakościowe w obiegu fosforu w układzie gleba – roślina. Wieloletnie statyczne doświadczenia nawozowe, w których nawożenie organiczne i mineralne nakłada się w tych samych warunkach klimatycznych, na tej samej powierzchni glebowej, stanowić wiarygodne źródło w rozwiązywaniu problemów związanych z obiegiem tego biopierwiastka. Uzyskane wyniki z wieloletnich doświadczeń mogą pozwolić ocenić oddziaływanie poszczególnych nawozów oraz uwzględnienie doboru roślin w zmianowaniach na stan fosforowy gleby, a w efekcie końcowym także i roślin. Znajomość natężenia procesów życiowych poprzez określenie aktywności fosfatazowej może być również pomocne do rozpoznania stanu związanego z procesem odżywiania się roślin w określonych warunkach środowiska. Wyniki wieloletnich doświadczeń mogą być również wykorzystane do opracowania i sprawdzenia modeli oceniających wpływ czynników agrotechnicznych oraz klimatycznych na właściwości gleb. Poznanie dynamiki i kierunku przemian fosforu występującego w związkach organicznych po wieloletnim stosowaniu obornika, może stanowić podstawę do opracowania nowego systemu nawożenia gleb tym pierwiastkiem.

Hipoteza badawcza pracy zakłada, że zróżnicowane nawożenie organiczno-mineralne może istotnie wpłynąć na zmiany zawartość fosforu ogółem i jego frakcji w glebie oraz w roślinach w trakcie ich rozwoju wegetacyjnego. Uważa się, że zawartość fosforu będzie większa w glebie i roślinach pobranych z obiektów nawożonych wyższymi dawkami obornika i azotu mineralnego. Hipoteza badawcza zakłada również, że dobór roślin w zmianowaniu również istotnie może wpłynąć na zmiany badanych parametrów. Należy przypuszczać, że zastosowane nawożenie oraz odpowiedni dobór roślin w zmianowaniu spowodują trwałe tendencje zmian w aktywności fosfatazy alkalicznej i kwaśnej gleby oraz roślin.

Celem pracy było:

- Określenie wpływu nawożenia gleby zróżnicowanymi dawkami obornika i azotu mineralnego na zawartość wybranych frakcji fosforu w glebie i roślinie,
- Oznaczenie aktywności wybranych enzymów uczestniczących w przemianach fosforu w glebie i roślinie w zależności od zastosowanych dawek nawozów w ciągu okresu wegetacyjnego roślin,
- Określenie zmian aktywności badanych enzymów oraz zawartości fosforu i jego frakcji w glebie i roślinie pod wpływem doboru roślin w zmianowaniu,
- Poszukiwanie korelacji pomiędzy zawartością oznaczonych frakcji fosforu, oraz aktywnością fosfomonoesteraz w glebie i w roślinie, a pozostałymi właściwościami fizyko-chemicznymi badanej gleby.

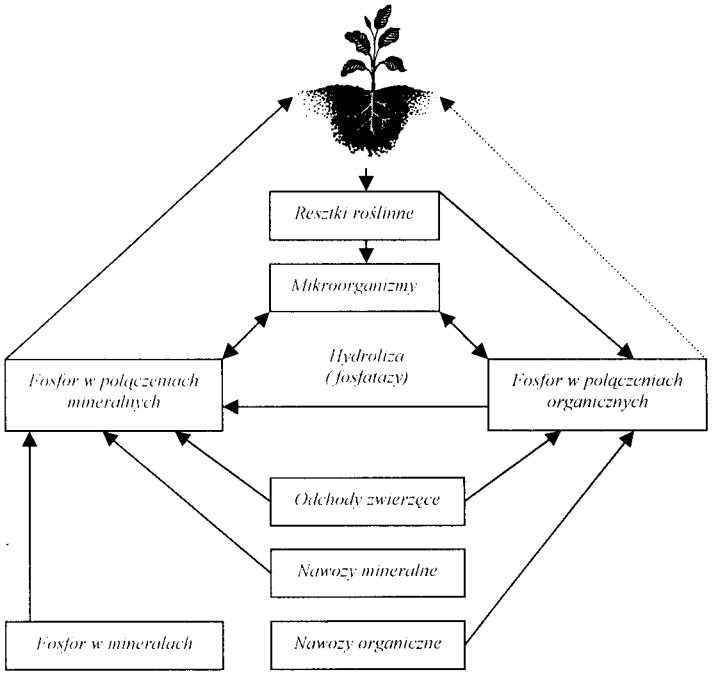
2. PRZEGLĄD LITERATURY

2.1. FOSFOR W GLEBIE, JEGO ZAWARTOŚĆ I BIOGEOCHEMIA

Fosfor (**P**, łac. *Phosphorus, „niosący światło"* z gr. *„phôs" – światło i „phorus" - niosący*) to niemetal należący do piątej grupy głównej pierwiastków. Jedynym izotopem stabilnym fosforu jest ^{29}P. Najlepiej znane odmiany alotropowe to: fosfor biały, czerwony, fioletowy, czarny. Po raz pierwszy został otrzymany w XII wieku przez arabskich alchemików. W Europie fosfor biały otrzymał w 1669 roku Henning Brand przez odparowanie moczu i ogrzewanie pozostałości z piaskiem. Dzięki świeceniu w ciemności pierwiastek ten cieszył się wielkim powodzeniem.

Fosfor występuje w glebie w połączeniach organicznych oraz w formie nieorganicznej (zarówno dostępnej jak i niedostępnej). Pierwiastek ten pod względem ilościowym zajmuje 12 miejsce, stanowi około 0,12% skorupy ziemskiej. W porównaniu z azotem i potasem, zasoby fosforu w glebach użytkowanych rolniczo są niewielkie. Szacuje się, że w glebach uprawnych w Polsce w zależności od skały macierzystej i poziomu nawożenia w warstwie wierzchniej gleby o miąższości 20 cm znajduje się 0,6 - 3,6 $tP \cdot ha^{-1}$ [GORLACH I MAZUR 2002]. Straty fosforu z gleby są niewielkie, gdyż mobilność fosforanów w profilu glebowym jest mniejsza niż innych makroskładników. Zmniejszenie się zawartości fosforu mineralnego w glebie następuje głównie w procesie pobierania przez rośliny i w określonych warunkach także na drodze spływu powierzchniowego [POTARZYCKI 2003]. Ważniejsze minerały zawierające fosfor i związki fosforu w glebie to hydroksyapatyt $Ca_5(PO_4)OH$, fluoroapatyt $Ca_5(PO_4)F$ oraz fosforany wapniowe: Ca_2HPO_4 i $Ca_3(PO_4)_2$. Zawartość fosforu w skałach mieści się w granicach 1100-1200 $mg \cdot kg^{-1}$ [SIUDA 2001, SAPEK I SAPEK 2002]. W zależności od rodzaju surowca mineralnego zawarty w nim fosfor może być całkowicie lub częściowo przyswajalny przez rośliny.

Fluoroapatyt jest minerałem trudno rozpuszczalnym i przez to najmniej przyswajalnym. Związki fosforu z wapniem, czyli fosforany jednowapniowe i dwuwapniowe są łatwiej dostępne dla roślin. Występują one jednak w małych ilościach w glebie ulegając łatwo przekształceniu w związki trudniej rozpuszczalne. Rośliny pobierają fosfor w rozpuszczalnej nieorganicznej formie.



Rysunek 2.1.

Obieg fosforu w glebie uprawnej [za POTARZYCKIM 2003]

Z ogólnej zawartości fosforu w glebach mineralnych niekiedy 30-80% (w glebach polskich na ogół 20-40%) występuje w postaci organicznej [CHEN 2003, TICCONI I ABEL 2004]. Organiczne połączenia fosforu występujące w glebie to przede wszystkim: fityna 2 - 50% $P_{org.}$ fosfolipidy 1 - 5% $P_{org.}$ kwasy nukleinowe (DNA i RNA) 0,2 - 2,5% $P_{org.}$ Dostępność dla roślin fosforu połączonego w związkach organicznych zależy od tempa mineralizacji, a nie od ogólnej zawartości związków organicznych. Mineralizacja fosforu związków organicznych jest istotnym czynnikiem w przepływie tego składnika w układzie gleba – roślina, gdyż w cytoplazmie roślin stężenie fosforu jest kilkadziesiąt razy większe niż w roztworze glebowym. Po wprowadzeniu do gleby świeżej materii organicznej, fosforany mogą być uwalniane do roztworu glebowego (mineralizacja) lub wiązane przez mikroorganizmy (immobilizacja). Dominacja jednego z tych procesów określana jest przez zawartość węgla i fosforu w materiale organicznym. Jeśli wartość stosunku C:P jest szersza od 300:1, przeważa immobilizacja, natomiast uruchamianie fosforu związków organicznych następuje, gdy wartość stosunku C:P jest węższa niż 200:1 [POTARZYCKI 2003]. Krótkotrwała biologiczna immobilizacja fosforu chroni niektóre jego formy przed długotrwałą retrogradacją. Kluczową rolę w procesie mineralizacji organicznych połączeń fosforu na drodze biochemicznej odgrywają fosfatazy. W glebach ubogich w fosfor

mineralny, produkcja fosfohydrolaz jest większa, co oznacza ze szybkość uwalniania fosforanów ze związków organicznych na drodze biochemicznej jest określana przez końcowy produkt kilku reakcji chemicznych. Jony ortofosforanowe, które w krótkim czasie po mineralizacji nie zostaną pobrane przez rośliny, ulegają sorpcji przez fazę stałą gleby.

2.2. FUNKCJE I ROZMIESZCZENIE FOSFORU W ROŚLINIE

Zawartość fosforu w roślinach prawidłowo odżywionych tym składnikiem kształtuje się w zakresie 0,1 – 1,0 % P s.m. [GAJ I GRZEBISZ 2003]. Pobieranie fosforu przez rośliny odbywa się prawie wyłącznie przez system korzeniowy w formie jonów $H_2PO_4^-$ i HPO_4^{-2} (w większości w formie $H_2PO_4^-$) [MOREL i in. 2000, GÓRECKI i in. 2002]. Następnie jest włączany do bardzo różnorodnych związków zawsze w postaci utlenionej, tworząc estry kwasu ortofosforowego. Fosfor pobierany jest przez rośliny biernie, na skutek sorpcji wymiennej i aktywnie w wyniku łączenia się jonu fosforanowego z nośnikiem. Na zasadzie przepływu z wodą przemieszcza się do powierzchni korzeni niewielka ilość fosforu, zdolna zaspokoić zaledwie 1 % wymagań pokarmowych roślin. Część pobranych przez korzenie nieorganicznych związków fosforanowych jest szybko zmieniana w związki organiczne. Pozostała część jest transportowana do wszystkich organów roślin, pozostając w komórce jako fosfor związków nieorganicznych (P_i) tworząc pulę zwaną metaboliczną, która jest wykorzystywana do syntezy ATP lub w reakcjach fosforylacji. W komórkach roślin wyższych, P_i gromadzi się w dużych ilościach w wakuoli. W przypadku niedoboru fosforu pula ta maleje, co w konsekwencji doprowadza do zmniejszenia się zawartości ATP, zmniejszając przez to intensywność przemian metabolicznych, szczególnie anabolizm komórek. W komórkach roślinnych występuje również pirofosforan (PP_i), który jest nośnikiem energii. Odgrywa on ważną rolę w metabolizmie sacharydów. Fosfor warunkuje również sprawny eksport produktów fotosyntezy z chloroplastów do cytozolu w formie fosfotrioz. Uczestniczący w tym transporcie fosfor to wyspecjalizowany przenośnik białkowy zwany przenośnikiem fosforanowym. Stanowi on około 15 % wszystkich białek osłonowych.

Fosfor spełnia ważne i niezastąpione funkcje w wielu procesach życiowych roślin, można nawet stwierdzić, że nie ma procesu, w którym fosfor nie brałby pośredniego lub bezpośredniego udziału. Jako składnik każdej żywej komórki jest włączony w struktury DNA i RNA [BUDNAKOVA i in. 2002]. Wchodząc w skład DNA jest przenośnikiem informacji genetycznej i jako część RNA jest strukturą odpowiedzialną

za tłumaczenie informacji genetycznej. Fosfor przyczynia się do zwiększenia zawartości azotu w glebie, będąc jedną ze struktur kwasów nukleinowych bierze pośredni udział w biosyntezie białka, aktywuje aminokwasy, które mogą łączyć się w peptydy i polipeptydy, a także bierze udział w redukcji azotanów, które stanowią główne źródło azotu dla roślin. Ponadto fosfor uczestniczy w budowie koenzymów oraz tworzy bogate w energie wiązania, dzięki którym następuje synteza związków wymagających nakładu energii. Główną rolę w transporcie energii mają nukleotydy ATP i ADP [STEINECK i in. 2000]. Energia zawarta w ATP może zostać również przetransmitowana do innych koenzymów (UTP, GTP). Biochemiczny proces fotosyntezy zachodzi pod wpływem dehydrogenazy fosfotrioz, której działanie uwarunkowane jest obecnością zredukowanej formy NADP w obecności ATP. Fosfor bierze udział w procesie oddychania - w glikolizie i cyklu Krebsa, gdzie substratem oddychania mogą być tylko estry fosforanowe cukrów [NOWOTNY-MIECZYŃSKA i in. 1976]. Jego szczególna rola w procesach związanych z gromadzeniem i przenoszeniem energii wiąże się ze specyficznymi właściwości atomu fosforu. Zajmuje on środkową część układu okresowego pierwiastków, dlatego ma odpowiednią zdolność zarówno przyłączania jak i oddawania elektronów. Można zauważyć, że funkcje fizjologiczne fosforu i azotu zazębiają się na różnych szlakach metabolicznych roślin. Przy niedoborze przyswajalnego fosforu w środowisku glebowym, rośliny pobierają małe ilości azotu, natomiast przy zbyt dużej dawce fosforu pobieranie azotu może być zahamowane.

Pobieranie jonów fosforanowych przez system korzeniowy to dominujący czynnik, który określa prawidłowy wzrost i rozwój uprawnych roślin [GRZEBISZ I POTARZYCKI 2004]. Na skutek pobierania fosforu przez rośliny, zmniejsza się stężenie tego pierwiastka w ryzosferze. Następuje ruch dyfuzyjny anionów fosforanowych w kierunku korzenia powodując powstanie tak zwanej strefy wyczerpania wokół korzenia. Niedobór P_i w glebie wywołuje wiele reakcji w roślinie, które dostosowując się do warunków takiego stresu uruchamiają szereg mechanizmów zwiększających pobieranie P_i z podłoża oraz mobilizują P_i z zasobów wewnętrznych. Zmniejsza się koncentracja P_i w wakuoli. Zostaje uruchomiony fosfor ze starszych organów i przetransportowany do młodszych organów. Przyswajalność nieorganicznych form fosforu może być zwiększona wskutek biochemicznych modyfikacji otoczenia korzenia – dzięki wydzielaniu kwasów organicznych, protonów lub związków fenolowych do gleby. Zwiększa się przez to zakwaszenie gleby w strefie korzeniowej. Działanie to ogranicza się jednak tylko do zasięgu systemu korzeniowego. Następuje także indukcja błonowych przenośników

P_i i fosfataz wewnątrzkomórkowych. Wiele zmian dostosowujących rośliny do niedoboru fosforu jest poprzedzonych aktywacją lub represją specyficznych genów. W warunkach deficytu P_i zaobserwowano indukcję genów kodujących transportery P_i w korzeniach, geny kodujące kwaśne fosfatazy [CIERESZKO 2003]. Niedobór fosforu powoduje również wzrost liczby i długości włośników, powiększając powierzchnie korzenia oraz zwiększa się aktywność merystemów korzeniowych [GAHOONIA i in. 1997]. Intensywność pobierania jonów przez korzenie jest proporcjonalna do stężenia soli w roztworze glebowym. Dla jęczmienia stężenie fosforu, powodujące wysycenie jego pobierania odpowiada wartości poniżej 100 $\mu mol\ l^{-1}$.

Fosfor przemieszczany jest w roślinie zarówno przez ksylem jak i przez floem. Zawartość $H_2PO_4^-$ w soku floemu *Lupinus albus* ($mol \cdot m^{-3}$) wynosi 1,25 natomiast w soku ksylemu 10.0. Zapasową formą fosforu w roślinach jest fityna, czyli sól magnezowo – wapniowa kwasu fitynowego, powstająca z mezoinozytolu, przez co fosfor odgrywa kluczowa rolę w katabolizmie i anabolizmie, jak również pełni rolę w transporcie różnych jonów przez błony komórkowe.

Objawy niedoboru fosforu pojawiają się dopiero przy spadku zawartości poniżej 0,1 % P s.m. Do roślin najbardziej wrażliwych na niedobór fosforu zalicza się głównie: kukurydzę, zboża, rośliny kapustne, pomidor, ogórek, sałatę, ziemniak, owoce miękkie, owoce cytrusowe. Niedobór fosforu bardzo często przypomina objawy niedoboru azotu. Zostaje silnie zahamowany wzrost części nadziemnych i podziemnych. Pędy roślin są krótkie i sztywne, a pędów bocznych jest niewiele. Kwitnienie jest ograniczone, przez co zmniejsza się plon ziarna i owoców. Liście stają się matowe, ciemne, niebieskozielone z odcieniem purpurowym lub fioletowym. Przy niedoborze fosforu rośliny zmieniają architekturę korzenia, wydłużając i zagęszczając włośniki korzeniowe [LÓPES-BUCIO i in. 2003]. Nadmiar fosforu spotykany jest rzadko, ponieważ fosforany są silnie sorbowane w glebie i tylko wyjątkowo udostępniane są roślinom w nadmiarze. Objawy nadmiaru fosforu występują w starszych liściach w formie nekroz.

2.3. WPŁYW NAWOŻENIA OBORNIKIEM NA ZAWARTOŚĆ FOSFORU W GLEBIE I ROŚLINACH

Jednym z podstawowych zabiegów agrotechnicznych prowadzących do reprodukcji substancji organicznej w glebach i decydującym o ich żyzności jest nawożenie organiczne [RABIKOWSKA i PISZCZ 1994]. Intensywna uprawa zbóż i roślin okopowych stanowiąca

w Polsce odpowiednio 70% i 20% struktury zasiewów, prowadzi do pomniejszania zasobów glebowej materii organicznej [JANOWIAK i in. 1999]. Obornik i inne klasyczne nawozy organiczne od wieków stanowią podstawowe, a często jedyne źródło fosforu w produkcji roślinnej. Najważniejsze problemy wiążące się z tym źródłem fosforu wynikają ze zmiennej zawartości fosforu (gatunek zwierząt, grupa wiekowa, żywienie) oraz dostępności tego składnika pokarmowego z nawozu. Według MAĆKOWIAKA I ŻEBROWSKIEGO [2000] zawartość fosforu w oborniku bydlęcym to 1,2 $g \cdot kg^{-1}$ świeżej masy, trzody chlewnej 1,9 $g \cdot kg^{-1}$ świeżej masy. Obornik jest nawozem organicznym, zawierającym wszystkie niezbędne dla roślin składniki pokarmowe. Produkowany jest przez zmieszanie ze ściółką słomową stałych i płynnych odchodów zwierząt. Średnia zawartość składników pokarmowych przy zawartości 75% H_2O wynosi: 0,5% N; 0,3% P; 0,7% K; 0,05%Ca; 0,19% Mg. Wykorzystanie przez rośliny składników pokarmowych z obornika zależy od rodzaju gleby i terminu przyorania obornika, uprawianej rośliny oraz od ilości i przebiegu opadów atmosferycznych. Według CZUBY [1996] wykorzystanie fosforu z obornika przez rośliny w pierwszym roku wynosi 20-25%, a w ciągu rotacji dochodzi do 65-70%, zależy to od zasobności gleby w przyswajalną formę tego składnika. Obornik stosuje się głównie jesienią i wiosną, jedynie pod rzepak latem. Na glebach ciężkich i średnio ciężkich uzasadnione jest stosowanie obornika jesienią, natomiast na utworach lekkich i średnio lekkich wiosną [GORLACH i MAZUR 2002]. Dodatek materii organicznej do gleby wzmaga proces pobierania fosforanów przez rośliny. Produkty powstające w trakcie rozkładu materii organicznej oraz kwasy organiczne zawarte w nawozach naturalnych przyczyniają się do zwiększenia dostępności trudno rozpuszczalnych ortofosforanów wapnia, gdyż wiążąc kationy Al i Fe, uwalniają jednocześnie fosfor do roztworu glebowego [POTARZYCKI 2003]. Aktywne formy Al i Fe zostają unieruchomione i następuje minimalizacja ujemnego wpływu tych pierwiastków na rośliny. W miarę degradacji związków organicznych tworzą się struktury chelatowe, przez co zostają usunięte z roztworu jony Ca^{2+} oraz inne kationy wielowartościowe i zmniejsza się możliwość ich reagowania z jonami fosforanowymi [NOWOTNY-MIECZYŃSKA i in. 1976]. Obornik jest nawozem łagodzącym skutki niezrównoważonego nawożenia mineralnego [ŁABĘTOWICZ i in. 1999], które prowadzi do wyczerpania gleby ze składników pokarmowych oraz silnego jej zakwaszenia [STĘPIEŃ i in. 2002]. Na glebach o nadmiernie wysokich wartościach pH, obornik może zwiększyć ich kwasowości, dzięki tworzeniu kwasów organicznych i kwasu węglowego w wyniku hydrolizy i dalszej mineralizacji związków organicznych. Według KUCHARSKIEGO [1992]

nawożenie obornikiem może zmieniać niektóre właściwości fizyko – chemiczne i biochemiczne gleb.

Nawozy naturalne (obornik i gnojowica) są łatwo dostępnym źródłem fosforu dla roślin, gdyż w zależności od stopnia mineralizacji, 50 – 70 % całego fosforu zawartego w tych nawozach występuje w związkach mineralnych, głównie jako fosforany wapnia [POTARZYCKI 2003]. Fosfor występuje w oborniku w podobnych związkach organicznych jak w roślinie. W czasie fermentacji obornika, organiczne związki fosforu ulegają mineralizacji i tworzy się kwas ortofosforowy lub jego sole. Związki te słabo przemieszczają się do głębszych warstw gleby i nie są wymywane. Stosowanie fosforu w dużych dawkach zwłaszcza w nawozach organicznych powoduje nagromadzenie się jego w postaci różnych związków mineralnych i organicznych, głównie w warstwie gleby, do której został wprowadzony. Ze związków tych do roztworu glebowego, w następnych latach zostaje uwolniony fosfor dostępny dla roślin, głównie w wyniku zmiany odczynu gleby [MERCIK i in. 1998]. Z obornikiem wprowadza się nieco więcej fosforu niż z nawozami mineralnymi, ale rośliny pobierają więcej tego składnika pokarmowego dostarczonego w nawozach mineralnych. Pod wpływem nawożenia organicznego wzrasta zawartość labilnych form fosforu, fosforanów glinu i wapnia w glebie. Wzrost labilnych form fosforu pod wpływem obornika można tłumaczyć większą mineralizacją substancji organicznej [GRZEBISZ i in. 1993]. Wykorzystanie fosforu z obornika zależy od pH gleby, ponieważ kwas fosforowy powstały na skutek mineralizacji związków organicznych tworzy sole wapnia, żelaza lub glinu, w zależności od odczynu gleby, które są w różnym stopniu dostępne dla roślin. Znaczący jest wpływ nawożenia obornikiem na gromadzenie się fosforu związków organicznych w glebie. Stosowanie obornika z pewnością ma wpływ na przyswajalność fosforu, ponieważ obecny w oborniku węgiel wpływa na uwalnianie fosforu z połączeń organicznych. Im mniej fosforu w glebie, tym większe prawdopodobieństwo jego unieruchomienia w połączeniach organicznych [CZUBA 1996]. Jak podają ŁABĘTOWICZ i in. [1998(a)], oraz SZYMAŃSKA i in. [2005] wieloletnie stosowanie obornika wyraźnie wpływa na wzrost poziomu fosforu przyswajalnego w glebie. W literaturze można spotkać opinie o większej ruchliwości związków fosforu z obornika, niż z nawozów mineralnych [MOSKAL i in. 1999]. BLACKE i in. 2000 twierdzą, że wykorzystanie fosforu przez rośliny uprawne jest większe z obornika niż z nawozów mineralnych. Według CZUBY [2001] wykorzystanie to dochodzi do 40% ogólnej zawartości fosforu w tym nawozie. Natomiast w badaniach DOMSKIEJ

I WOJTKOWIAK [2000] wykazano, że w glebach nawożonych przez 24 lata nawozami organicznymi zmniejszyła się zawartość przyswajalnych form fosforu.

RABIKOWSKA [1999] stwierdziła, że w warunkach nawożenia obornikiem, niezależnie od sposobu stosowania go w określonej rotacji, w kukurydzy istotnie więcej oznaczono azotu, fosforu oraz potasu. Nawożenie obornikiem wyraźnie przyczyniło się do zwiększenia ilości fosforu pobranego przez kukurydzę (średnio o 37%). Wiązać to należy z większą zasobnością gleby z obiektów nawożonych tym nawozem w wieloleciu. Również TRAWCZYŃSKI [2002] w swoich badaniach stwierdził, że zawartość fosforu w bulwach ziemniaka pobranych z obiektów nawożonych obornikiem była istotnie wyższa w porównaniu do obiektów nawożonych mineralnie. Natomiast z badań STĘPNIA i in. [2002] wynika, że nawożenie obornikiem wywarło mniejszy wpływ na zawartość fosforu w roślinach niż wieloletnie nawożenia superfosfatem. Autorzy wiążą to z tak zwanym „efektem rozcieńczenia" fosforu w roślinie przy wyższym plonowaniu na poletkach nawożonych nawozem organicznym.

2.4. ODDZIAŁYWANIE NAWOŻENIA AZOTEM MINERALNYM NA ZAWARTOŚĆ FOSFORU W GLEBIE I ROŚLINACH

Nawożenie azotowe stosowane w optymalnych dawkach i proporcjach, oprócz wyraźnego wpływu na plon roślin, decyduje w znacznym stopniu o składzie chemicznym pozyskiwanej biomasy. Zależność między zawartością azotu i fosforu w glebach jest zaliczana do najważniejszych interakcji fosforu z innymi składnikami pokarmowymi [RABIKOWSKA I PISZCZ 1998]. Stan odżywienia rośliny azotem decyduje o pobieraniu fosforu. Związki zawierające fosfor biorą udział w prawie wszystkich etapach przemian substancji azotowych, dlatego też zachowanie właściwego stosunku N i P w odżywianiu się roślin jest jednym z podstawowych warunków prawidłowego przebiegu procesów metabolicznych. Oba pierwiastki są włączone w proces fotosyntezy, syntezy białek oraz wiązania N_2. Nadmiar azotu przy braku fosforu wywołuje pierwsze objawy niedoboru P – pojawienie się małych, intensywnie zielonych liści. Niedobór azotu w glebie ogranicza plonowanie roślin [GORLACH I MAZUR 2002]. W warunkach intensywnej produkcji roślinnej pojawiły się tendencje do zwiększania poziomu nawożenia azotowego, bez zachowania tradycyjnie ustalonych proporcji do pozostałych składników pokarmowych. Może to dać negatywny efekt w rozwoju roślin, gdyż jak wiadomo nawożenie azotem wymaga ustalenia odpowiednich proporcji także fosforu i potasu.

RABIKOWSKA [1999], RABIKOWSKA I PISZCZ [2000] stwierdzają, że wieloletnie stosowanie wzrastających dawek azotu (maksymalnie do 210 $kgN \cdot ha^{-1}$) powoduje obniżenie żyzności gleby, zwiększenia jej zakwaszenia, obniżenia udziału kationów zasadowych w pojemności sorpcyjnej oraz przyczynia się do zmniejszenia zawartości ruchomych form składników pokarmowych, w tym fosforu. Wszystkie nawozy azotowe z wyjątkiem saletrzaku oraz saletry wapniowej i sadowej, zakwaszają środowisko glebowe. Azot, występujący w postaci jonu NH_4^+ sprzyja pobieraniu fosforu przez roślinę, gdyż pobieraniu tego kationu towarzyszy zazwyczaj równoważne wydzielanie jonów H^+ przez korzenie roślin [FILIPEK 2001]. Z kolei aniony NO_3^- obniżają pobieranie fosforu. To działanie może być niekiedy tak silne, że zastosowanie saletry, przy niskiej zawartości w glebie fosforu przyswajalnego może nawet doprowadzić do wystąpienia niedoboru fosforu w roślinach [CZUBA 1996]. Jeśli azot wprowadzany jest do gleby w postaci azotanu sodu, rośliny chętniej pobierają z niej jony NO_3^-, wskutek czego odczyn gleby staje się z czasem zasadowy. Mocznik i saletra amonowa – związki o pH obojętnym, wykazują w glebie odczyn fizjologicznie kwaśny. Przyczyną tego jest nitryfikacja azotu amonowego przez bakterie, w wyniku czego powstaje kwas azotowy [FILIPEK 2001]. To oddziaływanie na pH w konsekwencji wpływa na dostępność fosforu dla roślin, gdyż pierwiastek ten jest szczególnie wrażliwy na zmiany odczynu gleby. Optimum rozpuszczalności mineralnych fosforanów uzyskano w zakresie pH 5 - 6. Wywołane zmiany kwasowości gleby powodują zmniejszenie zawartości fosforu przyswajalnego [CARREIRA i in. 2000]. W glebie o pH w zakresie 5,6 - 6,4 uzyskano najwyższą zawartość fosforu przyswajalnego dla roślin, natomiast w przedziale pH 4,4 - 5,4 ilość była najniższa. W glebach kwaśnych fosforany tworzą z żelazem, glinem i manganem bardzo złożone i nierozpuszczalne związki. W warunkach niskiego odczynu gleby następuje zahamowanie wzrostu korzenia, fosfor może ulec uwstecznieniu. Zmniejsza się również dostępność innych składników pokarmowych, które w sposób pośredni wywierają wpływ na metabolizm komórki. W glebach zasadowych tworzą się kompleksowe, nierozpuszczalne i trudno przyswajalne fosforany wapnia. Negatywne oddziaływanie azotu wynika z jego wpływu na wzrost plonów i wynikające stąd większe pobranie fosforu. Zakwaszająca działalność nawozów azotowych sprzyja również procesom uwsteczniania fosforu, czyli przechodzenia w formy trudno dostępne dla roślin.

2.5. ENZYMY – ICH ROLA I WYSTĘPOWANIE

W glebie znajdują się enzymy ze wszystkich sześciu klas, jednak najważniejszą rolę w biogeochemii gleb odgrywają enzymy należące do oksydoreduktaz i hydrolaz. Enzymy są szczególnymi cząsteczkami, które determinują wszystkie chemiczne przekształcenia zachodzące w komórkach roślin i fauny glebowej. Wiążą one jeden lub więcej substratów i zmieniają je w zmodyfikowane chemicznie produkty, powtarzając te czynności wielokrotnie i bardzo szybko. Enzymy czyli biokatalizatory przyspieszają reakcje przy czym same nie ulegają zmianie, pozwalają w komórce tworzyć lub rozrywać różnorodne wiązania zgodnie z aktualnym zapotrzebowaniem. Enzymatyczne katalizowanie zorganizowanych układów reakcji chemicznych tworzy i podtrzymuje komórkę, umożliwiając jej życie [ALBERTS i in. 1999]. Pod względem chemicznym wszystkie poznane enzymy należą do białek prostych lub złożonych. Wiele z nich zostało wyodrębnione metodami chemii białek w czystej postaci krystalicznej.

Termin *enzym* (gr. *ensyme*: *en* – *w*, *syme* – *drożdże*) został wprowadzony przez Wiliama Kuhne około 1836 roku. Równolegle Jöns Jakob Berzelius ogłosił klasyczną teorię katalizy chemicznej, w osiem lat później Lebieg sygnalizował zjawisko katalitycznej działalności gleby. Pierwszym otrzymanym z gleby enzymem, była wyizolowana w 1926 roku przez Sumera ureaza, zaś w 1953 roku ustalono sekwencję aminokwasową pierwszego enzymu – rybonukleazy.

Wszystkie biochemiczne przemiany zachodzące w glebie wiążą się z obecnością enzymów. Różnice aktywności enzymatycznej gleby spowodowane są typem gleby, zawartością materii organicznej, intensywnością biologicznych procesów. Działanie enzymów jest specyficzne: reagują one ze ściśle określonym produktem pośrednim w przemianie materii. DICK i in. [2000] uważają, że enzymy glebowe pełnią ważne funkcje, gdyż są włączone w cykl obiegu substancji odżywczych dla roślin i odzwierciedlają biochemiczną i mikrobiologiczną aktywność gleby, będąc jednocześnie miernikiem jej żyzności. W badaniach enzymatycznych gleb poszukuje się enzymów, których aktywność może służyć jako „wskaźnik żyzności gleby", pozwalający ocenić dostępność występujących w glebie związków pokarmowych dla roślin.

Gleba zawiera zawsze pewien zasób wolnych enzymów. Są one pochodzenia biologicznego: egzoenzymy - wydalane przez komórki organizmów żywych i endoenzymy – uwalniane w procesach litycznych [RUSSEL 2005]. Bezpośrednich dowodów na obecność w glebie enzymów pochodzenia roślinnego dostarczają obserwacje mikroskopowe.

Przykładowo w komórkach ryzodermy i czapeczki korzenia, a także w wydzielinach pokrywających korzenie roślin, zaobserwowano białko enzymatyczne, które wykazuje aktywność fosfatazy kwaśnej [FOSTER i DORMAAR 1991].

Mikroorganizmy wydzielają czynnie do środowiska glebowego bardzo dużo rożnych enzymów, ale najważniejszymi w procesach przemian zachodzących w środowisku gleb uprawnych są te, które biorą udział w cyklicznych przemianach azotu, fosforu i siarki. W ten sposób mikroorganizmy glebowe mogą zmieniać skład chemiczny i właściwości fizyczne własnej niszy ekologicznej. Fosfataza wewnątrzkomórkowa drobnoustrojów, może pełnić ważniejszą rolę niż pozakomórkowa. Jednakże w środowisku glebowym, w warunkach niekorzystnych dla aktywności życiowej mikroorganizmów, takich jak susza lub ograniczenie dostępności substratów węglowych, fosfataza pozakomórkowa odgrywa istotną rolę w stałej mineralizacji materii organicznej [KIELISZEWSKA – ROKICKA 2001].

Enzymy glebowe są naturalnymi mediatorami i katalizatorami wielu ważnych procesów glebowych takich jak rozkład wprowadzonej do gleby substancji organicznej, reakcje powstawania i rozkładu próchnicy, uwalnianie i udostępnianie roślinom substancji mineralnych, detoksykacja ksenobiotyków [AJAWA i in. 1999, RUSSEL 2005].

Badając aktywność enzymatyczną można określić kierunek i intensywność przemian substancji organicznej i mineralnej, środowiska glebowego. Wysoka aktywność enzymatyczna gleby powoduje wzrost żyzności. Żyzność warunkuje współudział gleby we wzroście i rozwoju roślin, jest związana zarówno z jej zasobnością jak i urodzajnością [KUCHARSKI 1997]. Aktywność enzymatyczna gleby w dużym stopniu jest uwarunkowana od jej właściwości chemicznych. Te z kolei są wynikiem stosowanej agrotechniki z różną intensywnością nawożenia i sposobami uprawy. Jako użyteczne „wskaźniki żyzności" gleby wymienia się fosfatazę alkaliczną, amidazę i katalazę, które wykazują ścisły związek z oddychaniem i biomasą mikroorganizmów glebowych [FRAKENBERGER i DICK 1983]. Fosfataza kwaśna jest pozytywnie skorelowana z biomasą bakterii i całkowitą długością grzybni w glebie [KUPERMAN i CARREIRI 1997].

Głównym źródłem fosfataz glebowych są korzenie roślin ich resztki, grzyby, mikroorganizmy i bakterie [GEORGE i in. 2002]. Korzenie roślin są głównym źródłem fosfatazy kwaśnej [SPEIR i COWLING 1991, DINKELAKER i MARSCHNER 1992], natomiast fosfataza alkaliczna jest wytwarzana przez mikroorganizmy glebowe (*Aspergillus, Penicillum, Rhizopus, Bacillus i Pseudomonas)* oraz grzyby mikorytyczne [TARAFDAR i CLASSEN 1988, KRÄMER i GREEN 2000]. Korzenie roślin wydzielają fosfatazę nazywaną

pozakomórkową, która jest odpowiedzialna za hydrolizę organicznych połączeń fosforu. Natomiast śródkomórkowe kwaśne fosfatazy obecne w cytoplazmie, plastydach i wakuolach są odpowiedzialne za hydrolizę organicznych połączeń fosforu i przemieszczenie nieorganicznych połączeń od starzejących się tkanek [LEE 1988]. Sekrecja fosfatazy jest stymulowana przez dwuwartościowe kationy Ca^{2+} i Mg^{2+} i przebiega dwuetapowo. W pierwszej fazie uwalniany jest do środowiska enzym obecny w ścianie komórkowej. W drugiej fazie następuje aktywny transport fosfatazy z wnętrza komórki poprzez barierę energetyczna jaką stanowi plazmalemma. Rośliny zwykle wydzielają kwaśną fosfatazę do gleby gdy dostępność przyswajalnego dla nich fosforu jest niska, jednakże poszczególne gatunki roślin różnią się co do ilości, jak i aktywności wydzielanego enzymu [FUKUDA i in. 2001]. W miarę oddalania się od korzenia aktywność fosfatazowa gwałtownie maleje [GEORGE i in. 2002].

2.5.1. WPŁYW NAWOŻENIA OBORNIKIEM NA AKTYWNOŚĆ FOSFATAZOWĄ W GLEBIE I ROŚLINIE

Według DICK'A [1992] aktywność fosfatazową w glebie podnosi dodanie do niej materii organicznej. COLVAN i in. [2001] stwierdzili istotny wpływ nawożenia gleby obornikiem bydlęcym na aktywność fosfomonoesteraz i fosfodiesteraz. Według KUCHARSKIEGO I WAŁDOWSKIEJ [2001] substancja organiczna wprowadzona do gleby jest jednym z czynników stymulujących rozwój mikroorganizmów, które odgrywają ważną rolę w przepływie energii i krążeniu biogennych pierwiastków w agroekosystemie.

CHEN [2003] stwierdził, ze wzrostowi aktywności fosfatazy towarzyszy równocześnie wzrost uwalniania fosforanów z organicznych związków fosforowych. Dodatnie korelacje między aktywnością fosfataz a frakcjami fosforu wskazują na to, że fosfatazy mogłyby być stosowane jako wskaźnik zawartości fosforu w glebach [NANNIPIERI i in. 1990, AMADOR i in. 1997]. Zwiększone wydzielanie fosfatazy kwaśnej przez korzenie w odpowiedzi na niedobór fosforu może wskazywać, że stan ten wspomaga uwalnianie tego pierwiastka z organicznego kompleksu glebowego. Wpływ wieloletniego nawożenia obornikiem na aktywność fosfatazy alkalicznej i kwaśnej oraz zawartość fosforu w glebie badali PARHAM i in. [2002]. Aktywność badanych fosfomonoesteraz była istotnie wyższa w glebie nawożonej obornikiem w porównaniu do aktywności tych enzymów w glebie nawożonej mineralnie. Obornik istotnie wpłynął na działalność mikroorganizmów oraz cykl biogeochemiczny fosforu. Aktywność enzymów glebowych jest w dużym

stopniu związana z zawartością C_{org}, który jest jednym z ważnych i nie kwestionowanych wskaźników żyzności gleb [MAĆKOWIAK I ŻEBROWSKI 1999]. Jak powszechnie wiadomo, zawartość węgla związków organicznych decyduje o tempie rozwoju mikroorganizmów, które stanowią główne źródło wielu enzymów glebowych. Według KOBUSA [1995] aktywność enzymatyczna jest ściśle związana przede wszystkim z poziomem materii organicznej i dlatego nie zawsze jest odbiciem stanu zawartości składników pokarmowych w glebie wniesionej do środowiska na przykład z nawożeniem mineralnym. Na efektywność nawożenia składa się miedzy innymi współczynnik wykorzystania poszczególnych składników pokarmowych przez roślinę, co z kolei w dużej mierze zależne jest od aktywności enzymatycznej gleby. Natomiast enzymy do przeprowadzenia reakcji chemicznych wymagają przede wszystkim odpowiedniego stężenia substratu, więc ingerencja w skład chemiczny gleby poprzez nawożenie obornikiem da wyraz w efektywności działania enzymów glebowych.

2.5.2. KSZTAŁTOWANIE SIĘ AKTYWNOŚCI FOSFATAZOWEJ W GLEBIE I W ROŚLINACH POD WPŁYWEM NAWOŻENIA AZOTEM MINERALNYM

Nawozy mineralne mające kwaśny charakter, poprzez wzrost stanu zakwaszenia gleby, decydują zarówno o przyswajalności składników pokarmowych, rozwoju roślin, mikroorganizmów jak i kierunku procesów biochemicznych. W przypadku białek enzymatycznych, kwasowość środowiska może wpłynąć na ich aktywność przez zmianę struktury lub przez zmianę ładunku reszty aminokwasowej, biorącej udział w przyłączaniu substratu lub katalizie. Jednymi z najbardziej wrażliwych enzymów na zmiany wartości pH środowiska są fosfomonoesterazy. Fosfataza kwaśna dominuje w glebach kwaśnych, a alkaliczna przeważa w glebach o pH zasadowym [DICK I TABATABAI 1984]. Jako odpowiedni zakres wartości pH gleby dla wzrostu i rozwoju roślin można uważać taką jego wartość, przy której występuje właściwy stosunek aktywności obu fosfataz [DICK I TABATABAI 1999]. Odczyn gleby decyduje o liczebności i różnorodności mikroorganizmów glebowych oraz aktywności enzymów syntetyzowanych przez te mikroorganizmy. W glebach silnie zakwaszonych aktywność enzymatyczna znacznie spada, zmniejsza się szybkość rozkładu organicznych związków węgla, fosforu, azotu, siarki, a przez to spowolniony jest obieg biogenów w agroekosystemie, którego produktywność w efekcie znacznie się obniża [FILIPEK 2001]. Nawożenie mineralne w mniejszym stopniu wzmaga namnażanie drobnoustrojów niż organiczne, dlatego

również wpływ nawożenia mineralnego na aktywność enzymatyczną gleby jest mniejszy niż nawożenia organicznego [KUCHARSKI 1997]. Wielu autorów stwierdza, że nawożenie azotowe z reguły stymuluje aktywność obu izozymów fosfatazy glebowej [GIANFREDA I BOLLAG 1996, DICK I TABATABAI 1999, COLVAN i in. 2001]. Jednak zbyt wysokie nawożenie azotem (dawka 240 kg· ha^{-1}) prowadzi do silnego ograniczenia aktywności enzymatycznej [KUCHARSKI 1997].

2.6. WPŁYW DOBORU ROŚLIN W ZMIANOWANIU NA KSZTAŁTOWANIE SIĘ ZAWARTOŚCI FOSFORU I AKTYWNOŚCI FOSFATAZ

Zmianowanie zaplanowane w gospodarstwie na kilka lat określa się jako płodozmian. Właściwe zmianowanie powinno zwiększyć żyzność gleby i stwarzać dobre warunki do rozwoju roślin w celu uzyskania odpowiedniego plonu. Wpływ zaminowania na żyzność gleby najczęściej ocenia się na podstawie jego oddziaływania na ilość i jakość związków próchnicznych. Wieloletnie badania wykazały, że uproszczone zmianowanie, a głównie uprawa roślin w monokulturze, nawet w przypadku roślin motylkowych, może prowadzić do „zmęczenia gleby" [DĘBSKA 2003]. Zboża powszechnie zalicza się do roślin obniżających żyzność gleby z uwagi na krótkotrwałe jej zacienienie oraz to, że dają stosunkowo małą ilość i niską wartość resztek pożniwnych. Rośliny można też podzielić w zależności od tego czy po ich zbiorze następuje w glebie przyrost czy ubytek węgla związków organicznych, na wzbogacające i zubożające glebę w ten składnik [MAĆKOWIAK I ŻEBROWSKI 1999]. Nie ulega wątpliwości, że najwięcej resztek pozostaje po sprzęcie roślin motylkowych, mniej po zbożach, a najmniej pozostawiają po sobie rośliny okopowe. Resztki pozbiorowe składają się w 60 – 80 % z korzeni, których główna masa znajduje się w warstwie 0 – 0,3 m gleby, pozostałą część (20 – 40 %) stanowi ścierń i ściółka [DĘBSKA 2003]. Wiadomo, że skład ilościowy i jakościowy wydzielin korzeniowych, oraz resztek roślinnych kształtuje w dużej mierze aktywność enzymatyczną. Według KRAUZE [1995] wynoszenie z gleb poszczególnych pierwiastków zależało od kolejności uprawy danego gatunku w płodozmianie. Buraki cukrowe bez nawożenia jak i uprawiane na oborniku pozostawiały glebę zasobniejszą w fosfor. Podobny korzystny wpływ wywierał bobik. Natomiast pszenica, w tych warunkach, wyczerpywała glebę z przyswajalnego fosforu, w mniejszym zaś stopniu jęczmień, ponieważ zajmował pole po buraku cukrowym. Rośliny oddziałują na przebieg rozkładu i syntezy próchnicy w glebie w ciągu całego okresu wegetacji, co wiąże się niewątpliwie z intensywnością uprawy mechanicznej.

Na podstawie badań MAĆKOWIAKA I ŻEBROWSKIEGO [1999], DĘBSKIEJ I GONETA [2001] stwierdzono, że zawartość węgla związków organicznych w glebie ze zmianowania wzbogacającego była znacznie wyższa w porównaniu do zawartości C_{org} w glebie ze zmianowania zubożającego. Należy podkreślić fakt, że masa organiczna, jaką wzbogacają resztki uprawianych roślin motylkowych i zbożowych dorównuje masie obornika stosowanego w średnich i dużych dawkach (w przeliczeniu na suchą masę) [DĘBSKA 2003]. Ze względu na równoległość przemian węgla i azotu w glebie, czynnikiem decydującym o nasileniu procesów mineralizacji jest stosunek węgla do azotu. Dla większości gleb w poziomie próchnicznym wartość stosunku C:N wynosi 8 - 15. Przy wąskich wartościach tego stosunku następuje intensyfikacja mineralizacji azotu wykorzystywanego przez rośliny. Na przebieg procesów mineralizacji ma również wpływ fosfor, który może być głównym pierwiastkiem limitującym szybkość początkowej fazy mineralizacji.

Aktywność enzymów glebowych jest kształtowana tymi samymi czynnikami, które oddziałują na liczebność drobnoustrojów. Gleby uprawne zasobne w substancję organiczną stanowiącą dobre źródło węgla dla drobnoustrojów, charakteryzują się zwykle większą aktywnością biologiczną, a tym samym wyższą aktywnością enzymatyczną [KUCHARSKI i in. 1996].

2.7. ZMIANY ZAWARTOŚCI FOSFORU ORAZ AKTYWNOŚCI FOSFATAZOWEJ W SEZONIE WEGETACYJNYM ROŚLIN

Pobieranie fosforu przez roślinę nie odbywa się równomiernie w ciągu całej wegetacji roślin. Występują okresy silniejszego i słabszego pobierania tego składnika pokarmowego. Początkowo ilości pobieranego fosforu nie są zbyt duże, później silnie wzrastają, aż do osiągnięcia pewnego maksimum, po czym znów maleją. Maksimum pobierania fosforu u roślin zbożowych przypada na okres strzelania w źdźbło i kłoszenia. Ma to związek ze szczególną rolą jaką fosfor odgrywa w dwóch lecz czasowo odległych fazach rozwojowych rośliny. Pierwsza występuje na początku rozwoju, gdzie fosfor decyduje o szybkości wzrostu systemu korzeniowego i tym samym określa zdolność rośliny do pobierania wody i składników mineralnych z gleby. W grupie roślin zbożowych występuje także drugi termin szczególnej wrażliwości na niedobór fosforu i przypada na fazę tworzenia plonu generatywnego [GAJ I GRZEBISZ 2003]. Zwykle organy generatywne zawierają więcej fosforu występującego w związkach organicznych

niż organy wegetatywne. Młode liście są bogatsze w ten składnik niż liście stare. W młodych liściach odbywa się bowiem fotosynteza, oddychanie, synteza aminokwasów i białek, kwasów nukleinowych. Procesy te wymagają obecności nieorganicznego fosforu, który zostaje stopniowo wbudowany w związki organiczne. Począwszy od fazy krzewienia, następuje systematyczny spadek zawartości fosforu w organach wegetatywnych. Jest to związane z akumulacją tego pierwiastka w organach zapasowych (nasionach, ziarnie). Ziarno zbóż akumuluje do 70 % pobranego fosforu, a nasiona roślin strączkowych do 50 % [GAJ I GRZEBISZ 2003]. Najniższe stężenie fosforu w roztworze glebowym występuje w okresie wiosennym, przed nawożeniem oraz w okresie intensywnego wzrostu i pobierania fosforu przez roślinę. U roślin gromadzących skrobię jako materiał zapasowy zachodzi w okresie dojrzewania szybkie zmniejszanie się ilości fosforu połączeń nieorganicznych, a zwiększanie się zawartości fosforu związków organicznych. Synteza skrobi wymaga fosforylacji cząsteczek glukozy, tak więc dobre zaopatrzenie roślin w fosfor warunkuje właściwą produkcję węglowodanów.

Na zawartość fosforu w glebie i aktywność fosfatazową znacząco wpływa również wilgotność gleby [SPEIR I COWLING 1991, GRZEBISZ I POTARZYCKI 2003]. W miarę zmniejszania się uwilgotnienia gleby, zwiększa się udział porów glebowych wypełnionych powietrzem, przez co przewodzenie wody i dyfundujących składników pokarmowych jest utrudnione, lecz nadmiar wody zmniejsza zawartość tlenu i także zmniejsza pobieranie fosforu. Okresowe przesuszenie gleb może powodować rozwój mikroflory i jednocześnie wydzielanie enzymów do środowiska oraz aktywację enzymów zawartych w glebie. Również temperatura wpływa na dostępność fosforu glebowego dla roślin. Zbyt niska temperatura zmniejsza tempo mineralizacji fosforu związków organicznych poprzez redukcję aktywności mikroorganizmów biorących udział w udostępnianiu fosforu dla roślin, a tym samym zmniejsza się wydzielanie fosfatazy alkalicznej i kwaśnej. Wysoką aktywność fosfatazową w glebie pobranej wiosną stwierdzili GIANFREDA I BOLLAG [1996]. Również NAGARAJA i in. [1998] zaobserwowali wzrost jej aktywności w glebie pobranej wiosną i latem oraz spadek w próbkach analizowanych jesienią. Wielu autorów stwierdza najwyższą aktywność omawianego enzymu w ostatniej fazie rozwojowej badanych roślin [KARCZMARCZYK I in. 1993, SMOLIK I NOWAK 2003]. FERENS I MORAWIECKA [1984] tłumaczą wyraźne zmiany aktywności fosfatazowej w okresie starzenia się tkanek roślinnych, zmianą stopnia agregacji cząsteczki lub syntezą enzymu *de novo*. Wzrost aktywności może być związany z udziałem fosfatazy w autolizie komórek, poprzedzonej zmianami przepuszczalności błon i uwalnianiem enzymu

ze struktur lizosomalnych do cytoplazmy. Rośliny zaczynają wytwarzać fosfatazę kwaśną wraz z pojawieniem się pierwszych korzeni [YADAV I TARAFDAR 2001]. JONIER I JAKOBSEN [1995] wykazali, że korzenie młodych, intensywnie rozwijających się roślin charakteryzują się wysoką aktywnością fosfatazy kwaśnej. Aktywność fosfataz w tkankach rośliny wzrasta również w warunkach niedoboru fosforu w podłożu. Wzrost aktywności fosfatazowej można zaobserwować w fazie imbibicji oraz we wczesnych fazach kiełkowania nasion., kiedy aktywność enzymatyczna pozostaje pod kontrolą kwasu giberelinowego. Kwas ten stymuluje syntezę enzymu i jego wydzielanie na zewnątrz komórki. [FERENS I MORAWIECKA 1984, OLCZAK 1996].

2.8. CHARAKTERYSTYKA WYBRANYCH FRAKCJI FOSFORU I FOSFOMONOESTERAZ

2.8.1. FOSFOR ZWIĄZKÓW ORGANICZNYCH W GLEBIE I W ROŚLINIE

Fosfor występujący w związkach organicznych stanowi 30 - 50 % fosforu ogółem w glebach uprawnych może się on jednak wahać się 5 – 95 % [KOPER 1996]. Głównym źródłem tej frakcji fosforu w glebie są szczątki roślinne, zwierzęce a także stosowane nawozy organiczne. Fosfor związków organicznych gromadzi się głównie w wierzchniej warstwie gleby i wraz z głębokością jego ilość maleje. Fosfor związany organicznie występuje głównie jako fityniany lub formy pokrewne, kwasy nukleinowe i ich pochodne oraz fosfolipidy [PAUL I CLARK 2000]. Wiele badań wykazuje, że P fosfolipidowy i kwasów nukleinowych stanowi zwykle niewielką część fosforu związków organicznych. Jeszcze mniejszy procent stanowią fosforany cukrów. Przeważająca ilość fosforu związków organicznych to związki inozytolu (10 – 50 % P_{org}), fosfolipidy (1-5 %) i kwasy nukleinowe (do 2,5 %) [POTARZYCKI 2003]. Dostępność fosforu związków organicznych dla roślin nie zależy od ogólnej zawartości związków organicznych, ale od tempa ich mineralizacji. Głębsze warstwy gleby zwykle zawierają mniejszą ilość organicznych połączeń fosforowych w porównaniu do warstw wierzchnich. Związane jest to z rozmieszczeniem substancji organicznych w profilu glebowym.

Fosfor w roślinach występuje zarówno w nieorganicznej formie jako ortofosforan (V) H_3PO_4 i w mniejszej ilości jako pirofosforan (V) $H_4P_2O_7$ oraz w postaci związków organicznych, z których jedne spełniają rolę substancji zapasowych, inne zaś biorą udział w różnorodnych procesach fizjologicznych komórki. Głównymi związkami organicznymi zawierającymi fosfor są: fosfatydy (na przykład lecytyna), związki fitynowe (na przykład

fityna), kwasy nukleinowe (DNA, RNA). Ponadto nukleotydy magazynujące i przenoszące energie (ATP, UTP), transportujące wodór w procesach oksydoredukcyjnych (NAD, NADP, FAD, FMN), oraz przenoszące grupy czynne (na przykład CoA), a także estry fosforanowe cukrów (na przykład fruktozo – 1,6 – bis fosforan).

2.8.2. Fosfor przyswajalny

Dla określenia ilości fosforu jaka może być wykorzystana przez rośliny, używa się często terminu „fosfor przyswajalny". Jest to określenie mało precyzyjne i odnosi się zazwyczaj do ilości fosforu, jaką można ekstrahować z gleby różnymi rozpuszczalnikami, a która wykazuje często słabą korelację z reakcją roślin na nawożenie tym składnikiem. Fosfor przyswajalny stanowi potencjalne źródło fosforanów w roztworze glebowym, z którego rośliny mogą korzystać w okresie wegetacyjnym [Filipek 2002]. Natężenie przemieszczania się fosforu z fazy stałej do roztworu glebowego zależy w dużej mierze od: wilgotności gleby, odczynu, zawartości substancji organicznej, aktywności mikrobiologicznej i biochemicznej gleby, nawożenia mineralnego i organicznego oraz pory roku [Łabętowicz i Rutkowska 2001].

Udział fosforu przyswajalnego w ogólnej ilości tego składnika znajdującego się w glebie jest niewielki i stanowi najczęściej kilka procent. W niektórych przypadkach stwierdza się, że zawartość fosforu ogółem i przyswajalnego wzrasta wraz ze wzrostem udziału drobnych cząstek glebowych. Zawartość fosforu przyswajalnego w profilach czarnych ziem wzrasta wraz ze wzrostem zawartości części spławialnych, natomiast w glebach brunatnych takiej zależności nie stwierdzono.

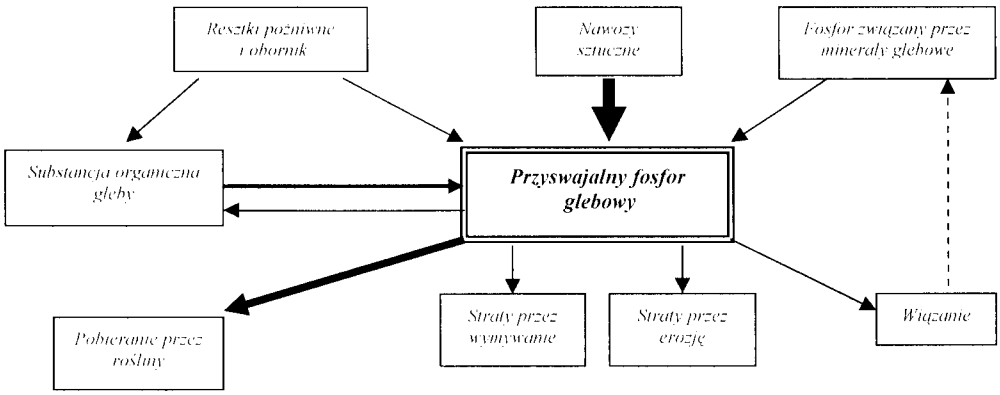
Z przyswajalnością fosforu przez rośliny związane są jego formy: aktywna, ruchoma i zapasowa w glebie.

Fosfor aktywny występuje w roztworze glebowym w postaci jonów fosforanowych:

$$H_3PO_4 = H_2PO_4^- + H^+ = HPO_4^{2-} + 2H^+ = PO_4^{3-} + 3H^+$$

Równowaga tych procesów zależy od wartości pH gleby. W zakresie pH 5 – 7 w roztworze glebowym przeważa jon $H_2PO_4^-$. Jest to zjawisko korzystne, gdyż jon ten jest najłatwiej pobierany przez rośliny. Jednak stężenie tych jonów jest bardzo niewielkie i w glebach nie zanieczyszczonych nie przekracza z reguły 0,5 - 1,5 $mgP \cdot dm^{3-}$, co odpowiada ilości 0,1 – 0,5 kg P w warstwie ornej gleby. Taka ilość fosforu nie wystarcza do pokrycia potrzeb pokarmowych roślin i zasób fosforu w roztworze musi być stale uzupełniany ze stałej fazy gleby [Morel i in. 2000]. Im wyższe stężenie fosforu w roztworze

glebowym, tym sprawniejszy jest mechanizm zaopatrujący rośliny w ten pierwiastek na drodze dyfuzji i w efekcie lepsze zaopatrzenie roślin w fosfor. W praktyce zbyt niskie stężenie fosforu w roztworze glebowym jest czynnikiem ograniczającym jego mobilność. Wzrost stężenia fosforu w roztworze glebowym osiągnąć można poprzez zwiększenie zawartości przyswajalnych form tego składnika w glebie oraz podwyższenie wartości pH w glebach kwaśnych [ŁABĘTOWICZ 2000].



Rysunek 2.2

Przychody i straty przyswajalnego fosforu glebowego [BUCKMAN I BRADY 1971]

Na formę ruchomą fosforu składają się głównie fosforany zaadsorbowane na powierzchni uwodnionych tlenków żelaza i glinu, minerałów ilastych, substancji organicznej i na cząsteczkach węglanu wapniowego, a ponadto świeżo strącone fosforany w postaci niekrystalicznej.

Na przestrzeni ostatnich 30 lat nastąpiła znacząca poprawa zasobności gleb uprawnych w fosfor przyswajalny. O ile w latach 1966 – 1975, około 50 % gleb uprawnych wykazywało bardzo niską lub niską zasobność, to już w latach 1976 - 1993 udział gleb o zbyt niskiej z punktu widzenia agrotechnicznego zasobności, obniżył się do około 30 %. Dominujące znaczenie dla nagromadzenia się w glebie przyswajalnych dla roślin form fosforu ma nawożenie tym składnikiem. Inne składniki pokarmowe wnoszone do gleby w nawozach wpływają w znacznie mniejszym stopniu i tylko pośrednio. Fosfor nie pobrany przez rośliny uzupełnia zapasy tego składnika w glebie, przechodząc w fosforany glinowe, żelazowe bądź wapniowe.

2.8.3. FOSFATAZA ALKALICZNA I FOSFATAZA KWAŚNA – OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA

Termin *„fosfatazy"* jest używany w odniesieniu do szerokiej grupy enzymów, które katalizują hydrolizę estrów i bezwodników kwasu ortofosforowego. Fosfatazy są enzymami należącymi do klasy hydrolaz (3), podklasy enzymów działających na wiązania estrowe (3.1), pod-pod klasy hydrolaz monoestrów fosforanowych [KŁYSZEJKO–STEFANOWICZ 1999].

Podział fosfataz na hydrolazy monoestrów fosforanowych – potoczna nazwa fosfomonoesterazy (EC 3.1.3.), hydrolazy diestrów fosforanowych –fosfodiesterazy (EC 3.1.4.) i hydrolazy triestów fosforanowych –fosfotriesterazy (EC 3.1.5.) jest oparty na liczbie wiązań estrowych odpowiedniego substratu. Enzymy te mają specyficzne nazwy zgodnie ze swoimi substratami lecz są albo hydrolazami monoestrów fosforanowych (EC 3.1.3.), albo hydrolazami diestrów fosforanowych (EC 3.1.4). Do grupy pierwszej należą: fitazy (katalizują hydrolityczne usuwanie wszystkich sześciu grup fosforanowych z najliczniej występującego w glebie (około 50-60%) związku fosforu organicznego – inozytolu sześciofosforanowego lub jego soli), - nukleotydazy (uwalniające fosforany pochodzenia nukleotydowego), fosfatazy cukrowe oraz glicerofosfatazy. Do grupy drugiej należą nukleazy i fosfolipazy. Enzymy te są często określane jako fosfatazy. W środowisku glebowym występują: fosfomonoesterazy (np.: fitazy, glicerofosfatazy, nukleotydazy), fosfodiesterazy, fosfotriesterazy, polifosfatazy (np.: ATP-azy, pirofosfatazy) oraz P-N hydrolazy (np.: fosfoamidazy) [BIELIŃSKA 2005]. Fosfomonoesterazy różnią się od innych fosfataz małą specyficznością względem substratu oraz szerokim zakresem pH dla ich aktywności optymalnej.

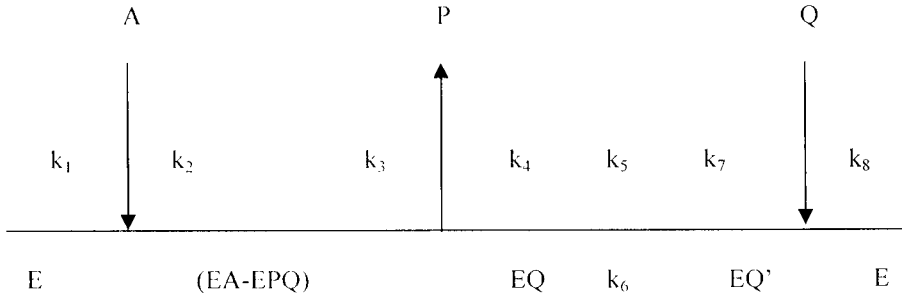
Tradycyjnie fosfatazy zostały sklasyfikowane na alkaliczne (fosfohydrolazy monoestrów ortofosforanowych, EC 3.1.3.1) i kwaśne (fosfohydrolazy monoestrów ortofosforanowych, EC 3.1.3.2) zgodnie z tym czy, optimum ich działania występuje przy pH większym czy też mniejszym od pH 7 [SAROOP i in. 1999]. Wyróżnia się również w glebie fosfatazy obojętne z optimum aktywności przy pH 6,5 – 7. Występujące w przypadku fosfataz szerokie maksimum ich aktywności wynika z obecności mieszaniny kwaśnej i alkalicznej fosfatazy w glebach. Fosfatazy działają według schematu:

$$R - O - PO_3H^- + H_2O \xrightarrow{\textit{Fosfataza}} R - OH + H_2PO_4^-$$

Fosfatazy są podklasą enzymów hydrolizujących estry fosforanowe przez rozerwanie wiązań P –O i przeniesienie reszty fosforanowej na wodę.

Fosfatazy odgrywają podstawową rolę w obiegu fosforu w ekosystemach [SCHNEIDER i in. 2001]. Ich istotna rola polega na utrzymaniu równowagi pomiędzy zawartością fosforu związków nieorganicznych, a fosforem związków organicznych, które biorą udział w metabolizmie roślin [NAWOTNY –MIECZYŃSKA 1976].

Wzrost aktywności fosfatazowej w warunkach zmniejszonej dostępności fosforu bądź też zwiększonego zapotrzebowania na ten pierwiastek sugerują, że fosfatazy biorą udział w regulacji gospodarki fosforanowej roślin [FERENS I MORAWIECKA 1984]. YADAV I TARAFDAR [2001] stwierdzają, że aktywność fosfatazowa gleb, może być zastosowana jako wskaźnik do określania stopnia mineralizacji organicznych związków fosforu.



Rysunek 2.3.

Mechanizm reakcji hydrolizy estrów fosforanowych katalizowanej przez fosfatazę kwaśną [HSU i in. 1966]

Objaśnienia do rysunku 2.3.

A – substrat reakcji
P – pierwszy alkoholowy produkt reakcji
Q – drugi produkt reakcji – fosforan
E – enzym
EA – kompleks enzymu z substratem
EPQ – kompleks enzymu z obydwoma produktami reakcji
EQ – kompleks enzymu z drugim produktem
EQ' – kompleks enzymu z drugim produktem po izomeryzacji
K_1-k_8 – stałe szybkości poszczególnych etapów reakcji

Jako pierwszy uwalniany jest produkt alkoholowy, który albo nie hamuje enzymu, lub hamuje go niewspółzawodnicząco. Po uwolnieniu produktu alkoholowego następuje izomeryzacja kompleksy EQ (enzym-fosforan). Uwalniany w drugiej kolejności produkt, fosforan nieorganiczny, jest kompetycyjnym inhibitorem enzymu [za FERENS I MORAWIECKĄ 1984].

Odmienną funkcją fosfataz, niż hydrolityczna, jest funkcja transferazowa, która polega na przenoszeniu reszt fosforanowych. W tych reakcjach donorami mogą być: fosfokreatyna, fosfoenolopirogronian, glukozo – 1 – fosforan natomiast akceptorami zastępującymi wodę w reakcjach hydrolizy są: alkohole oraz cukry [KŁYSZEJKO – STEFANOWICZ 1999].

Fosfatazy alkaliczne są enzymami o optimum pH w zakresie 7,6 - 9,6. Hydrolizują różnorodne organiczne połączenia fosforu. Enzymy te uwalniają PO_4^{-3} z fosforanów alkoholi pierwszo- i drugorzędowych, fosfocukrów, polifosforanów nukleozydów i dezoksynukleozydów, polifosforanów nieorganicznych, nie hydrolizują zaś fosfodiestrów. Niektóre fosfatazy wykazują aktywność fosfotransferaz [SIUDA 2001].

Ortofosforan jest dla fosfatazy alkalicznej typowym inhibitorem kompetycyjnym. Większość znanych fosfataz pochodzenia roślinnego jest glikoproteinami o zróżnicowanej zawartości składnika cukrowego, na przykład fosfataza kwaśna bulw ziemniaka zawiera 5,6% mannozy, 2,5% glukozy, 1,5% galaktozy i 3,6 % galaktozaminy.

Kwaśne fosfatazy charakteryzują się małą specyficznością wobec substratów fosfomonoesterowych. Wiele z nich przejawia również aktywności transferazową (kwaśne fosfatazy z drożdży, z owoców cytrusowych). Kwaśne fosfatazy roślinne hydrolizują zwykle p –nitrofenylofosforan oraz nieorganiczny pirofosforan. Enzymy te wykazują duże zróżnicowanie pod względem ciężarów cząsteczkowych. Fosfataza kwaśna z kiełków fasoli i zarodków pszenicy ma ciężar cząsteczkowy od 35000 do 55000 daltonów.
Wspólną cechą kwaśnych fosfataz, nie tylko pochodzenia roślinnego, jest ich występowanie pod postacią izoenzymów które różnią się strukturą, właściwościami katalitycznymi oraz lokalizacją subkomórkową. Optimum pH działania większości fosfataz kwaśnych przypada w granicach 4,5-5,8. Niespecyficzne fosfatazy kwaśne roślin wyższych charakteryzują się dużą aktywnością wobec pNPP, fenylofosforanu, α-naftylofosforanu i β-glicerofosforanu. Dobrze rozkładanym nieorganicznym związkiem jest również pirofosforan. Prawie wszystkie roślinne fosfatazy wykazują wysoką aktywność wobec ATP.

Fosfatazy kwaśne i alkaliczne są rozpowszechnione zarówno w świecie zwierzęcym jak i roślinnym. Występują w tkance kostnej, nerkach, wątrobie i śledzionie. Otrzymano równie z kwaśne i alkaliczne fosfatazy z *E. coli, Neurospora crassa,* fosfatazę alkaliczna z mleka. W roślinie enzym jest głównie zlokalizowany w jądrze, ścianie komórkowej oraz wewnątrzkomórkowych przestrzeniach, natomiast w mniejszym stopniu w amyloplastach, mitochondriach, aparacie Golgi'ego i retikulum endoplazmatycznym [CHEN i in. 1992].

3. BADANIA WŁASNE

3.1. MATERIAŁ BADAWCZY

3.1.1. OPIS DOŚWIADCZENIA

Do realizacji badań pobrano próbki glebowe i roślinne z wieloletniego statycznego doświadczenia polowego założonego w 1980 roku przez Zakład Żywienia Roślin i Nawożenia Instytutu Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwo w Puławach. Doświadczenie prowadzone jest na terenie Rolniczego Zakładu Doświadczalnego w Grabowie nad Wisłą, woj. mazowieckie, powiat zwoleński, gmina Przyłęk. Położenie zakładu doświadczalnego określają, szerokość geograficzna północna 51°21'8'' i długość geograficzna wschodnia 21°40'8''. Klimat nizinny, umiarkowanych szerokości geograficznych.

Gleby, na których usytuowany jest Rolniczy Zakład Doświadczalny w Grabowie według „Systematyki Gleb Polski" [według PTG 1989] reprezentują gleby płowe typowe. Zaliczane są one do następujących jednostek hierarchicznych systematyki gleb:

Dział: Gleby autogeniczne

Rząd: Gleby brunatnoziemne

Typ: Gleby płowe

Podtyp: Gleby płowe typowe

Rodzaj: Glina zwałowa

Gatunek: Gleby obszaru Rolniczego Zakładu Doświadczalnego w Grabowie nie wykazują dużego zróżnicowania gatunkowego, a zawartość procentowa frakcji ilastych waha się w granicach 2-8% (co odpowiada w większości przypadków uziarnieniu piasków).

Gleba, na której założone jest doświadczenie charakteryzuje się składem granulometrycznym piasku gliniastego mocnego, klasy bonitacyjnej IV a, o następującym profilu genetycznym: 0 – 30 cm Ap pgl, 30 – 45 cm Eet pgl, 45 -60 cm Bt gl, 60 – 100 cm C gl, 100 – 150 cm C_1 gs. Pod względem przydatności rolniczej należy ona do kompleksu żytniego bardzo dobrego. Charakterystyczny dla tworzenia się gleb płowych jest klimat umiarkowany wilgotny, gdzie średnia temperatura roczna wynosi 6 – 8°C, a opady są rzędu 500-700 mm rocznie. Gleby płowe są w znacznym stopniu wyługowane ze związków zasadowych i dlatego charakteryzują się odczynem najczęściej kwaśnym lub słabo kwaśnym, a tylko w niekiedy zbliżony do obojętnego. W glebach płowych badanych przez DĄBKOWSKĄ-NASKRĘT i in. [1996] odczyn był kwaśny do obojętnego. Jednak na skutek nawożenia wykazują niekiedy wyższy odczyn, zwłaszcza w poziomach wierzchnich. Gleby te są na ogół ubogie w substancję organiczną ze względu na szybko

przebiegający proces mineralizacji. Również w badaniach prowadzonych przez DĄBKOWSKĄ-NASKRĘT i in. [1996] próchniczność wszystkich analizowanych gleb płowych była niska, a zawartość węgla związków organicznych w poziomach akumulacyjnych wahała się w granicach 4,2 – 10,4 $gC_{org} \cdot kg^{-1}$.

Doświadczenie założono w czteroletnim zmianowaniu: – ziemniak, jęczmień jary, kukurydza na kiszonkę, pszenica ozima. Począwszy od IV rotacji pszenica ozima uprawiana była w stanowisku po ziemniakach. Uwzględnione w zmianowaniu rośliny uprawiane były w następującej kolejności:

ROK	ROŚLINA
2001	Ziemniak
2002	Pszenica ozima
2003	Jęczmień jary
2004	Kukurydza na kiszonkę

W zmianowaniu uprawiane są wyłącznie rośliny zaliczane do zubożających glebę w węgiel związków organicznych.

Doświadczenie założono metodą split-plot, wielkość poletka przy zakładaniu wynosiło160 m^2 (8 x 20 m), a do zbioru 70 m^2 (4,35 x 16 m). Do roku 1987, to jest do zakończenia II rotacji zmianowania, doświadczenie było prowadzone jako jednoczynnikowe, gdzie czynnikiem były zróżnicowane dawki obornika: 0, 20, 40, 60, 80 $t \cdot ha^{-1}$ pod ziemniaki. W analizowanym doświadczeniu obornik zastosowano w październiku 2000 roku. Począwszy od III rotacji uwzględniony został II czynnik – zróżnicowane nawożenie azotem mineralnym. W tym celu poletka podzielono na 4 równe części o powierzchni brutto 40 m^2 (8 x 5 m) i netto 25 m^2 (6,25 x 4 m), na których rozlosowano 4 poziomy nawożenia azotem: N_0, N_1, N_2, N_3, gdzie dawki N_2 i N_3 są odpowiednimi wielokrotnościami dawki N_1. Dawki N_1 w $kg \cdot ha^{-1}$ N w zmianowaniu wynoszą: 45 kg pod ziemniaki i kukurydzę oraz 40 kg pod pszenicę ozimą i jęczmień jary. Łącznie w ciągu jednej rotacji w obiektach N_1 wnoszono do gleby w nawozach mineralnych 170 kg N w zmianowaniu.

Nawozy fosforowe i potasowe stosowane były w jednakowych dawkach we wszystkich obiektach doświadczenia (tab. 3.2).

Skład granulometryczny badanej gleby płowej

Dawka obornika t·ha^{-1}	Dawka azotu kg·ha^{-1}	% udział frakcji granulometrycznych [mm]							Klasyfikacja		
		2-0,1	0,1-0,05	0,05-0,02	0,02-0,006	0,006-0,002	<0,02	<0,002	wg PTG	wg USDA	wg PN 04033
0	N_0	67	8	10	7	3	15	5	pgm	LS	gp
	N_1	66	6	12	8	3	16	5	pgm	SL	gp
	N_2	64	7	15	7	3	14	4	pgl	SL	gp
	N_3	63	8	14	8	2	15	5	pgm	SL	gp
20	N_0	59	11	13	8	3	17	6	pgm	SL	gp
	N_1	63	8	14	7	4	15	4	pgm	SL	gp
	N_2	67	8	12	7	4	13	2	pgl	LS	pg
	N_3	73	8	10	4	1	9	4	psg	LS	pg
40	N_0	68	11	12	4	0	9	5	psg	LS	pg
	N_1	73	8	12	3	0	7	4	psg	LS	pg
	N_2	68	11	12	5	0	9	4	psg	LS	pg
	N_3	73	11	12	0	0	4	4	pl	LS	pg
60	N_0	58	3	19	12	3	20	5	gl	SL	gp
	N_1	61	10	13	6	3	16	7	pgm	SL	gp
	N_2	71	7	6	7	3	16	6	pgm	LS	pg
	N_3	60	9	15	6	4	16	6	pgm	SL	gp
80	N_0	59	9	15	7	3	17	7	pgm	SL	gp
	N_1	63	7	14	6	5	16	5	pgm	SL	gp
	N_2	62	9	14	8	3	15	4	pgm	SL	gp
	N_3	58	9	15	9	2	18	7	pgm	SL	gp

Wg PTG **[1989]**: psg – piasek słabogliniasty, pgm – piasek gliniasty mocny, pgl – piasek gliniasty lekki;

Wg USDA **[1998]**: SL – sandy loam, LS – loamy sand ; Wg PN **[1998]:** gp – glina piaszczysta; pg – piasek gliniasty; pl – piasek luźny; gl – glina lekka

Tabela 3.2

Dawki fosforu i potasu [kg·ha^{-1}] zastosowane w doświadczeniu [MAĆKOWIAK I ŻEBROWSKI 1996]

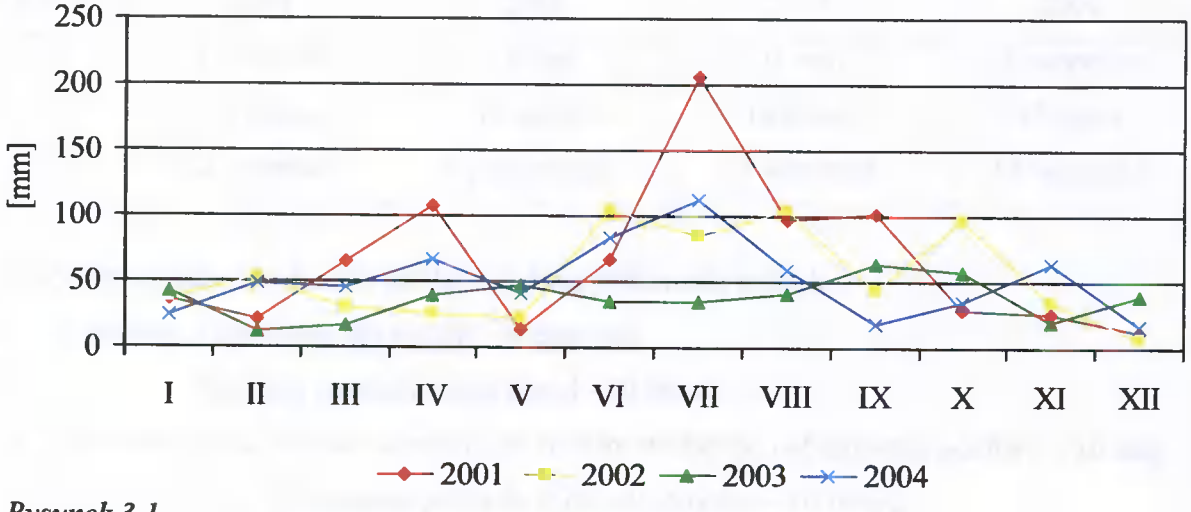
	P_2O_5	K_2O
Ziemniaki	55	120
Pszenica ozima	48	72
Jęczmień jary	57	85
Kukurydza	55	160

Przed założeniem doświadczenia pobrano próbki gleby z warstwy ornej 25 cm w celu wykonania analiz chemicznych. Oznaczono zawartość węgla związków organicznych. Wobec bardzo małych różnic w zawartości tego składnika w glebie w latach zakładania doświadczeń, jako zawartość wyjściową przyjęto jedną wartość średnią dla całego obszaru zajętego pod doświadczenie, wynoszącą 5,9 g C·kg^{-1} [MAĆKOWIAK I ŻEBROWSKI 1999].

Tabela 3.3

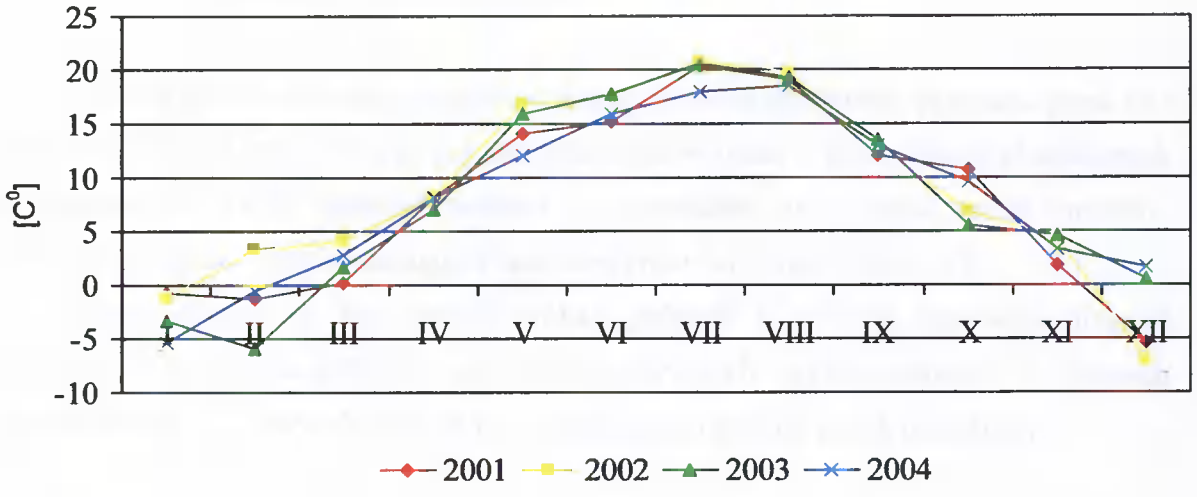
Wybrane elementy agrotechniki roślin

Gatunek roślin	Odmiana	Termin siewu (sadzenia)	Termin zbioru
Ziemniaki	Alicja	20.04.2001	13-22.09.2001
Pszenica ozima	Korweta	02.10.2001	29.07.2002
Jęczmień jary	Stratus	16.04.2003	04.08.2003
Kukurydza	Nimba	23.04.2004	29-30.09.2004



Rysunek 3.1

Miesięczne sumy opady atmosferyczne w latach 2001-2004



Rysunek 3.2

Średnia temperatura powietrza na terenie RZD Grabów

3.1.2. POBIERANIE MATERIAŁU GLEBOWEGO I ROŚLINNEGO ORAZ PRZYGOTOWANIE PRÓBEK DO ANALIZ

Próbki glebowe do badań pobrano z wierzchniej warstwy gleby (5 - 25 cm) za pomocą laski Egnera.

Tabela 3.4

Terminy pobierania próbek glebowych i roślinnych

Termin	2001	2002	2003	2004
1	4 czerwiec	16 maj	21 maj	2 czerwiec
2	20 lipiec	16 lipiec	16 lipiec	27 lipiec
3I	12 wrzesień	4 październik	17 wrzesień	14 wrzesień

Fazy fenologiczne badanych roślin w trakcie pobierania próbek:

- Ziemniak: Pojawienie się pędów - 4 czerwiec
  Początek zawiązywania jagód - 20 lipiec
- Pszenica ozima: Koniec strzelania w źdźbło -widoczne nabrzmienie pochwy – 16 maj
  Dojrzałość pełna do 20% wilgotności – 16.lipiec
- Jęczmień jary: Początek strzelania w źdźbło – 21maj
  Dojrzałość późnowoskowa – 17 lipiec

- Kukurydza: Piąty liść rozwinięty - 2 czerwiec
  Widoczny wierzchołek wiechy – 27 lipiec
  Dojrzałość żółta – 14 wrzesień.

Próbki glebowe zostały wysuszone w temperaturze pokojowej, przesiane przez sito o średnicy oczek 2 mm. Glebę po przesianiu przechowywano w pojemnikach plastikowych w temperaturze 18°C. Materiał roślinny po uprzednim wysuszeniu został zmielony w młynku laboratoryjnym, a następnie przechowywany w temperaturze 18°C.

Przygotowane w ten sposób próbki glebowe i roślinne stanowiły materiał wyjściowy do poszczególnych analiz laboratoryjnych wykonywanych w czterech powtórzeniach, a w tabelach z wynikami zamieszczono średnie z tych powtórzeń.

3.2. METODYKA BADAŃ

Wykonano następujące oznaczenia:

- **SKŁAD GRANULOMETRYCZNY** - do oznaczenia składu granulometrycznego wykorzystano metodę aerometryczną Bouyousa w modyfikacji Cassagrnde'a i Prószyńskiego, która należy do metod sedymentacyjnych i polega na zmierzeniu ciężaru właściwego zawiesiny glebowej aerometrem, specjalnie do tego celu skonstruowanym. Oznaczamy w nim ilość cząstek glebowych znajdujących się w chwili pomiaru w zawiesinie. Szybkość sedymentacji poszczególnych cząstek zależy od temperatury i utworu glebowego. Zależność tę opracowaną w drodze empirycznej przedstawiają specjalne tabele [LITYŃSKI i in. 1976],
- **ODCZYNU GLEBY METODĄ POTENCJOMETRYCZNĄ** - do oznaczenia wartości pH gleby zastosowano metodę elektrometryczna opierającą się na zasadzie elektrochemicznej zgodności z prawami ogniwa stężeniowego polegającego na pomiarze różnicy potencjałów w ogniwie składającym się z elektrody porównawczej oraz elektrody pomiarowej, zanurzonej w zawiesinie glebowej o nieznanym stężeniu kationów wodorowych. Oznaczanie wielkości pH gleby wykonano w zawiesinie glebowej o stężeniu 2,5 części roztworu na 1 cześć gleby. Do otrzymania zawiesiny użyto wody destylowanej i KCl o stężeniu1 $mol \cdot dm^{-3}$ [LITYŃSKI i in. 1976],
- **FOSFORU OGÓŁEM EKSTRAHOWANEY METODĄ MEHTA** - fosfor ogółem izolowano z materiału glebowego i roślinnego metodą MEHTA i in. [1954], która polega na

traktowaniu materiału glebowego stężonym HCl oraz 0,5 M NaOH w temperaturze pokojowej i 100^{O}C. Po wymieszaniu ekstraktów mineralizowano je w mieszaninie stężonych kwasów: azotowego, nadchlorowego i siarkowego o stosunku objętościowym 20:5:1. Po mineralizacji oznaczono fosfor ogółem kolorymetrycznie przy użyciu spektrofotometru Marcel Pro,

- **ZAWARTOŚCI FOSFORU ZWIĄZKÓW ORGANICZNYCH** - fosfor związków organiczny obliczono z różnicy pomiędzy ogólną zawartością fosforu oznaczonego w próbkach zmineralizowanych a zawartością fosforu nieorganicznego oznaczonego w próbkach niemineralizowanych,
- **FOSFOR PRZYSWAJALNY METODĄ EGNERA-RIEHMA (DL)** - zastosowana metoda polega na kolorymetrycznym oznaczeniu fosforu wyekstrahowanego z gleby roztworem mleczanu wapnia zakwaszonym HCl do pH 3,6. Zasada tej metody opiera się na tworzeniu przez jony ortofosforanowe w środowisku kwaśnym w obecności $SnCl_2$ jako reduktora, związku kompleksowego – błękitu fosforomolibdenianowego, którego intensywność zabarwienia zależy od stężenia jonów fosforanowych [LITYŃSKI i in. 1976],
- **AKTYWNOŚCI FOSFATAZY ALKALICZNEJ I KWAŚNEJ** - metoda według TABATABAI M.A. I BREMNERA J.M. [1969] oparta jest na kolorymetrycznym oznaczeniu uwolnionego substratu: *p* – nitrofenolu po inkubacji próbek glebowych i roślinnych przez 1 godzinę w temperaturze 37^{O}C. Fosfataza katalizuje reakcję hydrolizy wiązań fosforanowych w złożonych związkach organicznych. Fosfataza hydrolizując p – nitrofenylofosforan uwalnia p- nitrofenol, którego ilość oznacza się kolorymetrycznie wykorzystując w tym celu spektrofotometr Marcel Pro,
- **WĘGIEL ZWIĄZKÓW ORGANICZNYCH WEDŁUG TIURINA** - do oznaczenia węgla związków organicznych przyjęto metodę Tiurina, która jest jedną z modyfikacji objętościowo –miareczkowych metod bezpośrednich. Polega ona na utlenianiu substancji organicznej w próbach glebowych dwuchromianem potasu w roztworze stężonego H_2SO_4 jako katalizatora. Stężony kwas ma zdolność odciągania wody i rozkładania substancji organicznej z jednoczesnym wydzielaniem węgla atomowego, który jest natychmiast utleniany przez chrom z $K_2Cr_2O_7$ do CO_2. Chrom ulega ilościowej redukcji pod wpływem węgla substancji organicznej z Cr^{6+} do Cr^{3+}. Roztwór $K_2Cr_2O_7$ dodaje się w nadmiarze. Ilość chromu (Cr^{6+}) w dwuchromianie potasu, nie zużytego na utlenienie węgla, redukuje się przez miareczkowanie solą Mohra w obecności dwufenyloaminy jako indykatora. Z różnicy pomiędzy ilością

dwuchromianu potasu pobraną do analizy, a jego ilością zużyta w wyniku miareczkowania solą Mohra oblicza się ilość dwuchromianu potasu, która została zużyta do utlenienia węgla związków organicznych [LITYŃSKI i in. 1976],

- **ZAWARTOŚĆ AZOTU OGÓŁEM W GLEBIE METODĄ KJELDAHLA** - metoda Kjeldahla polega na całkowitym rozkładzie materii organicznej gleby za pomocą stężonego kwasu siarkowego, przy czym azot zawarty w glebie przechodzi w $(NH_4)_2SO_4$. Po zmineralizowaniu materii organicznej oznaczamy azot metodą destylacyjną.

3.3. STATYSTYCZNE OPRACOWANIE WYNIKÓW

Wielopowtórzeniowe dane liczbowe będące wynikiem analiz materiału glebowego i roślinnego uzyskane w latach 2001-2004 poddano procedurom statystycznym. Dla wyników zawartości fosforu ogółem, fosforu związków organicznych, fosforu przyswajalnego, aktywności fosfatazy alkalicznej i fosfatazy kwaśnej w glebie, wykonano analizę wariancji doświadczeń wielokrotnych, trójczynnikowych w układzie losowanych podbloków (split-plot). Analizę wykonano w modelu mieszanym. Jako pierwszy czynnik przyjęto dawki obornika, jako drugi dawki azotu mineralnego, a trzeci czynnik stanowiły terminy pobierania próbek glebowych. Dla wyników zawartości fosforu ogółem, fosforu związków organicznych, aktywności fosfatazy alkalicznej i fosfatazy kwaśnej w materiale roślinnym wykonano analizę wariancji doświadczeń pojedynczych, trójczynnikowych w układzie losowanych podbloków (split-plot). Jako pierwszy czynnik przyjęto dawki obornika, jako drugi dawki azotu mineralnego, a trzeci czynnik stanowiły fazy fenologiczne badanych roślin. Wyniki badań zawartości węgla związków organicznych i azotu ogółem wykonywanych corocznie opracowano jako doświadczenie wielokrotne dwuczynnikowe w układzie losowanych podbloków (split-plot). Jako pierwszy czynnik przyjęto dawki obornika a drugi dawki azotu mineralnego. Analiza wariancji pozwoliła prześledzić istotność zmian badanych cech pod wpływem rozpatrywanych czynników doświadczalnych: zróżnicowanych dawek obornika i azotu mineralnego jak również zmian sezonowych w trakcie rozwoju wegetacyjnego badanych roślin. Do obliczeń statystycznych wykorzystano program FR-ANALWAR na bazie Microsoft Excel.

Ponadto wyniki wykonanych analiz badanych cech poddano analizie korelacji prostej ($p<0,05$), która określa stopień zależności pomiędzy poszczególnymi cechami. Analizę korelacji wykonano w programie „Statistica for Windows Pl".

4. WYNIKI I DYSKUSJA

4.1. WŁAŚCIWOŚCI CHEMICZNE BADANEJ GLEBY

4.1.1. ODCZYN GLEBY

Wartości pH badanej gleby zostały przedstawione w tabeli 4.1. W latach 2001-2004 odczyn gleby mierzony w H_2O wahał się w granicach 5,7-6,8, natomiast wartości pH w KCl o stężeniu 1 mol·dm^{-3} mieściły się w granicach 5,2-5,9. Na podstawie uzyskanych wartości pH badaną glebę można zakwalifikować do gleb kwaśnych i lekko-kwaśnych. Zastosowane w doświadczeniu nawożenie w stosunkowo niewielkim stopniu różnicowało odczyn gleby. Spadek wartości pH w H_2O, jak i pH w KCl średnio o 1 jednostkę zaobserwowano w glebie po zastosowaniu najwyższej dawki azotu mineralnego (N_3). MAZURKIEWICZ [2002] również stwierdziła, że nawożenie organiczno-mineralne nieznacznie zmniejszyło wartości pH od 5,2 przy zerowej dawce azotu do 4,9 przy dawce 120 kgN·ha^{-1}. Według MERCIKA i in. [2000] wieloletnie nawożenie organiczno-mineralne w porównaniu z wyłącznym stosowaniem nawozów mineralnych nie wpływa znacząco na zakwaszenie gleby.

Tabela 4.1

Odczyn badanej gleby w ciągu rotacji w latach 2001-2004

Dawka obornika t·ha^{-1}	Dawka azotu mineralnego kg·ha^{-1}	2001		2002		2003		2004	
		H_2O	KCl	H_2O	KCl	H_2O	KCl	H_2O	KCl
0	N_0	6,4	5,7	5,9	5,5	6,3	5,7	6,3	5,7
	N_1	6,4	5,7	5,9	5,5	6,3	5,6	6,3	5,7
	N_2	6,4	5,6	5,8	5,4	6,1	5,5	6,2	5,6
	N_3	6,3	5,5	5,7	5,2	5,9	5,3	6,1	5,4
20	N_0	6,6	5,9	6,0	5,3	6,2	5,7	6,5	5,9
	N_1	6,5	5,7	5,8	5,4	6,2	5,6	6,4	5,8
	N_2	6,5	5,7	5,9	5,4	6,2	5,5	6,1	5,8
	N_3	6,3	5,6	5,8	5,3	6,1	5,5	5,8	5,6
40	N_0	6,5	5,8	5,9	5,4	6,4	5,6	6,0	5,7
	N_1	6,5	5,7	5,9	5,4	6,3	5,5	6,0	5,7
	N_2	6,5	5,7	5,8	5,4	6,3	5,5	5,9	5,6
	N_3	6,2	5,6	5,8	5,3	6,2	5,4	5,8	5,5
60	N_0	6,6	5,8	5,9	5,4	6,3	5,8	6,3	5,8
	N_1	6,6	5,7	5,9	5,5	6,2	5,8	6,2	5,8
	N_2	6,5	5,7	5,9	5,5	6,2	5,7	6,2	5,7
	N_3	6,3	5,6	5,8	5,3	6,1	5,7	6,0	5,6
80	N_0	6,8	5,9	6,2	5,8	6,4	5,8	6,4	5,9
	N_1	6,8	5,9	6,0	5,7	6,3	5,7	6,3	5,9
	N_2	6,7	5,8	6,0	5,5	6,3	5,7	6,2	5,8
	N_3	6,6	5,6	5,9	5,3	6,1	5,6	6,2	5,7

SIENKIEWICZ i in. [2004b] stwierdzili, że gleby z obiektów nie nawożonych obornikiem posiadały wyraźnie niższy odczyn, niż gleby z obiektów na których stosowano obornik. JANOWIAK i in. [2005] wykazały spadek wartości pH gleby o 1,7 jednostki po zastosowaniu dawki azotu w wysokości 180 $kg \cdot ha^{-1}$. Według FILIPKA [2001] azot w postaci amonowej powoduje zakwaszenie roztworu glebowego zarówno w wyniku procesu nitryfikacji jak i pobierania kationu NH_4^+ przez system korzeniowy roślin. RABIKOWSKA I PISZCZ [2000] stwierdziły, że wieloletnie stosowanie wzrastających dawek azotu (maksymalnie do 210 $kgN \cdot ha^{-1}$) powodowało zwiększenia zakwaszenia gleby, jednocześnie obniżając żyzność gleby. Najniższe pH stwierdzono w glebie pobranej z poletek nie nawożonych obornikiem: wartość pH_{H_2O} mieściła się w zakresie 5,7 - 6,4 a pH_{KCl} 5,2 - 5,7. Nawożenie obornikiem, szczególnie w dawce $80t \cdot ha^{-1}$ łagodziło nieco skutki zakwaszenia badanej gleby na obiektach doświadczenia, powodując wzrost pH średnio o 0,22 jednostki. Wyższe wartości pH_{H_2O} i pH_{KCl} oznaczono w próbkach gleby pobranych w pierwszym roku badań, natomiast najniższe w drugim roku , spod uprawy pszenicy ozimej. Zwykle nawożenie obornikiem zwiększa właściwości buforowe gleby, co wiąże się z poprawą jej właściwości fizyko-chemicznych i przeciwdziała obniżaniu odczynu gleby [ŁABĘTOWICZ i in. 1998 (b)].

4.1.2. ZAWARTOŚĆ WĘGLA ZWIĄZKÓW ORGANICZNYCH I AZOTU OGÓŁEM W BADANEJ GLEBIE

Zawartość węgla związków organicznych w glebie jest jednym z najważniejszych wskaźników jej żyzności. Synteza wyników za okres 2001-2004 wykazała istotny wpływ zastosowanych czynników na zmiany zawartości C_{org} w badanej glebie płowej (tab. 4.2). Zawartość węgla związków organicznych wzrastała istotnie wraz ze wzrostem dawki obornika. Najwyższą zawartość C_{org} (średnio 8,90 $gC \cdot kg^{-1}$) stwierdzono w glebie pobranej z obiektów nawożonych obornikiem w dawce 80 $t \cdot ha^{-1}$, natomiast najniższą zawartość C_{org} (średnio 6,95 $gC \cdot kg^{-1}$) stwierdzono w próbkach glebowych pobranych z obiektów bez obornika, różnica ta wyniosła 22%. Podobne wyniki badań uzyskali DĘBSKA I GONET [2001] oznaczając C_{org} analizatorem TOC „Primas" firmy Skalar, uzyskane przez nich wyniki zawartości C_{org} są 1,3 krotnie wyższe od otrzymanych standartowa metodą Tiurina.

Tabela 4.2

Zawartość węgla związków organicznych [gC·kg^{-1}] w badanej glebie w zależności od zróżnicowanego nawożenia obornikiem, azotem mineralnym i terminu pobierania próbek

Dawka obornika t·ha^{-1} I czynnik	Dawka azotu kg·ha^{-1} II czynnik				średnio
	N_0	N_1	N_2	N_3	
0	6,13	6,75	7,53	7,40	**6,95**
20	6,89	7,56	8,35	8,60	**7,85**
40	7,36	8,06	8,97	8,81	**8,31**
60	8,07	8,34	9,16	8,74	**8,58**
80	7,85	8,57	10,0	9,16	**8,90**
średnio	**7,27**	**7,85**	**8,81**	**8,54**	**8,12**
$NIR_{0,05}$ I czynnik	**0,690**				
II czynnik	**0,683**				
Interakcja I/II II/I	n.i.				

n.i. – różnice nie istotne

W badaniach własnych zawartość węgla związków organicznych kształtowała się w przedziale 6,13-10,0 gC·kg^{-1} (tab. 4.2) w zależności od dawki obornika i azotu mineralnego. We wcześniejszych pracach ŁABUDA i in. [2003] stwierdzili, że w glebie nawożonej zróżnicowanymi dawkami obornika i azotu zawartość C_{org} wyniosła średnio 7,13 gC·kg^{-1}, i wzrastała się w miarę zwiększania ilości stosowanej substancji organicznej. Stwierdzono statystycznie istotny wpływ nawożenia zróżnicowanymi dawkami azotu mineralnego na zawartość C_{org} w badanej glebie płowej. Wraz ze wzrostem dawki azotu mineralnego istotnie wzrastała zawartość węgla związków organicznych w glebie, osiągając przy dawce azotu N_2 najwyższą wartość wynoszącą 8,81 gC·kg^{-1}, (średnia dla dawek obornika). W badaniach STANISŁAWSKIEJ-GLUBIAK I KORZENIOWSKIEJ [2005] najniższą zawartość (średnio 6,5 gC·kg^{-1}) stwierdzono w glebie nie nawożonej. Autorki podkreślają, że stosowanie nawożenia wyłącznie mineralnego spowodowało jedynie dodatni wpływ na kumulację C_{org} w glebie w stosunku obiektu bez nawożenia, a jednocześnie tendencję gorszego działania w porównaniu do nawożenia obornikiem lub kombinacji nawozowych obornika łącznie z nawozami mineralnymi. Nawożenie azotem w dawce N_3 spowodowało istotny o 3% spadek zawartości C_{org} w porównaniu do dawki N_2. W badaniach JANOWIAK [1995] wieloletnie stosowanie wysokiej dawki azotu (180 kg·ha^{-1}), bez nawożenia obornikiem, przyczyniło się do obniżenie zawartości C_{org} w glebie o 18%. Prawdopodobnie niskie dawki azotu wpływają na kumulację i stabilizację C_{org} w glebie, natomiast wysokie dawki N mineralnego mogą przyspieszać mineralizację i powodować ubytek glebowej materii organicznej.

Pod wpływem zastosowanego nawożenia zawartość węgla związków organicznych w glebie w trakcie rotacji wzrosła średnio o 37% w porównaniu do zawartości tego składnika pokarmowego w glebie przed założeniem doświadczenia.

Zawartość azotu ogółem w badanej glebie mieściła się w przedziale 0,578-0,984 $gN \cdot kg^{-1}$. Stwierdzono istotny wpływ nawożenia azotem mineralnym na zawartość azotu ogółem w badanej glebie. Istotnie najwyższą zawartość (0,854 $gN \cdot kg^{-1}$ średnio dla wszystkich dawek obornika) stwierdzono w glebie nawożonej azotem mineralnym w najwyższej dawce (N_3) (tab. 4.3).

Tabela 4.3

Zawartość azotu ogółem ($gN \cdot kg^{-1}$) w badanej glebie w zależności od zróżnicowanego nawożenia obornikiem, azotem mineralnym i terminu pobierania próbek

Dawka obornika $t \cdot ha^{-1}$ I czynnik	**Dawka azotu $kg \cdot ha^{-1}$ II czynnik**				**średnio**
	N_0	**N_1**	**N_2**	**N_3**	
0	0,738	0,774	0,802	0,813	0,782
20	0,578	0,606	0,602	0,628	0,604
40	0,845	0,880	0,876	0,907	0,877
60	0,879	0,912	0,941	0,940	0,918
80	0,886	0,922	0,955	0,984	0,937
średnio	**0,785**	**0,819**	**0,835**	**0,854**	**0,823**
$NIR_{0,05}$ I czynnik	n.i.				
II czynnik	**0,026**				
Interakcja I/II II/I	n.i.				

n.i. –różnice nie istotne

Azot mineralnego w dawce (N_3) powodowało wzrost zawartości N_{og} w badanej glebie o 8% w porównaniu do zawartości tego makroskładnika w glebie, na której nie zastosowano nawożenia azotem. KOŁODZIEJCZYK i in. [2005], SOSULSKI i in. [2005] stwierdzili najniższą zawartość N_{og} w obiektach kontrolnych, a najwyższą w glebie z obiektów nawożonych mineralnie.

Ze względu na równoległość przemian węgla i azotu, uruchamianie azotu z połączeń organicznych jest uwarunkowane w dużej mierze od właściwego stosunku wartości C_{org}:N_{og} w glebie, który najczęściej wynosi 10:1. Przy szerszym stosunku C_{org}:N_{og} może nastąpić unieruchomienie azotu w wyniku sorpcji biologicznej. Wartość tego stosunku niezależnie od stosowanego nawożenia wahała się w zakresie od 5,16 do 11,4 (tab. 4.4). Różnice w wartościach stosunku C_{org}:N_{og} świadczą o zróżnicowanym tempie mineralizacji organicznych związków węgla i azotu. We wcześniejszych badaniach PUŁA

I ŁABZA [2004b], KONDRATOWICZ-MACIEJEWSKA I GONET [2005], FLIS-BUJAK i in. [2006] określili wartość stosunku C_{org}:N_{og} w badanych glebach na poziomie 10,5 do 11,1.

W badaniach własnych najniższe wartości stosunku C_{org}:N_{og} stwierdzono w glebie pobranej w 2001 roku spod uprawy ziemniaka. Wąskie wartości stosunku C_{org}:N_{og} wskazują na intensyfikację procesów humifikacji i nitryfikacji w glebie. Jeszcze niższą wartość stosunku C_{org}:N_{og} (6,9) w glebie lekkiej, oraz (6,4) w glebie ciężkiej, otrzymali KOŁODZIEJCZYK i in. [2005].

Tabela 4.4

Wartość stosunku C_{org}:N_{og} badanej gleby w ciągu jednej rotacji w latach 2001-2004

Dawka obornika t·ha^{-1}	Dawka azotu kg·ha^{-1}	2001	2002	2003	2004
		C:N	C:N	C:N	C:N
0	N_0	5,16	8,66	9,15	10,6
	N_1	6,65	9,32	8,68	10,2
	N_2	9,27	9,16	8,98	10,0
	N_3	6,75	9,81	9,76	10,7
20	N_0	6,76	8,66	9,78	8,96
	N_1	7,93	8,32	9,84	9,89
	N_2	7,83	10,2	10,1	11,0
	N_3	8,63	9,81	9,42	11,4
40	N_0	6,85	9,36	9,83	8,94
	N_1	9,93	9,50	10,6	9,65
	N_2	8,99	10,7	10,9	10,4
	N_3	8,33	9,80	10,3	10,4
60	N_0	7,64	9,17	9,48	10,2
	N_1	7,92	9,47	9,51	9,56
	N_2	9,62	9,89	10,5	9,20
	N_3	7,39	9,42	10,0	10,4
80	N_0	5,25	8,59	10,2	11,1
	N_1	7,71	8,79	10,1	10,8
	N_2	10,5	9,16	10,6	9,89
	N_3	8,46	8,76	9,9	10,1

4.2. ZAWARTOŚĆ WYBRANYCH FRAKCJI FOSFORU W GLEBIE

4.2.1. ZAWARTOŚĆ FOSFORU OGÓŁEM

Zawartość fosforu ogółem w glebie wyniosła średnio 0,429 g·kg^{-1} (tab. 4.5). W badaniach BORIE I RUBIO [2003] zawartość P_{og} w glebach uprawnych kształtowała się na poziomie 0,258 g·kg^{-1} i była wyższa o 28% w porównaniu do zawartości fosforu ogółem w glebach nieuprawnych. Zróżnicowane nawożenie obornikiem i azotem mineralnym stosowane przez wiele lat w doświadczeniu polowym w Grabowie nad Wisłą istotnie wpłynęło na zawartość fosforu ogółem w badanej glebie płowej. Nawożenie obornikiem w dawce 60 t·ha^{-1} przyczyniło się do największego wzrostu zawartości P_{og}

(średnio 0,491 $g \cdot kg^{-1}$) w glebie. Zastosowanie wyższej dawki obornika (80 $t \cdot ha^{-1}$), spowodowało spadek zawartości P_{og} o 8%.

Tabela 4.5

Zawartość fosforu ogółem [$gP \cdot kg^{-1}$ s.m.] w badanej glebie w trakcie rotacji w zależności od zróżnicowanego nawożenia obornikiem, azotem mineralnym i terminu pobierania próbek

Dawka obornika $t \cdot ha^{-1}$ I czynnik	Dawka azotu $kg \cdot ha^{-1}$ II czynnik	Termin - III czynnik			średnio
		1	2	3	
0	N_0	0,325	0,324	0,333	0,327
	N_1	0,371	0,356	0,378	0,368
	N_2	0,397	0,410	0,445	0,417
	N_3	0,379	0,375	0,429	0,394
średnio		0,368	0,366	0,396	**0,377**
20	N_0	0,351	0,339	0,377	0,356
	N_1	0,380	0,379	0,440	0,400
	N_2	0,408	0,402	0,483	0,431
	N_3	0,395	0,389	0,450	0,411
średnio		0,384	0,377	0,438	**0,399**
40	N_0	0,385	0,359	0,395	0,380
	N_1	0,410	0,408	0,456	0,424
	N_2	0,429	0,424	0,505	0,453
	N_3	0,418	0,411	0,484	0,438
średnio		0,410	0,400	0,460	**0,424**
60	N_0	0,425	0,411	0,532	0,456
	N_1	0,441	0,446	0,551	0,479
	N_2	0,472	0,535	0,592	0,534
	N_3	0,453	0,462	0,570	0,495
średnio		0,448	0,464	0,561	**0,491**
80	N_0	0,409	0,392	0,462	0,421
	N_1	0,423	0,407	0,494	0,441
	N_2	0,450	0,437	0,565	0,484
	N_3	0,440	0,419	0,534	0,464
średnio		0,430	0,414	0,514	**0,453**
Średnio	**N_0**	0,379	0,365	0,420	**0,388**
	N_1	0,405	0,399	0,464	**0,423**
	N_2	0,431	0,442	0,518	**0,464**
	N_3	0,417	0,411	0,493	**0,440**
Średnio		**0,408**	**0,404**	**0,474**	**0,429**
$NIR_{0,05}$	**I czynnik**		**0,030**		
	II czynnik		**0,012**		
	III czynnik		**0,029**		
$NIR_{0,05}$ dla interakcji					
I/II	**II/I**		n.i.		
I/III	**III/I**		n.i.		
II/III	**III/II**		n.i.		

n.i. – różnice nie istotne

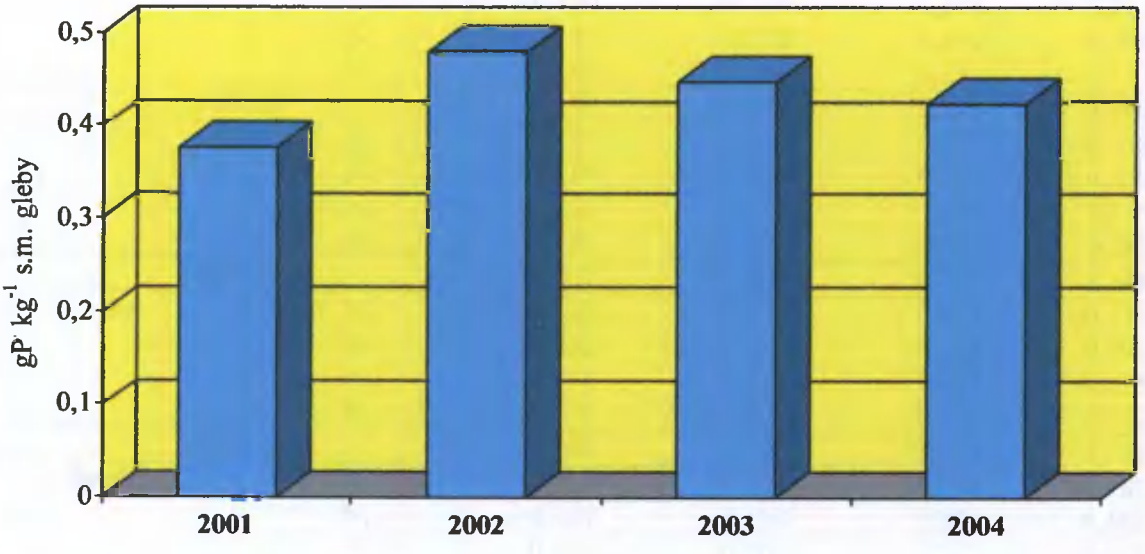
Istotnie niższą i mało zróżnicowaną zawartość P_{og} stwierdzono w glebie pobranej z obiektów nawożonych dawką obornika 20 $t \cdot ha^{-1}$ i 40 $t \cdot ha^{-1}$. Istotnie najniższa zawartość

fosforu ogółem (0,377 $g \cdot kg^{-1}$ średnio dla wszystkich dawek azotu i terminów pobierania próbek glebowych) wystąpiła w glebie pobranej z obiektów nie nawożonych obornikiem. Spadek zawartości P_{og} o 23% stwierdzono w glebie nie nawożonej organicznie w porównaniu do zawartości P_{og} w glebie z obiektów na których zastosowano dawkę obornika 60 $t \cdot ha^{-1}$. W badaniach VERMA i in. [2005] w glebach nawożonych wyłącznie azotem, zawartość P_{og} utrzymywała się na poziomie 0,507 $g \cdot kg^{-1}$. Autorzy stwierdzili, że dodatek do gleby obornika powodował wzrost P_{og} nawet o 100%. Znaczący wpływ obornika na zawartość fosforu ogółem stwierdzili również CZEKAŁA i in. [1992]. W badaniach tych autorów różnice w zawartości P_{og} w glebach nawożonych obornikiem w stosunku do gleby nie nawożonych obornikiem wynosiły 47-78%. TUJAKA [2002] uważa, że połączone nawożenie organiczne i mineralne powoduje istotny wzrost zawartości P_{og} w glebie, co bardziej uwidacznia się w powierzchniowej warstwie gleby. W badaniach KALEMBASY i in. [2005], pod wpływem zastosowania obornika w dawce 60 $t \cdot ha^{-1}$, zawartość P_{og} wzrosła o 44% w porównaniu do obiektu kontrolnego. Natomiast WACŁAWOWICZ i in. [2005] stwierdzili wzrost zawartości tylko o 14% w glebie w której w nawożeniu uwzględniono obornik w porównaniu do gleby obiektów kontrolnych.

Nawożenie azotem w istotny sposób modyfikowało zawartość fosforu ogółem w badanej glebie. Najniższą zawartość P_{og} (0,388 $g \cdot kg^{-1}$ średnio dla wszystkich dawek obornika i terminów pobierania próbek glebowych) stwierdzono w próbkach glebowych pobranych z obiektów nie nawożonych azotem (tab. 4.5). Najkorzystniej na kumulację fosforu ogółem w warstwie ornej gleby wpłynęła dawka azotu mineralnego (N_2). Średnia zawartość P_{og} w glebie z obiektów nawożonych dawką N_2 kształtowała się na poziomie 0,464 $gP \cdot kg^{-1}$. Natomiast nawożenie wyższą dawka azotu mineralnego N_3 spowodowało spadek P_{og} w badanej glebie o 6%. KALEMBASA i in. [2005] w swoich badaniach stwierdzili powolny wzrost zawartości fosforu ogółem w porównaniu do zwiększenia się zawartości innych badanych makroskładników (Na, K, Mg, Ca, S) w przypadku stosowania nawozów organicznych i mineralnych. Sugerują oni, że może to być wynikiem pobierania tego składnika przez rośliny lub z jego przemieszczaniem w głąb profilu glebowego, pod warstwę z której pobierano próbki gleby do analiz. Natomiast WACŁAWOWICZ i in. [2005] stwierdzili, że zastosowane nawożenie azotowe w niewielkim stopniu różnicowało zawartość P_{og} w glebie. Dopiero dawki 140 $kgN \cdot ha^{-1}$ i 180 $kgN \cdot ha^{-1}$ w warstwie podornej spowodowały największy wzrost P_{og} w glebie odpowiednio 0,29 $gP \cdot kg^{-1}$ i 0,24 $gP \cdot kg^{-1}$.

Stwierdzono istotny wpływ terminu pobierania próbek glebowych na zawartość fosforu ogółem. Największą (średnio 0,474 $g \cdot kg^{-1}$) kumulację tego makroskładnika stwierdzono w glebie pobranej w 3 terminie (jesień) (tab. 4.5). W próbach glebowych pobranych w 1 i 2 terminie zawartość była istotnie niższa i mało zróżnicowana. WACŁAWOWICZ i in. [2005] w swoich badaniach stwierdzili, że jesienią w warstwie ornej gleby na poletkach ze słomą i międzyplonem ścierniskowym nastąpił wzrost zawartości P_{og} o 7,1% w stosunku do okresu wiosennego. Natomiast po wprowadzeniu obornika nastąpiło zmniejszenie się koncentracji P_{og} o 10,4%, w miarę upływu czasu

Najmniejszą zawartość fosforu ogółem (średnio 0,378 $g \cdot kg^{-1}$) w badanej glebie w ciągu czteroletniej rotacji stwierdzono w roku 2001, w trakcie uprawy ziemniaka. W drugim roku trwania badań zawartość P_{og} wzrosła o 21%.



Rysunek 4.1

Zmiany zawartości fosforu ogółem w badanej glebie w trakcie rotacji.

W latach następnych, kiedy uprawiany był jęczmień ozimy i kukurydza, nastąpił spadek ogólnej zawartości fosforu w glebie płowej (rys. 4.1).

4.2.2. ZAWARTOŚĆ FOSFORU ZWIĄZKÓW ORGANICZNYCH

Ze względu na charakter chemiczny wyodrębnia się frakcję mineralnych związków fosforowych i frakcję fosforu zawartego w połączeniach organicznych [SĄDEJ 2000].

Z przeprowadzonych badań własnych wynika, że zastosowane w doświadczeniu czynniki wpłynęły istotnie na zawartość fosforu związków organicznych w glebie płowej (tab. 4.6). Średnia zawartość P_{org} kształtowała się na poziomie 0,187 $gP \cdot kg^{-1}$.

Tabela 4.6

Zawartość fosforu związków organicznych [$gP_{org} \cdot kg^{-1}$] w badanej glebie w zależności od zróżnicowanego nawożenia obornikiem, azotem mineralnym i terminu pobierania próbek

Dawka obornika $t \cdot ha^{-1}$ I czynnik	Dawka azotu $kg \cdot ha^{-1}$ II czynnik	Termin III czynnik			średnio
		1	2	3	
0	N_0	0,084	0,117	0,246	0,149
	N_1	0,102	0,139	0,170	0,137
	N_2	0,127	0,152	0,204	0,161
	N_3	0,111	0,141	0,190	0,147
średnio		0,106	0,137	0,203	**0,149**
20	N_0	0,093	0,130	0,165	0,129
	N_1	0,117	0,148	0,198	0,154
	N_2	0,138	0,179	0,227	0,181
	N_3	0,122	0,164	0,214	0,167
średnio		0,117	0,155	0,201	**0,158**
40	N_0	0,125	0,158	0,203	0,162
	N_1	0,130	0,176	0,216	0,174
	N_2	0,145	0,202	0,246	0,198
	N_3	0,146	0,186	0,231	0,187
średnio		0,136	0,180	0,244	**0,180**
60	N_0	0,193	0,203	0,203	0,258
	N_1	0,218	0,220	0,220	0,285
	N_2	0,251	0,300	0,300	0,316
	N_3	0,224	0,224	0,235	0,287
średnio		0,222	0,222	0,240	**0,249**
80	N_0	0,130	0,174	0,220	0,175
	N_1	0,152	0,189	0,238	0,193
	N_2	0,198	0,213	0,267	0,226
	N_3	0,173	0,192	0,240	0,202
średnio		0,163	0,192	0,241	**0,199**
Średnio	**N_0**	0,125	0,156	0,218	**0,167**
	N_1	0,144	0,174	0,221	**0,180**
	N_2	0,172	0,209	0,252	**0,211**
	N_3	0,155	0,184	0,233	**0,190**
Średnio		**0,149**	**0,181**	**0,231**	**0,187**
$NIR_{0,05}$	**I czynnik**		**0,044**		
	II czynnik		**0,015**		
	III czynnik		**0,013**		
$NIR_{0,05}$ dla interakcji					
I/II	**II/I**		n.i.		
I/III	**III/I**		n.i.		
II/III	**III/II**		n.i.		

n.i. – różnice nie istotne

W badaniach BORIE i RUBIO [2003] stwierdzono, że gleby uprawne były zasobniejsze w fosfor związków organicznych (średnio 0,161 $gP \cdot kg^{-1}$) od gleb nie uprawianych (średnio 0,114 $gP \cdot kg^{-1}$). Według POTARZYCKIEGO [2006] dynamika przemian organicznych związków fosforu w glebie zależy od właściwości gleby, kształtowanych głównie przez nawożenie w latach poprzednich.

Największą zawartość P_{org} (0,249 $gP \cdot kg^{-1}$ średnio dla dawek azotu i terminów pobierania próbek glebowych) stwierdzono w glebie pobranej z obiektów nawożonych obornikiem w dawce 60 $t \cdot ha^{-1}$ (tab.4.6). W glebie pobranej z obiektów nie nawożonych obornikiem średnia zawartość fosforu związków organicznych była niższa średnio o 49%. Dużą rolę obornika w nagromadzaniu się fosforu związków organicznych w glebie wykazali inni autorzy: KALEMBASA i in. [1995], ERICH i in. [2002], SZARA i in. [2005]. Autorzy ci stwierdzili, że ilość fosforu w połączeniach organicznych w obiektach nawożonych obornikiem była wyższy w porównaniu do obiektów na których nie zastosowano tego nawozu. W badaniach własnych stwierdzono, że wraz ze wzrostem zastosowanej dawki obornika do 60 $t \cdot ha^{-1}$, wzrastała zawartość badanej frakcji fosforu w glebie. W glebie z obiektów, na których stosowano obornik w dawce 80 $t \cdot ha^{-1}$ stwierdzono istotny spadek zawartości fosforu związków organicznych wynoszący 21%.

TUJAKA [2002] uważa, że długoletnie nawożenie organiczne w postaci gnojowicy bydlęcej zwiększa aktywność mikrobiologiczną gleby oraz potencjał mineralizacji glebowej substancji organicznej, co w konsekwencji może wywołać zwiększoną transformację organicznej, bardziej labilnej frakcji fosforu we frakcję mineralną.

Nawożenie azotem mineralnym w postaci saletry amonowej spowodowało istotne zmiany zawartości P_{org} w badanej glebie płowej. Najwyższą zawartość P_{org} (0,211 $gP \cdot kg^{-1}$ średnio dla wszystkich dawek obornika i terminów pobierania próbek glebowych) uzyskano w próbkach glebowych pobranych z obiektów nawożonych azotem mineralnym w dawce N_2. Maksymalna dawka azotu N_3 spowodowała spadek zawartości fosforu związków organicznych w glebie o 10%. W próbkach glebowych pobranych z obiektów, na których nie zastosowano nawożenia azotem mineralnym zawartość badanej frakcji fosforu była najniższa i kształtowała się na poziomie 0,167 $gP \cdot kg^{-1}$ (średnio dla wszystkich dawek obornika i terminów pobierania próbek glebowych). MCDOWELL I MONAGHAN [2002] dla obserwacji zmian zawartość P_{og} i P_{org} w glebie, zastosowali w doświadczeniu dwie dawki azotu mineralnego: 200 $kgN \cdot ha^{-1}$ i 400 $kgN \cdot ha^{-1}$ oraz obiekt kontrolny – bez azotu. W glebie z obiektów kontrolnych zawartość P_{og} i P_{org} była najwyższa. Zastosowanie najwyższej dawki N spowodowało spadek P_{og} o 12% i P_{org} o 6%.

W badaniach własnych stwierdzono istotne zmiany zawartości badanej frakcji fosforu w zależności od terminu pobierania próbek glebowych (tab. 4.6). W trakcie sezonu wegetacyjnego uprawianych roślin stwierdzono spadek zawartości fosforu związków organicznych w glebie. W próbkach glebowych pobranych w 1 terminie (w okresie wiosennym) zawartość P_{org} była istotnie najniższa i wyniosła 0,149 $gP \cdot kg^{-1}$. W glebie

pobranej w 3 terminie (jesień) nastąpił wzrost zawartości P_{org} o 36% (tab. 4.6). Kształtowanie się zawartości fosforu związków organicznych w glebie związane jest zarówno z działalnością mikroorganizmów jak i z aktywnością fosfomonoesteraz glebowych, które cechuje duża zmienność sezonowa, co związane jest z ilością opadów atmosferycznych oraz temperaturą powietrza. Wczesną wiosną, gdy temperatura gleby jest niska, procesy mikrobiologiczne rozkładu związków organicznych zachodzą wolno [PAUL I CLARK 2000].

Dostępność fosforu związków organicznych dla roślin zależy od tempa mineralizacji, a nie od ogólnej zawartości zawiązków organicznych. Dlatego wartość stosunku C_{org}:P_{org} uważana jest za dobry wskaźnik mineralizacji fosforu związków organicznych w glebie. Wartości stosunku C_{org}:P_{org} zostały przedstawione w tabeli 4.7.

Tabela 4.7

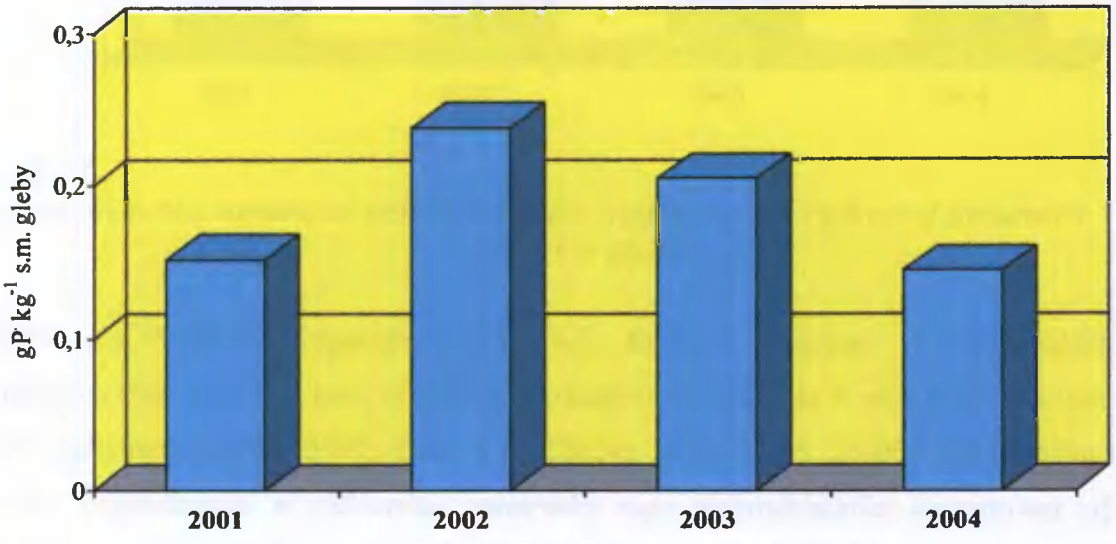
Wartość stosunku C_{org}:P_{org} badanej gleby w ciągu jednej rotacji w latach 2001-2004

Dawka obornika t·ha^{-1}	Dawka azotu kg·ha^{-1}	2001	2002	2003	2004
		C_{org}:P_{org}	C_{org}:P_{org}	C_{org}:P_{org}	C_{org}:P_{org}
0	N_0	34,3	42,6	46,6	114
	N_1	41,2	40,3	41,9	89,6
	N_2	55,2	34,2	32,7	74,1
	N_3	43,1	43,0	45,3	82,1
20	N_0	41,3	38,7	54,6	105
	N_1	47,2	36,0	43,1	82,7
	N_2	41,5	36,2	38,3	79,4
	N_3	52,6	38,6	40,0	90,0
40	N_0	38,4	39,2	41,9	72,7
	N_1	39,1	39,0	42,4	71,4
	N_2	49,6	36,6	35,0	71,6
	N_3	47,2	38,1	37,3	73,8
60	N_0	37,5	34,5	26,9	55,4
	N_1	37,2	31,2	24,8	51,3
	N_2	40,5	28,0	24,6	38,6
	N_3	38,0	30,5	25,5	54,5
80	N_0	28,5	39,7	40,8	76,0
	N_1	43,0	36,8	35,7	69,7
	N_2	65,5	33,6	30,1	61,8
	N_3	54,5	35,2	32,8	72,5
średnio		43,7	36,6	37,0	74,3

W okresie przeprowadzonych badań wartości tego stosunku kształtowały się w granicach 24,6 - 114 w zależności od zastosowanego nawożenia. We wcześniejszych badaniach BORIE I RUBIO [2003] wartość stosunku C_{org}:P_{org} kształtowała się na poziomie 41-71 dla gleb nieuprawnych. Natomiast nieco niższymi wartościami tego stosunku: 36-38 charakteryzowały się gleby uprawne [OEHL i in. 2004]. Według tych autorów, wartości te

świadczą o ścisłym związku zawartości P_{org} z nagromadzoną materią organiczną w glebie. Natomiast AGBENIN I GOLADI [1997] stwierdzili, że niskie wartości stosunku C_{org}:P_{org} (<50) mogą być skutkiem unieruchomienia fosforu zawartego w połączeniach organicznych przez nieorganiczne koloidy glebowe. W takiej sytuacji następuje brak ścisłej relacji pomiędzy zawartością C_{org} i P_{org}, ponieważ zawartość fosforu związków organicznych jest niezależna od zawartości organicznej materii glebowej. Najniższą wartość stosunku C_{org}:P_{org} (średnio 36,6) uzyskano w próbkach glebowych pobranych w roku 2002 spod uprawy pszenicy ozimej, natomiast najwyższą (74,3) w próbkach pobranych w 2004 roku spod uprawy kukurydzy (tab.4.7). Podobne wartości stosunku C_{org}:P_{org} w glebie spod kukurydzy uzyskali PHIRI i in. [2001]. Zwykle gleby nawożone obornikiem w wyższych dawkach charakteryzowały się niższą wartością stosunku C_{org}:P_{org} w porównaniu do gleby, która nie była nawożona obornikiem. Świadczy to o większym nagromadzeniu fosforu związków organicznych w glebie nawożonej wyższymi dawkami zastosowanego w doświadczeniu obornika. Obornik w dawce 80 $t \cdot ha^{-1}$ spowodowała wzrost wartości stosunku C_{org}:P_{org}. Jest to związane z istotnym spadkiem zawartości P_{org} w glebie pobranej z obiektów nawożonych maksymalna dawką obornika.

Zawartość fosforu związków organicznych jako frakcja dynamiczna ulegała wyraźnym zmianom w ciągu czteroletniej rotacji (rys. 4.2).

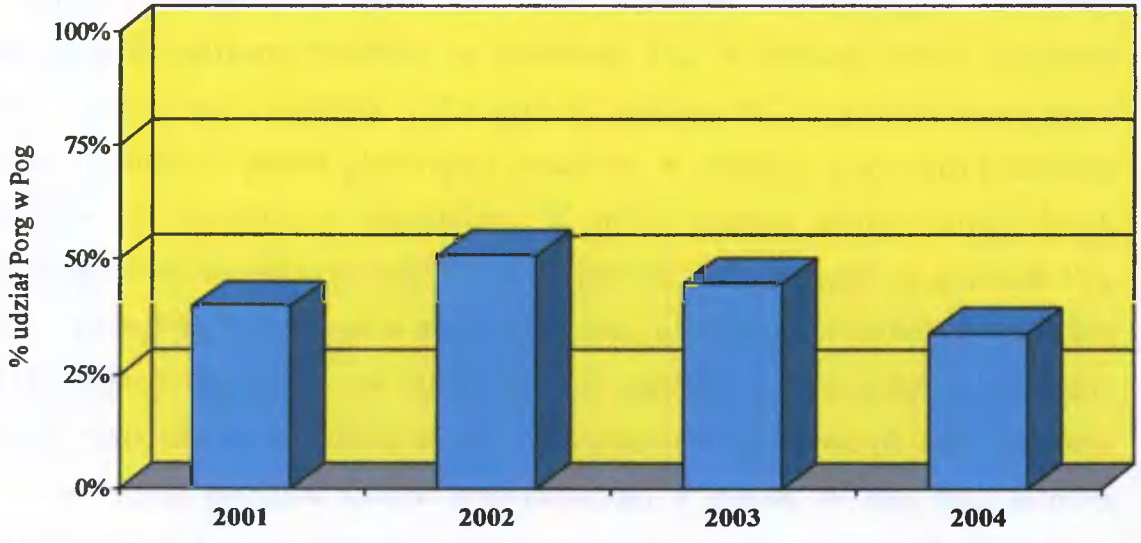


Rysunek 4.2
Zmiany zawartości fosforu związków organicznych w badanej glebie w ciągu rotacji

Największą zawartość tej frakcji fosforu (0,238 $gP \cdot kg^{-1}$) stwierdzono w roku 2002, czyli po dwóch latach od zastosowania obornika, w trakcie uprawy pszenicy ozimej.

Zwykle wykorzystanie fosforu z obornika wynosi 20 – 25% w pierwszym roku po jego zastosowaniu i około 60-65% w ciągu trzech następnych lat.

W większości gleb uprawnych fosfor zawarty w połączeniach organicznych stanowi 20-50% [POTARZYCKI 2003], chociaż wahania te mogą być według innych autorów znacznie większe [TARAFDAR I CLASSEN 1988, BRADY I WEIL 2002]. W badaniach własnych, w glebie płowej udział fosforu związków organicznych w całkowitej zawartości tego składnika wyniósł średnio dla czterech lat trwania rotacji 42%. Największy procentowy udział fosforu związków organicznych w całkowitej zawartości fosforu (51%), stwierdzono w glebie pobranej w 2002 roku spod uprawy pszenicy ozimej (rys. 4.3).



Rysunek 4.3
Procentowy udział zawartości fosforu związków organicznych w całkowitej zawartości fosforu w glebie.

W glebie tej wykazano największą kumulację fosforu zawartego w połączeniach organicznych (rys. 4.2), tym samym wartość stosunku C_{org}:P_{org} była w nich najniższa (tab. 4.7). W badaniach SĄDEJ [2000], OEHL i in. [2004], SZAREJ i in. [2005] udział fosforu związków organicznych w całkowitej zawartości tego makroskładnika kształtował się na podobnym poziomie i wyniósł 45,7%, 49-57% oraz 24-52%. Natomiast znacznie szerszy zakres tego udziału stwierdzono w badaniach GIBCZYŃSKIEJ I LEWANDOWSKIEJ [2004], gdzie w badanych glebach fosfor związków organicznych stanowił od 1,3 do 41,5% fosforu ogółem.

4.2.3. ZAWARTOŚĆ FOSFORU PRZYSWAJALNEGO

Zawartość fosforu przyswajalnego w glebie w trakcie 4 lat prowadzenia badań wahała się w przedziale 53,3-148 $mgP \cdot kg^{-1}$ gleby (tab. 4.8). Według kryteriów zawartych w PN-R-04023 [1996] badana gleba charakteryzowała się wysoką zawartością fosforu przyswajalnego. FOTYMA i in. [1996] twierdzą, że optymalna zawartość fosforu przyswajalnego (oznaczonego metodą Egnera-Riehma) powinna wynosić 105–108 $mgP \cdot kg^{-1}$. Jako krytyczną zawartość fosforu dla roślin przyjmuje się 30 $mgP \cdot kg^{-1}$ gleby. Uwzględniając tę wartość stwierdzono, że w badaniach własnych zawartość fosforu dostępnego w glebie była znacznie wyższa od wartości krytycznej. Zawartość P_{E-R} kształtowała się średnio na poziomie 90,7 $mgP \cdot kg^{-1}$.

Synteza wyników za okres 2001-2004 wykazała istotny wpływ nawożenia zróżnicowanymi dawkami obornika na zawartość P_{E-R} w badanej glebie. Najniższą zawartość fosforu przyswajalnego (74,5 $mgP \cdot kg^{-1}$ średnio dla wszystkich dawek azotu i terminów pobierania próbek glebowych) oznaczono w próbkach glebowych pobranych z obiektów nie nawożonych obornikiem. W miarę wzrostu zastosowanych dawek stwierdzono istotny wzrost zawartości P_{E-R} w glebie (tab. 4.8). Największą zawartość P_{E-R} (średnio 112 $mgP \cdot kg^{-1}$) uzyskano w glebie nawożonej obornikiem w dawce 60 $t \cdot ha^{-1}$. Jest to 33% wzrost zawartości w stosunku do gleby nie nawożonej obornikiem. Z badań SZYMAŃSKIEJ i in. [2005] wynika, że wieloletnie stosowanie obornika wyraźnie wpływa na wzrost poziomu fosforu przyswajalnego w glebie. Według tych autorów wynika to głównie z faktu wnoszenia wraz z obornikiem średnio około 13,5 $kgP \cdot ha^{-1}$tego składnika do gleby. Na obiektach nawożonych obornikiem w stosunku do obiektów, na których nie stosowano tego nawozu zawartość przyswajalnej frakcji fosforu była wyższa i wynosiła od 22 do 36%. Potwierdzają to również wcześniejsze badania STĘPNIA i in. [2002], którzy stwierdzili, że gleba z obiektów, na których zastosowano obornik, zawiera więcej fosforu przyswajalnego w porównaniu do gleby z obiektów bez tego nawozu. Obornik i gnojowica są łatwo dostępnym źródłem fosforu dla roślin, gdyż w zależności od stopnia mineralizacji, 50 – 70 % całego fosforu zawartego w tych nawozach stanowią związki mineralne, głównie fosforany wapnia [POTARZYCKI 2003]. Substancja organiczna zawiera związki fosforu, które są uwalniane w trakcie jej rozkładu i przemian w glebie. Powstają wówczas związki organiczne, miedzy innymi kwasy huminowe, mające zdolność zatrzymywania jonów Fe^{3+}, co z kolei zapobiega wytrącaniu się rozpuszczalnych fosforanów.

Tabela 4.8

Zawartość fosforu przyswajalnego (P_{E-R}) dla roślin [mgP·kg^{-1}] w badanej glebie w zależności od zróżnicowanego nawożenia obornikiem, azotem mineralnym i terminu pobierania próbek

Dawka obornika t·ha^{-1} I czynnik	Dawka azotu kg·ha^{-1} II czynnik	Termin III czynnik			średnio
		1	2	3	
0	N_0	53,3	63,3	72,3	62,7
	N_1	66,1	67,3	86,4	73,2
	N_2	78,9	77,1	96,9	84,3
	N_3	69,7	72,8	90,0	77,5
średnio		67,0	70,1	86,4	**74,5**
20	N_0	59,6	69,5	79,5	69,5
	N_1	69,1	73,1	94,3	78,8
	N_2	81,7	81,3	105	89,5
	N_3	72,1	77,1	95,7	81,6
średnio		70,6	75,3	93,7	**79,9**
40	N_0	67,9	73,3	88,2	76,4
	N_1	74,2	77,3	97,3	82,9
	N_2	85,9	92,1	120	99,4
	N_3	79,1	83,6	109	90,7
średnio		76,7	91,6	103	**87,4**
60	N_0	86,2	92,9	112	97,2
	N_1	91,7	101	124	105
	N_2	110	129	148	129
	N_3	95,4	118	132	115
średnio		95,9	110	129	**112**
80	N_0	78,1	81,7	99,8	86,5
	N_1	86,2	88,2	112	95,6
	N_2	97,7	107	137	114
	N_3	93,8	94,5	121	103
średnio		88,9	93,1	117	**99,9**
Średnio	**N_0**	69,0	76,2	90,5	**78,6**
	N_1	77,5	81,5	103	**87,3**
	N_2	90,9	97,6	122	**103**
	N_3	82,1	89,4	110	**93,8**
Średnio		**79,9**	**86,2**	**106**	**90,7**
$NIR_{0,05}$	**I czynnik**		**8,369**		
	II czynnik		**3,465**		
	III czynnik		**4,280**		
$NIR_{0,05}$ dla interakcji					
I/II	**II/I**		n.i.		
I/III	**III/I**		n.i.		
II/III	**III/II**		n.i.		

n.i. – różnice nie istotne

Fosfor nie pobierany przez rośliny gromadzi się systematycznie w glebie w formie przyswajalnej. Potwierdziły to badania PUŁY I ŁABZY [2004a], w których zawartość P_{E-R} w glebie nawożonej dawką obornika 30 t·ha^{-1} wynosiła 209 mgP·kg^{-1}. MERCIK i in. [1998] stwierdzili, że przy nawożeniu wyłącznie obornikiem w ilości 20 t·ha^{-1} rocznie, wyraźnie

wzrosła ilość fosforu dostępnego w glebie, przeciętnie o 1 $mgP \cdot kg^{-1}$ gleby rocznie. Z badań własnych wynika, że w glebie, na której zastosowano obornik w najwyższej dawce – 80 $t \cdot ha^{-1}$ nastąpił spadek zawartości badanej frakcji fosforu o 11% w porównaniu do największej jego ilości oznaczonej w glebie nawożonej obornikiem w dawce 60 $t \cdot ha^{-1}$. KRISTAPONYTE [2005] stwierdziła, że nawożenie obornikiem w dawce 80 $t \cdot ha^{-1}$ z dodatkiem NPK spowodowało wzrost zawartości P_{E-R} w porównaniu do gleby z obiektów kontrolnych. Natomiast zastosowanie wyłącznie obornika w dawce 80 $t \cdot ha^{-1}$ z pominięciem nawożenia mineralnego spowodowało spadek zawartości P_{E-R} w porównaniu do zastosowanej kombinacji: obornik + NPK. Potwierdzają to wcześniejsze badania ABGENIN I GOLADI [1997], SIENKIEWICZ i in. [2004a], którzy stwierdzili, że nawożenie mineralne nie pokrywa w pełni zapotrzebowania roślin na C, N i P. Najlepsza skuteczność występuje przy połączeniu nawożenia obornikiem z nawożeniem mineralnym [TKACZYK I CHWIL 2004].

Z przeprowadzonych badań własnych wynika, że nawożenie azotem mineralnym miało istotny wpływ na zawartość fosforu przyswajalnego w badanej glebie płowej. Według RABIKOWSKIEJ I PISZCZ [2002] oddziaływanie nawożenia azotem na pobieranie fosforu może wynikać z dodatniego wpływu azotu na produkcję biomasy, oraz na koncentrację fosforu w tkankach roślin. Istotnie najwyższą zawartość P_{E-R} (103 $mgP \cdot kg^{-1}$ średnio dla dawek obornika i terminów pobierania próbek glebowych) stwierdzono w glebie nawożonej azotem mineralnym w dawce N_2. Zawartość ta była wyższa o 24% w porównaniu do zawartości P_{E-R} w glebie na której nie zastosowano nawożenia azotem mineralnym. Zastosowanie dawki azotu mineralnego N_3 spowodowało spadek zawartości P_{E-R} do 93,8 $mgP \cdot kg^{-1}$, który wynosił 8% w stosunku do dawki N_2. W badaniach RABIKOWSKIEJ I PISZCZ [2002], TKACZYK [2002], ŁABUDY i in. [2003] zaobserwowano spadek zwartości P_{E-R} w glebie pod wpływem wzrastających dawek azotu mineralnego, co autorzy wiążą ze wzrastającym pobieraniem fosforu przez rośliny. Również SZYMAŃSKA i in. [2005] stwierdzają, że w glebie pobranej z obiektów, na których od kilku lat stosowano nawożenie azotem zaobserwowano spadek zawartości fosforu przyswajalnego średnio o około 23% w stosunku do gleby z obiektów nie nawożonych azotem mineralnym. Działanie azotu z jednej strony można rozpatrywać poprzez jego oddziaływanie na wzrost plonów i wynikające stąd większe pobieranie fosforu, z drugiej zaś strony należy mieć na uwadze, że wysokie dawki N mogą powodować zwiększenie kwasowości gleby. Z badań własnych wynika, że dawka (N_3) azotu mineralnego spowodowała nieznaczne obniżenie wartości pH (tab. 4.1). Podobną tendencję w swoich

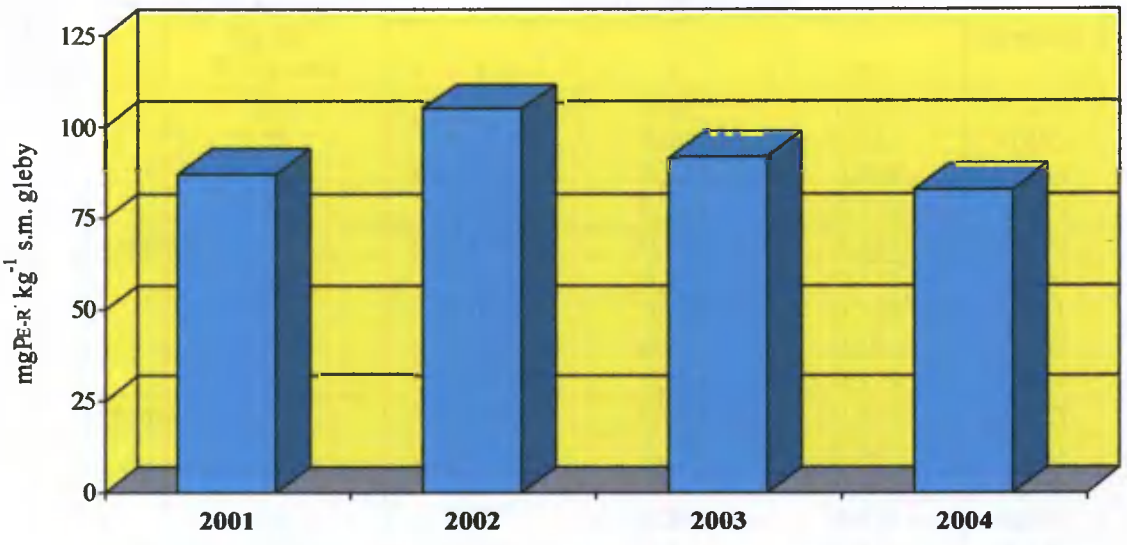
BIBLIOTEKA GŁÓWNA

badaniach zauważyły SPYCHAJ-FABISIAK i in. [2003]. Zbyt niski odczyn gleby zwiększa zawartość glinu, manganu i żelaza, które ograniczają przyswajalność fosforu dla roślin poprzez tworzenie nierozpuszczalnych, niedostępnych dla roślin soli. MOCEK i in. [2004] stwierdzili wyraźny wzrost P_{E-R} wraz z zastosowaniem zwiększonych dawek nawozów mineralnych.

Proces pobierania fosforu przyswajalnego przez roślinę zachodzi nierównomiernie w ciągu całego okresu wegetacji. We wszystkich latach trwania badań własnych istotnie największą zawartość P_{E-R} (średnio 106 $mgP \cdot kg^{-1}$) stwierdzono w próbkach glebowych pobranych w trzecim terminie (jesień). Natomiast najniższa zawartość P_{E-R} (średnio 79,9 $mgP \cdot kg^{-1}$) była w glebie pobranej w pierwszym terminie (wiosna). Różnica zawartości fosforu przyswajalnego w glebie pobranej w tych terminach wyniosła 25%. Niską zawartość fosforu przyswajalnego w pierwszym terminie pobierania próbek glebowych można tłumaczyć dużym zapotrzebowaniem roślin w początkowym okresie rozwoju, kiedy fosfor decyduje o szybkości wzrostu systemu korzeniowego. Tym samym określa zdolność rośliny do pobierania wody i składników pokarmowych z gleby. MOCARSKI [2004] również stwierdził najniższą zawartość P_{E-R} w próbach glebowych pobranych z warstwy 5-15 cm spod uprawy buraka cukrowego wiosną, wzrost latem, natomiast jesienią nastąpił spadek zawartości fosforu przyswajalnego Autor tłumaczy to głównie zapotrzebowaniem pokarmowym uprawianej rośliny. Również czynniki środowiskowe takie jak wilgotność gleby spełniają istotna rolę w procesie dyfuzji fosforanów w kierunku korzenia rośliny. W badaniach własnych w pierwszym terminie pobierania próbek glebowych (wiosna) opady atmosferyczne były niższe niż w terminie jesiennym. W miarę zmniejszania się uwilgotnienia gleby, zwiększa się udział porów glebowych wypełnionych powietrzem, przez co przewodzenie wody i dyfundujących składników pokarmowych jest utrudnione [GRZEBISZ I POTARZYCKI 2003]. Szczególnie ważnym czynnikiem, który powoduje zmniejszenie pobierania fosforu jest niska temperatura. Ma to miejsce głównie w maju i na początku czerwca, gdy dni są stosunkowo ciepłe a noce chłodne. W niskich temperaturach zwiększa się lepkość roztworu glebowego oraz obniża się tempo dyfuzji, co zmniejsza ilość składników mineralnych docierających do korzenia w celu ich zaabsorbowania [KRUCZEK I SULEWSKA 2005].

Największą zawartość fosforu przyswajalnego w glebie uzyskano w próbach glebowych pobranych w drugim roku trwania badań własnych (2002 rok), spod uprawy pszenicy ozimej (średnio 105 $mgP \cdot kg^{-1}$) (rys. 4.4). W próbach z kolejnych lat przeprowadzonych badań, następował systematyczny spadek zawartości P_{E-R}. W czwartym

roku badań, w glebie pobranej spod uprawy kukurydzy, zawartość obniżyła się do 83 $mgP \cdot kg^{-1}$ – spadek ten wyniósł 21% w stosunku do zawartości P_{E-R} w próbkach pobranych w 2002 roku. Prawdopodobnie może to mieć związek z dużymi wymaganiami pokarmowymi kukurydzy w stosunku do fosforu.



Rysunek 4.4
Zmiany zawartości fosforu przyswajalnego dla roślin w glebie w trakcie trwania rotacji

4.3. AKTYWNOŚĆ FOSFOMONOESTERAZ GLEBOWYCH

Aktywność fosfatazy alkalicznej kształtowała się średnio na poziomie 0,572 mmol $pNP \cdot kg^{-1} \cdot h^{-1}$, natomiast aktywność fosfatazy kwaśnej była wyższa i wyniosła średnio 1,37 mmol $pNP \cdot kg^{-1} \cdot h^{-1}$ (tab.4.9, tab. 4.10). DICK I TABATABAI [1984], WITTMANN i in. [2004] wyższą aktywność fosfatazy kwaśnej tłumaczą tym, że fosfomonoesterazy są enzymami najbardziej wrażliwymi na zmiany odczynu gleby, optimum pH gleby dla aktywności fosfatazy alkalicznej wynosi 9,0-11,0, a dla fosfatazy kwaśnej 4,0-6,5. W badaniach własnych gleba płowa charakteryzowała się odczynem kwaśnym i lekko kwaśnym, co zadecydowało o wyższej aktywności fosfatazy kwaśnej w porównaniu do alkalicznej. Na podstawie przeprowadzonej analizy wariancji, udowodniono statystycznie wpływ zastosowanych w doświadczeniu czynników na zmiany aktywności fosfatazy alkalicznej i kwaśnej w glebie (tab. 4.9 i tab. 4.10). Nawożenie zarówno mineralne jak i organiczne stymuluje rozwój roślin i mikroorganizmów glebowych oddziaływując również na aktywność enzymatyczną gleby. Nawożenie zróżnicowanymi dawkami obornika w istotny sposób modyfikowało aktywność fosfatazy alkalicznej i kwaśnej w badanej glebie. Najniższą aktywność AlP (0,499 mmol $pNP \cdot kg^{-1} \cdot h^{-1}$ średnio

dla dawek azotu i terminów pobieranie próbek glebowych) stwierdzono w glebie pobranej z obiektów, na których nie stosowano nawożenia obornikiem.

Tabela.4.9

Aktywność fosfatazy alkalicznej [mmol pNP·kg^{-1}·h^{-1}] w badanej glebie w zależności od zróżnicowanego nawożenia obornikiem, azotem mineralnym i terminu pobierania próbek

Dawka obornika t·ha^{-1} I czynnik	**Dawka azotu kg·ha^{-1} II czynnik**	**Termin III czynnik**			**średnio**
		1	**2**	**3**	
0	N_0	0,574	0,452	0,297	0,441
	N_1	0,653	0,499	0,333	0,495
	N_2	0,727	0,540	0,368	0,545
	N_3	0,670	0,525	0,350	0,515
średnio		0,656	0,504	0,337	**0,499**
20	N_0	0,614	0,496	0,313	0,474
	N_1	0,655	0,530	0,348	0,511
	N_2	0,718	0,579	0,391	0,563
	N_3	0,701	0,552	0,379	0,544
średnio		0,672	0,539	0,357	**0,523**
40	N_0	0,684	0,516	0,341	0,513
	N_1	0,705	0,549	0,397	0,551
	N_2	0,787	0,594	0,429	0,603
	N_3	0,743	0,571	0,413	0,576
średnio		0,730	0,557	0,395	**0,576**
60	N_0	0,789	0,609	0,412	0,604
	N_1	0,846	0,649	0,439	0,645
	N_2	0,986	0,723	0,506	0,739
	N_3	0,875	0,668	0,460	0,668
średnio		0,874	0,662	0,454	**0,664**
80	N_0	0,748	0,581	0,374	0,568
	N_1	0,775	0,613	0,418	0,602
	N_2	0,865	0,664	0,434	0,655
	N_3	0,824	0,629	0,417	0,624
średnio		0,874	0,622	0,411	**0,612**
Średnio	**N_0**	0,682	0,531	0,347	**0,520**
	N_1	0,727	0,568	0,387	**0,561**
	N_2	0,816	0,620	0,426	**0,621**
	N_3	0,763	0,589	0,404	**0,585**
Średnio		**0,747**	**0,577**	**0,391**	**0,572**
$NIR_{0,05}$	**I czynnik**		**0,080**		
	II czynnik		**0,016**		
	III czynnik		**0,032**		
$NIR_{0,05}$ dla interakcji					
I/II	**II/I**		n.i.		
I/III	**III/I**		n.i.		
II/III	**III/II**		n.i.		

n.i. – różnice nie istotne

Wzrastające dawki nawozu organicznego spowodowały wzrost aktywności AlP. Istotnie najwyższą aktywność AlP (0,664 mmol pNP·kg^{-1}·h^{-1} średnio dla dawek azotu

mineralnego i terminu pobierania próbek glebowych), stwierdzono w próbkach gleby pobranej z obiektów nawożonych obornikiem w dawce 60 $t \cdot ha^{-1}$ (tab. 4.9). Natomiast w glebie pobranej z poletek nawożonych maksymalną dawką 80 $t \cdot ha^{-1}$, nastąpił spadek aktywności AlP o 8% w porównaniu do dawki obornika 60 $t \cdot ha^{-1}$. Istotnie najwyższą aktywność fosfatazy kwaśnej (1,56 mmol $pNP \cdot kg^{-1} \cdot h^{-1}$ średnio dla dawek azotu mineralnego i terminu pobierania próbek glebowych) stwierdzono w próbkach pobranych z obiektów nawożonych obornikiem w dawce 60 $t \cdot ha^{-1}$ (tab. 4.10). W glebie, która nie była nawożona obornikiem aktywność AcP była niższa o 26% w porównaniu do aktywności AcP w glebie z obiektów nawożonych obornikiem w dawce 60 $t \cdot ha^{-1}$ i wyniosła 1,17 mmol $pNP \cdot kg^{-1} \cdot h^{-1}$. W badaniach MARCOTE i in. [2001] obornik powodował wzrost aktywności fosfatazowej gleby średnio o 8% w porównaniu do nawożenia mineralnego NPK. Według KUCHARSKIEGO [1997], STRZELEC [1997] obornik zwykle wpływa stymulująco na aktywność fosfomonoesteraz glebowych. Według MYŚKOWA i in. [1996] systematyczne stosowanie nawozów organicznych powoduje zwiększenie zawartości węgla związków organicznych w glebie, a w następstwie tego wzmożenie ich aktywności biologicznej. Może to być spowodowane prawdopodobnie stabilizacją zewnątrzkomórkowych enzymów przez związanie ich z substancja humusową [NANIPIERI i in. 1996, KANDELER i in. 1999]. W badaniach własnych zastosowany obornik również istotnie zwiększył zawartość C_{org} w glebie. Obecność substratów węglowych indukuje i stymuluje biosyntezę enzymów przez mikroorganizmy glebowe.

Synteza wyników z lat 2001-2004 wykazała, że nawożenie azotem mineralnym w istotny sposób wpłynęło na zmiany aktywności badanych fosfomonoesteraz glebowych. Najniższą aktywność fosfatazy alkalicznej 0,520 mmol $pNP \cdot kg^{-1} \cdot h^{-1}$ uzyskano w próbkach gleby pobranych z obiektów, które nie były nawożone azotem mineralnym (tab.4.9). Najwyższą aktywność AlP (0,621 mmol $pNP \cdot kg^{-1} \cdot h^{-1}$ średnio dla dawek obornika i terminów pobierania prób glebowych) oznaczono w glebie pobranej z obiektów nawożonych azotem mineralnym w dawce N_2. Po zastosowaniu dawki N_2 nastąpił wzrost aktywności AlP średnio o 16% w stosunku do obiektów N_0. Aktywność fosfatazy kwaśnej również była najniższa w glebie z obiektów N_0 i wyniosła średnio 1,26 mmol $pNP \cdot kg^{-1} \cdot h^{-1}$. W miarę zwiększania dawek azotu mineralnego, aktywność fosfatazy kwaśnej wzrastała. Po zastosowaniu dawki N_3 aktywność AcP była istotnie najwyższa i osiągnęła wartość 1,48 mmol $pNP \cdot kg^{-1} \cdot h^{-1}$. W przypadku zastosowania dawki N_2 aktywność AcP była niższa o 5% w stosunku do aktywności AcP w glebie z obiektów nawożonych azotem N_3.

Tabela 4.10

Aktywność fosfatazy kwaśnej [m mol pNP·kg^{-1}·h^{-1}] w badanej glebie w zależności od zróżnicowanego nawożenia obornikiem, azotem mineralnym i terminu pobierania próbek

Dawka obornika t·ha^{-1} I czynnik	Dawka azotu kg·ha^{-1} II czynnik	Termin III czynnik			średnio
		1	2	3	
0	N_0	1,34	1,20	0,811	1,06
	N_1	1,46	1,08	0,872	0,139
	N_2	1,59	1,59	1,12	0,203
	N_3	1,72	1,08	0,997	1,27
średnio		1,53	1,07	0,892	**1,17**
20	N_0	1,47	1,11	0,895	1,16
	N_1	1,62	1,20	0,918	1,25
	N_2	1,59	1,23	0,926	1,25
	N_3	1,67	1,27	1,01	1,32
średnio		1,59	1,20	0,936	**1,26**
40	N_0	1,63	1,06	1,00	1,23
	N_1	1,75	1,28	1,01	1,35
	N_2	1,80	1,31	1,21	1,45
	N_3	1,91	1,44	1,12	1,50
średnio		1,77	1,27	1,08	**1,38**
60	N_0	1,84	1,44	1,10	1,46
	N_1	1,91	1,51	1,18	1,54
	N_2	1,98	1,57	1,21	1,59
	N_3	2,09	1,79	1,26	1,72
średnio		1,95	1,58	1,19	**1,56**
80	N_0	1,75	1,33	1,00	1,36
	N_1	1,79	1,42	1,06	1,43
	N_2	1,87	1,47	1,12	1,49
	N_3	2,02	1,58	1,18	1,56
średnio		1,86	1,45	1,09	**1,47**
Średnio	**N_0**	1,61	1,20	0,963	**1,26**
	N_1	1,71	1,30	1,01	**1,34**
	N_2	1,77	1,35	1,07	**1,40**
	N_3	1,89	1,44	1,11	**1,48**
Średnio		**1,75**	**1,32**	**1,04**	**1,37**
$NIR_{0,05}$	**I czynnik**		**0,091**		
	II czynnik		**0,054**		
	III czynnik		**0,174**		
$NIR_{0,05}$ dla interakcji					
I/II	**II/I**		n.i.		
I/III	**III/I**		n.i.		
II/III	**III/II**		n.i.		

n.i. – różnice nie istotne

Podobne wyniki we wcześniejszych badaniach uzyskali MARTYNIUK i in. [1997], MARTYNIUK i in. [1998], GAJDA i in. [2000]. NOWAK i in. [2000] stwierdzają, że to głównie bardzo duże dawki saletry amonowej wpływają na zahamowanie aktywności

fosfatazy zasadowej i kwaśnej w glebie w porównaniu do saletry wapniowej i saletry potasowej.

Inhibitujące działanie dawki azotu N_3 w przypadku aktywności fosfatazy alkalicznej, a aktywujące w przypadku fosfatazy kwaśnej związane było z zakwaszającym oddziaływaniem wysokich dawek azotu mineralnego na środowisko glebowe. Również MYŚKÓW i in. [1996] stwierdzili ujemny wpływ wysokiego nawożenia azotem na aktywność niektórych grup drobnoustrojów i enzymów glebowych. Nawożenie mineralne w mniejszym stopniu wzmaga namnażanie się drobnoustrojów niż organiczne, dlatego również wpływ nawożenia mineralnego na aktywność enzymatyczną jest mniejszy niż nawożenia organicznego [PARHAM i in. 2002], PIOTROWSKA I KOPER [2006]. KUCHARSKI [1997] skonstatował w swoich badaniach, że wzrastające dawki do 240 kg $N \cdot ha^{-1}$ systematycznie ograniczały aktywność AlP, jednocześnie wzmagając aktywność AcP. Nawozy fizjologicznie kwaśne, a do takich należy zastosowana w doświadczeniu saletra amonowa, poprzez nawet nieznaczne obniżenie stanu zakwaszenia, decydują zarówno o rozwoju roślin, drobnoustrojów jak i o nasileniu i kierunku procesów biochemicznych. Zatem czynniki modyfikujące odczyn gleby mogą również wpływać na dynamikę jej aktywności fosfatazowej.

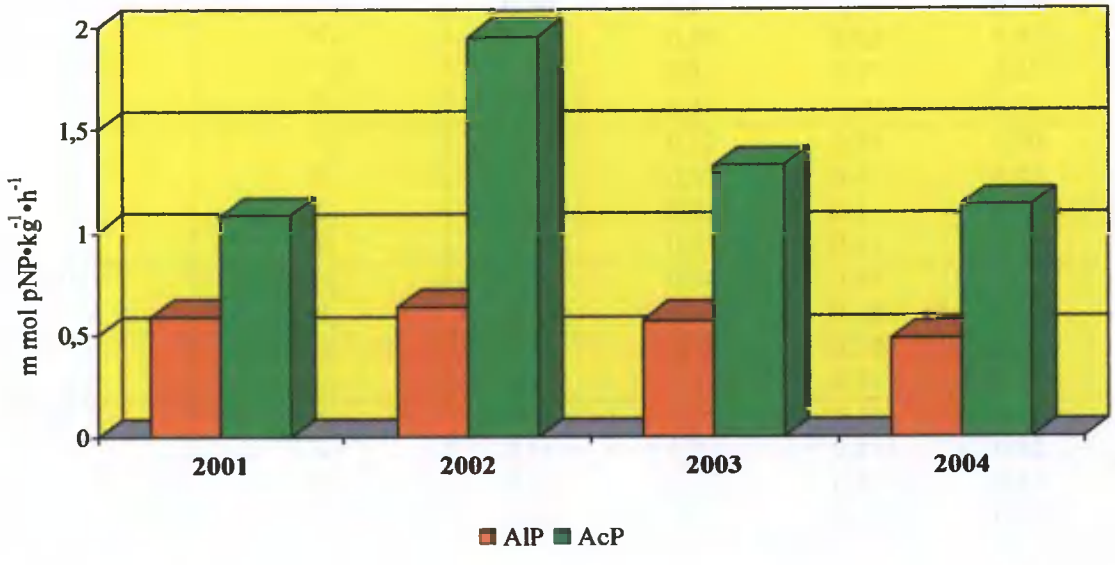
Aktywność badanych fosfomonoesteraz ulegała istotnym zmianom w trakcie sezonu wegetacyjnego uprawianych roślin. Istotnie najwyższą aktywność fosfatazy alkalicznej i kwaśnej uzyskano w próbkach glebowych pobranych w I terminie (wiosna). Aktywność AlP kształtowała się średnio na poziomie 0,747 mmol $pNP \cdot kg^{-1} \cdot h^{-1}$, a AcP – 1,75 mmol $pNP \cdot kg^{-1} \cdot h^{-1}$. W glebie pobranej w 3 terminie (jesień) aktywność fosfatazy alkalicznej była niższa o 48%, a kwaśnej o 41% w porównaniu do aktywności badanych enzymów w próbkach glebowych pobranych wiosną. Również GIANFREDA I BOLLAG [1996], NAGARAJA i in. [1998], KACZOROWSKA [1999], FURCZAK [2006] stwierdzili wysoką aktywność fosfatazową w glebie pobranej wiosną i latem, natomiast spadek w glebie pobranej jesienią. Intensywność wydzielania fosfataz przez rośliny i mikroorganizmy pozostaje w ścisłej zależności od zapotrzebowania roślin na fosfor. Potrzeby pokarmowe młodych roślin są duże, w związku z tym tempo mineralizacji glebowych organicznych połączeń fosforu na drodze enzymatycznej jest w tym okresie nasilone. MARCOTE i in. [2001] odnotowali wyższą aktywność fosfatazową w glebie pobranej w kwietniu spod uprawy jęczmienia w porównaniu do aktywności uzyskanej w glebie pobranej pod koniec czerwca. Natomiast w badaniach KRZYWEJ i in. [2006] aktywność glebowej fosfatazy alkalicznej i kwaśnej była wyższa w próbkach pobranych

jesienią, po zbiorze rzepaku jarego w porównaniu z wiosennym terminem. Autorzy wiążą to z dłuższym okresem rozkładu masy organicznej w glebie.

Zwykle aktywność fosfataz glebowych jest odwrotnie proporcjonalna do zawartości w niej fosforu mineralnego, gdyż podwyższony poziom nieorganicznego fosforu w glebie obniża aktywność fosfataz [KIELISZEWSKA-ROKICKA 2001]. Aktywność fosfataz zostaje wówczas zahamowana przez mineralny fosforan, który działa jak inhibitor kompetycyjny [SIUDA 2001]. Potwierdzają to badania własne, w których stwierdzono najwyższą, aktywność fosfatazową w glebie pobranej w 1 terminie, przy jednocześnie najniższej zawartości w glebie fosforu przyswajalnego. Według FUKUDA i in. [2001] rośliny zwykle wydzielają kwaśną fosfatazę do gleby, gdy dostępność fosforu przyswajalnego jest niska, jednakże gatunki roślin różnią się ilością i aktywnością wydzielanego enzymu. Natomiast JANUSZEK [1999], BIELIŃSKA [2001], BIELIŃSKA I LIGĘZA [2003] wskazali na ścisłą współzależność pomiędzy aktywnością fosfataz i zawartością fosforu przyswajalnego – wysoka aktywność badanych fosfataz powiązana była z wielokrotnie większą niż w glebach obiektów kontrolnych zawartością $P_{E\text{-}R}$. Interpretacja tego zjawiska jest złożona ze względu na możliwość długotrwałego występowania w glebie enzymów zewnątrzkomórkowych w połączeniach z koloidami glebowymi. Wiadomo, że dla fosfomonoesteraz, do których należy fosfataza, substratem są związki fosforoorganiczne występujące w glebie. W dużym stopniu znajomość wielkości tych dwóch parametrów powinna umożliwiać oszacowanie kształtowania się zawartości fosforu dostępnego dla roślin, za którą można uważać fosfor oznaczony metodą Egnera-Riehma. Wielu autorów uważa, że zmiany sezonowe aktywności enzymatycznej gleby są wypadkową panujących warunków hydrotermicznych – rozkładu temperatur, opadów, gdyż są to czynniki, które maja największy wpływ na życie mikroorganizmów i związaną z nimi aktywnością enzymatyczną gleby [SPEIR I COWLING 1991, MARTYNIUK i in. 1997, NOWAK I KĄKLEWSKI 2003, CRIQUET i in. 2004]. Niedobór wody powoduje silne zakłócenia w rozwoju i aktywności mikroflory glebowej i jednocześnie wydzielaniu enzymów do środowiska.

Aktywność fosfatazy alkalicznej i kwaśnej ulegała zmianom w trakcie czteroletniej rotacji (rys. 4.5). Najwyższą aktywność zarówno fosfatazy alkalicznej (średnio 0,640 mmol $pNP \cdot kg^{-1} \cdot h^{-1}$), jak i fosfatazy kwaśnej (1,95 mmol $pNP \cdot kg^{-1} \cdot h^{-1}$) uzyskano w próbkach glebowych pobranych w drugim roku badań, kiedy uprawiano pszenicę ozimą. W próbach pobranych w 2004 roku, w którym uprawiono kukurydzę, aktywność AlP spadła o 25%, a AcP o 42% w porównaniu do aktywności badanych

enzymów w glebie pobranej w roku 2002. GAJDA i in. [2000] stwierdzili wyższą aktywność fosfatazy alkalicznej i kwaśnej w glebie pobranej spod uprawy jęczmienia jarego w porównaniu do aktywności tych enzymów w glebie spod ziemniaka. Wcześniejsze badania [KUCHARSKI I NIEWOLAK 1997, BALOTA i in. 2004] wskazują, że aktywność enzymatyczna gleby pozostaje w ścisłej zależności od gatunku uprawianej rośliny oraz systemu uprawy. Wiadomo bowiem, że skład ilościowy i jakościowy wydzielin korzeniowych oraz następczy wpływ resztek roślinnych dostających się do gleby kształtuje w dużej mierze ten parametr biochemiczny [GIANFREDA I BOLLAG 1996]. PAWLUCZUK [1990] stwierdził zależności między aktywnością enzymatyczną gleby (celulaza, fosfataza, dehydrogenaza, rodanaza, ureaza, katalaza), a gatunkiem uprawianej rośliny. KUCHARSKI i in. [1996], KUCHARSKI [1997], FURCZAK i in. [2001], FURCZAK [2006] uważają, że zarówno udział roślin w zmianowaniu, jak również rodzaj przedplonu nie zawsze musi być związany ze zmianą aktywności enzymów glebowych. Również wyższa temperatura powietrza w drugim roku badań własnych sprzyjała wzmaganiu aktywności glebowej fosfatazy.



Rysunek 4.5
Zmiany aktywności fosfatazy alkalicznej i fosfatazy kwaśnej w glebie w latach 2001-2004

Na podstawie uzyskanych wyników aktywności fosfatazy alkalicznej i fosfatazy kwaśnej obliczono wartości stosunku AlP:AcP określane jako enzymatyczny wskaźnik poziomu pH. Wartości stosunku AlP:AcP w trakcie prowadzonych badań własnych mieściły się w zakresie 0,29-0,68 (tab. 4.11). Jako odpowiedni zakres wartości pH gleby dla wzrostu i rozwoju roślin, można uważać taką wartość, przy której występuje właściwy stosunek aktywności AlP:AcP [DICK i in. 2000]. Według tych autorów jeśli wartość

stosunku AlP:AcP jest niższa od 0,5, świadczy to o kwaśnym odczynie gleby i wskazane jest jej wapnowanie. Uzyskane wyniki wartości stosunku AlP:AcP, pokazują, że tylko gleba pobrana w pierwszym roku badań spod uprawy ziemniaka, charakteryzowała się średnią wartością powyżej 0,5. W glebie pobranej w pozostałych latach wartość stosunku AlP:AcP nie przekroczyła 0,5. Najniższą wartość tego stosunku - średnio 0,32 uzyskano w glebach pobranych w drugim roku badań, spod uprawy pszenicy ozimej. Dane pokrywają się z wynikami uzyskanymi z pomiarów odczynu gleby w H_2O i KCl o stężeniu 1 mol·dm^{-1} (tab. 4.1). Odczyn badanej gleby był również najniższy w drugim roku trwania badań własnych.

Tabela 4.11

Wartość stosunku AlP:AcP w badanej glebie w ciągu rotacji w latach 2001-2004

Dawka obornika t·ha^{-1}	Dawka azotu kg·ha^{-1}	2001	2002	2003	2004
0	N_0	0,62	0,33	0,40	0,40
	N_1	0,68	0,33	0,41	0,43
	N_2	0,67	0,33	0,44	0,49
	N_3	0,58	0,29	0,38	0,43
20	N_0	0,56	0,31	0,41	0,43
	N_1	0,56	0,30	0,42	0,45
	N_2	0,57	0,34	0,43	0,48
	N_3	0,56	0,30	0,39	0,43
40	N_0	0,56	0,32	0,39	0,40
	N_1	0,55	0,32	0,42	0,42
	N_2	0,53	0,36	0,44	0,45
	N_3	0,49	0,31	0,41	0,39
60	N_0	0,50	0,34	0,44	0,40
	N_1	0,50	0,34	0,46	0,42
	N_2	0,53	0,36	0,52	0,51
	N_3	0,48	0,31	0,44	0,38
80	N_0	0,59	0,35	0,43	0,37
	N_1	0,51	0,35	0,45	0,40
	N_2	0,52	0,35	0,50	0,45
	N_3	0,48	0,30	0,45	0,39

4.4. ZAWARTOŚĆ FOSFORU W ANALIZOWANYCH ROŚLINACH

4.4.1. ZAWARTOŚĆ FOSFORU OGÓŁEM

Zawartość fosforu ogółem w okresie wegetacji badanych roślinach istotnie różnicowało nawożenie obornikiem i azotem mineralnym. Zawartość fosforu ogółem w bulwie ziemniaka kształtowała się na poziomie średnio 2,89 gP·kg^{-1} (tab. 4.12). Najniższą zawartość P_{og} (2,82 gP·kg^{-1} średnio dla dawek azotu i fazy fenologicznej ziemniaka) stwierdzono w bulwach pobranych z obiektów na których nie zastosowano obornika. W miarę wzrastania dawki obornika, zawartość P_{og} zwiększała się. Największą

jego zawartość (3,11 $gP \cdot kg^{-1}$ średnio dla dawek azotu i fazy fenologicznej ziemniaka) stwierdzono w bulwach ziemniaka pobranych z obiektów nawożonych dawką obornika w wysokości 80 $t \cdot ha^{-1}$. Daje to wzrost zawartości P_{og} o 7% w porównaniu do obiektów nie nawożonych obornikiem. Wykorzystanie przez ziemniaki składników pokarmowych z obornika w pierwszym roku może wynieść do 50%, natomiast w stosunku do fosforu wykorzystanie to jest nieco niższe i wynosi około 30% [NOWACKI 2005]. Ziemniak dobrze odżywiony fosforem zwiększa liczbę zawiązanych bulw, tym samym zmniejsza ich wielkość i poprawia wartość handlową.

Największą zawartość P_{og} (2,18 $gP \cdot kg^{-1}$ średnio dla dawek azotu i fazy fenologicznej) oznaczono w pszenicy ozimej pobranej z poletek nawożonych dawką obornika 60 $t \cdot ha^{-1}$ (tab. 4.13). Dobre odżywienie pszenicy, fosforem, powoduje wzrost zawartości białka, glutenu, aminokwasów egzogennych, witaminy B_1. Zawartość fosforu ogółem w pszenicy ozimej pobranej z obiektów nawożonych dawką obornika w wysokości 80 $t \cdot ha^{-1}$ zmniejszyła się do 1,65 $gP \cdot kg^{-1}$. Spadek zawartości P_{og} wyniósł 24% w porównaniu do zawartości P_{og} w pszenicy ozimej z obiektów, na których zastosowano obornik 60 $t \cdot ha^{-1}$. Podobną tendencję można zauważyć w przypadku zawartości P_{og} w suchej masie jęczmienia jarego (tab. 4.14). Istotnie największą koncentrację fosforu ogółem (średnio 2,19 $gP \cdot kg^{-1}$) stwierdzono w próbkach pobranych z poletek, na których zastosowano obornik w dawce 60 $t \cdot ha^{-1}$. W suchej masie jęczmienia jarego najmniejszą zawartość stwierdzono w próbkach pobranych z poletek, na których nie zastosowano nawożenia obornikiem. W suchej masie kukurydzy uprawianej na kiszonkę średnia koncentracja P_{og} wyniosła 2,74 $gP \cdot kg^{-1}$. Kukurydza spośród roślin uprawianych w klimacie umiarkowanym wykazuje największą reakcję na odżywianie fosforem, co może mieć wpływ na lepsze wykształcenie ziarna w kolbie – wzrost zawartości białka, witamin, zmniejszenie zawartości wody w ziarnie. Analiza statystyczna potwierdziła istotny wpływ nawożenia zróżnicowanymi dawkami obornika za zawartość fosforu ogółem w suchej masie kukurydzy (tab. 4.15). Najniższą zawartość fosforu ogółem średnio 2,19 $gP \cdot kg^{-1}$ stwierdzono w próbkach pobranych z obiektów, na których nie zastosowano obornika. Zawartość ta była niższa o 24% od zawartości P_{og} w kukurydzy pobranej z obiektów, na których zastosowano obornik. Obornik w dawce 60 $t \cdot ha^{-1}$ spowodował największy wzrost P_{og} - 3,10 $gP \cdot kg^{-1}$.

Tabela 4.12

Zawartość fosforu ogółem w bulwie ziemniaka w zależności od zróżnicowanego nawożenia obornikiem, azotem mineralnym i fazy rozwojowej

Dawka obornika t·ha^{-1} I czynnik	Dawka azotu kg·ha^{-1} II czynnik	Faza fenologiczna III czynnik		średnio
		Pojawienie się pędów	Początek zawiązywania jagód	
0	N_0	2,72	2,36	2,56
	N_1	2,99	2,38	2,69
	N_2	3,60	2,75	3,17
	N_3	3,29	2,52	2,91
średnio		**3,15**	**2,50**	**2,82**
20	N_0	2,32	2,56	2,44
	N_1	3,23	2,70	2,96
	N_2	3,81	2,76	3,28
	N_3	2,31	3,02	3,17
średnio		**3,17**	**2,76**	**2,96**
40	N_0	2,61	1,51	2,06
	N_1	2,84	1,68	2,26
	N_2	3,31	2,46	2,88
	N_3	2,97	2,36	2,66
średnio		**2,93**	**2,00**	**2,47**
60	N_0	2,91	2,26	2,58
	N_1	3,01	2,79	2,89
	N_2	3,60	2,57	3,58
	N_3	3,49	2,93	3,21
średnio		**3,26**	**2,89**	**3,07**
80	N_0	2,73	2,61	2,67
	N_1	3,17	2,88	3,02
	N_2	3,75	3,32	3,53
	N_3	3,36	3,07	3,21
średnio		**3,25**	**2,97**	**3,11**
Średnio	**N_0**	**2,66**	**2,26**	**2,46**
	N_1	**3,05**	**2,48**	**2,77**
	N_2	**3,61**	**2,97**	**3,29**
	N_3	**3,28**	**2,78**	**3,03**
Średnio		**3,15**	**2,62**	**2,89**
$NIR_{0,05}$	**I czynnik**	**0,237**		
	II czynnik	**0,122**		
	III czynnik	**0,058**		
$NIR_{0,05}$ dla interakcji				
I/II	**II/I**	n.i.	n.i.	
I/III	**III/I**	**0,241**	**0,129**	
II/III	**III/II**	**0,145**	**0,115**	

n.i. – różnice nie istotne

Tabela 4.13

Zawartość fosforu ogółem w pszenicy ozimej w zależności od zróżnicowanego nawożenia obornikiem, azotem mineralnym i fazy rozwojowej

Dawka obornika $t \cdot ha^{-1}$ I czynnik	Dawka azotu $kg \cdot ha^{-1}$ II czynnik	Faza fenologiczna III czynnik		średnio
		Strzelanie w źdźbło	Dojrzałość pełna do 20% wilgotności	
0	N_0	1,13	0,830	**0,983**
	N_1	1,18	0,963	**1,07**
	N_2	1,54	1,22	**1,385**
	N_3	1,32	1,08	**1,20**
średnio		**1,295**	**1,024**	**1,16**
20	N_0	1,15	0,874	**1,14**
	N_1	1,30	1,08	**1,19**
	N_2	1,62	1,35	**1,48**
	N_3	1,35	1,14	**1,24**
średnio		**1,35**	**1,11**	**1,23**
40	N_0	1,50	0,922	**1,21**
	N_1	1,68	1,18	**1,43**
	N_2	2,46	1,47	**1,96**
	N_3	2,36	1,26	**1,81**
średnio		**2,00**	**1,21**	**1,60**
60	N_0	2,25	1,23	**1,74**
	N_1	2,78	1,34	**2,06**
	N_2	3,57	1,89	**2,73**
	N_3	2,93	1,46	**2,19**
średnio		**2,88**	**1,48**	**2,18**
80	N_0	1,71	1,09	**1,40**
	N_1	1,97	1,18	**1,57**
	N_2	2,41	1,35	**1,88**
	N_3	2,17	1,31	**1,74**
średnio		**2,06**	**1,23**	**1,65**
Średnia	**N_0**	**1,55**	**0,990**	**1,27**
	N_1	**1,78**	**1,15**	**1,46**
	N_2	**2,32**	**1,46**	**1,89**
	N_3	**2,02**	**1,25**	**1,63**
Średnio		**1,92**	**1,21**	**1,56**
$NIR_{0,05}$	**I czynnik**	**0,104**		
	II czynnik	**0,060**		
	III czynnik	**0,025**		
$NIR_{0,05}$ dla interakcji				
I/II	**II/I**	**0,152**	**0,133**	
I/III	**III/I**	**0,105**	**0,055**	
II/III	**III/II**	**0,068**	**0,049**	

Tabela 4.14

Zawartość fosforu ogółem w jęczmieniu jarym w zależności od zróżnicowanego nawożenia obornikiem, azotem mineralnym i fazy rozwojowej

Dawka obornika t·ha^{-1} I czynnik	Dawka azotu kg·ha^{-1} II czynnik	Faza fenologiczna III czynnik		średnio
		Strzelanie w źdźbło	Dojrzałość późnowoskowa	
0	N_0	1,94	1,00	**1,47**
	N_1	2,15	1,28	**1,71**
	N_2	2,54	1,64	**2,09**
	N_3	2,40	1,45	**1,92**
średnio		**2,25**	**1,34**	**1,80**
20	N_0	2,03	1,07	**1,55**
	N_1	2,23	1,27	**1,75**
	N_2	2,64	1,46	**2,05**
	N_3	2,41	1,35	**1,88**
średnio		**2,33**	**1,29**	**1,81**
40	N_0	2,17	1,23	**1,70**
	N_1	2,29	1,39	**1,84**
	N_2	2,77	1,45	**2,11**
	N_3	2,56	1,41	**1,98**
średnio		**2,45**	**1,37**	**1,91**
60	N_0	2,72	1,36	**2,04**
	N_1	2,42	1,57	**1,99**
	N_2	2,92	1,74	**2,33**
	N_3	3,20	1,60	**2,41**
średnio		**2,81**	**1,57**	**2,19**
80	N_0	2,65	1,32	**1,98**
	N_1	2,40	1,46	**1,93**
	N_2	3,26	1,71	**2,49**
	N_3	2,38	1,57	**1,97**
średnio		**2,67**	**1,51**	**2,09**
Średnio	N_0	**2,31**	**1,19**	**1,75**
	N_1	**2,30**	**1,39**	**1,85**
	N_2	**2,83**	**1,60**	**2,21**
	N_3	**2,59**	**1,47**	**2,04**
Średnio		**2,51**	**1,41**	**1,96**
$NIR_{0,05}$	**I czynnik**	**0,123**		
	II czynnik	**0,075**		
	III czynnik	**0,044**		
$NIR_{0,05}$ dla interakcji				
I/II	**II/I**	**0,188**	**0,170**	
I/III	**III/I**	**0,132**	**0,098**	
II/III	**III/II**	**0,097**	**0,088**	

Tabela 4.15

Zawartość fosforu ogółem w kukurydzy w zależności od zróżnicowanego nawożenia obornikiem, azotem mineralnym i fazy rozwojowej

Dawka obornika $t \cdot ha^{-1}$ I czynnik	Dawka azotu $kg \cdot ha^{-1}$ II czynnik	Faza fenologiczna III czynnik			średnio
		Piąty liść rozwinięty	Widoczny wierzchołek wiechy	Dojrzałość żółta	
0	N_0	2,70	2,09	1,02	**1,94**
	N_1	2,98	2,29	1,22	**2,16**
	N_2	3,36	2,58	1,35	**2,43**
	N_3	3,03	2,43	1,25	**2,24**
średnio		**3,02**	**2,35**	**1,21**	**2,19**
20	N_0	2,98	2,36	1,24	**2,19**
	N_1	3,34	2,53	1,33	**2,40**
	N_2	3,68	2,91	1,47	**2,69**
	N_3	3,12	2,77	1,37	**2,42**
średnio		**3,28**	**2,64**	**1,35**	**2,42**
40	N_0	3,14	3,02	1,33	**2,49**
	N_1	3,51	3,21	1,43	**2,72**
	N_2	3,91	4,21	1,83	**3,32**
	N_3	3,38	3,96	1,66	**3,00**
średnio		**3,49**	**3,60**	**1,56**	**2,88**
60	N_0	3,39	3,46	1,43	**2,76**
	N_1	3,71	3,71	1,64	**3,02**
	N_2	4,23	3,91	2,06	**3,40**
	N_3	4,00	3,83	1,87	**3,23**
średnio		**3,83**	**3,72**	**1,75**	**3,10**
80	N_0	3,55	3,22	1,50	**2,76**
	N_1	3,97	3,49	1,67	**3,04**
	N_2	4,51	3,73	1,96	**3,40**
	N_3	4,03	3,59	1,71	**3,11**
średnio		**4,02**	**3,51**	**1,71**	**3,08**
Średnio	**N_0**	**3,15**	**2,83**	**1,30**	**1,30**
	N_1	**3,50**	**3,04**	**1,46**	**1,46**
	N_2	**3,94**	**3,47**	**1,73**	**1,73**
	N_3	**3,51**	**3,31**	**1,57**	**1,57**
Średnio		**3,53**	**3,16**	**1,51**	**2,74**
$NIR_{0,05}$	**I czynnik**		**0,092**		
	II czynnik		**0,086**		
	III czynnik		**0,053**		
$NIR_{0,05}$ dla interakcji					
I/II	**II/I**	**0,188**		**0,193**	
I/III	**III/I**	**0,128**		**0,118**	
II/III	**III/II**	**0,122**		**0,106**	

Wyniki badań PŁAZY [2004] wskazały na wzrost zawartości fosforu, azotu, potasu, wapnia i magnezu w bulwach ziemniaka pod wpływem nawożenia organicznego. Zależność tą należy tłumaczyć dobrym zaopatrzeniem roślin w składniki pokarmowe na obiektach nawożonych organicznie, gdyż nawozy te są źródłem makro- i mikroelementów,

udostępnianych stopniowo roślinom w czasie mineralizacji materii organicznej. Podobne wnioski ze swych badań uzyskał TRAWCZYŃSKI [2002]. SĄDEJ [2000] stwierdziła, że rośliny nawożone obornikiem charakteryzowały się z reguły wyższą zawartością fosforu, niż te które nawożono tylko mineralnie. Najbardziej efektywne było połączone nawożenie obornika z NPK, które powodowało wzrost koncentracji fosforu w badanych roślinach (ziemniaki, jęczmień, pszenica, koniczyna z trawami, żyto, kukurydza i rzepak) średnio o 4% w porównaniu do nawożenia wyłącznie obornikiem i o 9% w porównaniu do nawożenia mineralnego. Natomiast STĘPIEŃ i in. [2002] uważają, że obornik tylko w niewielki sposób wpływa na zawartość fosforu w roślinach w porównaniu do wieloletniego nawożenia superfosfatem, na skutek tak zwanego „efektu rozcieńczenia" fosforu w roślinie przy wyższym plonowaniu na poletkach nawożonych obornikiem. Również w badaniach ZIMNEGO I KUCA [2005] najwięcej fosforu zawierały korzenie i liście buraka cukrowego zebranego z poletek nie nawożonych organicznie, gdzie badanego makroskładnika było o 0,5% więcej niż w korzeniach uprawianych na oborniku, jednak różnica między tymi obiektami była nieistotna. Zwiększanie dawek azotu powyżej 100 kgN·ha^{-1} skutkowało obniżeniem zawartości fosforu w korzeniach, jak i liściach buraka.

ANTONKIEWICZ [2006] w swoich badaniach stwierdził, że pod wpływem wzrastającego udziału mieszanin popiołowo-osadowych i popiołowo-torfowych w glebie systematycznie malała zawartość fosforu w kukurydzy. W badaniach MALINOWSKIEJ i in. [2006] w suchej masie trawy *Miscanthus sacchariflorus* nawożonej NPK, zawartość P_{og} kształtowała się na poziomie 2,32 gP·kg^{-1}, natomiast nawożenie osadem ściekowym spowodowało wzrost P_{og} o 20%. Autorzy ci uważają, że nawożenie mineralne może zostać w pełni zastąpione nawożeniem osadem ściekowym.

Nawożenie azotem mineralnym w badaniach własnych wpłynęło istotnie na koncentrację fosforu ogółem w analizowanych roślinach. Najwyższą zawartość (3,29 gP·kg^{-1}) stwierdzono w bulwach zebranych z obiektów nawożonych dawką azotu mineralnego N_2 (tab. 4.12). W suchej masie pszenicy ozimej i jęczmienia jarego pobranych z obiektów nawożonych azotem mineralnym w dawce N_2 zawartość P_{og} była istotnie największa i wyniosła odpowiednio – 1,89 gP·kg^{-1} (tab. 4.13) i 2,21 gP·kg^{-1} (tab. 4.14). Dawka azotu N_3 spowodowała spadek zawartości P_{og}. Podobną zależność przy zastosowaniu dawki azotu 120 kg·ha^{-1}, przedstawili w swojej pracy KNAPOWSKI i in. [2001]. Autorzy ci uważają, że brak równowagi przy nawożeniu mineralnym, szczególnie poprzez stosowanie wysokich dawek azotu, może przyczynić się do obniżenia zawartości

fosforu w roślinach, zakłócić równowagę między składnikami mineralnymi. Czasami zwiększone nawożenie azotem powoduje jedynie duży przyrost plonów, natomiast zawartość P_{og} wskutek „efektu rozcieńczenia" może być nawet niższa, niż przy braku nawożenia azotem [RABIKOWSKA I PISZCZ 2002]. TRAWCZYŃSKI [2002] w swoich badaniach uzyskał największy wzrost zawartości P_{og} w bulwach ziemniaka – 2,6 $gP \cdot kg^{-1}$ pod wpływem zastosowania dawki azotu 120 $kg \cdot ha^{-1}$. W eksperymencie przeprowadzonym przez SZEWCZUKA I MAZURA [2004] dawka azotu 222 $kgN \cdot ha^{-1}$ spowodowała największy wzrost P w roślinie, z kolei zastosowanie wyższej dawki (300 $kgN \cdot ha^{-1}$) spowodowało spadek zawartości P_{og} zarówno w łodydze jak i liściach pokrzywy zwyczajnej. W badaniach własnych zarówno w przypadku bulw ziemniaka, jak i uprawianych roślin zbożowych najniższą statystycznie udowodnioną zawartość stwierdzono w próbach pobranych z obiektów nie nawożonych azotem mineralnym. KALEMBASA I GODLEWSKA [2006] stwierdzili, że nawożenie mineralne (NPK) miało istotny wpływ na zawartość P_{og} w każdym z pokosów rajgrasu włoskiego. W pierwszym pokosie spowodowało wzrost P_{og} (5,71 $gP \cdot kg^{-1}$), a w pozostałych pokosach obniżyło jego poziom do:4,46 $gP \cdot kg^{-1}$ w drugim, 5,34 $gP \cdot kg^{-1}$ w trzecim pokosie.

Zawartość fosforu ogółem w badanym materiale roślinnym ulegała istotnym zmianom w całym okresie wegetacji. Zawartość P_{og} w bulwie ziemniaka była istotnie najwyższa (średnio 3,15 $gP \cdot kg^{-1}$) w fazie pojawiania się pędów (marzec). W drugiej dekadzie lipca, kiedy ziemniaki były w fazie początku zawiązywania jagód zawartość P_{og} w bulwach była istotnie niższa. (tab. 4.12). Stwierdzono istotny wpływ interakcji nawożenia obornikiem i fazy rozwojowej ziemniaków. Istotnie najwyższą zawartość P_{og} (3,26 $gP \cdot kg^{-1}$) uzyskano w bulwach pobranych w fazie pojawiania się pędów z obiektów nawożonych dawką obornika 60 $t \cdot ha^{-1}$. Stwierdzono również spadek zawartości fosforu w suchej masie pszenicy ozimej w trakcie rozwoju roślin. Istotnie największą zawartość (1,92 $gP \cdot kg^{-1}$), stwierdzono w próbkach roślinnych pszenicy ozimej zebranej w fazie końca strzelania w źdźbło. W próbkach zebranych w lipcu, kiedy pszenica była w fazie dojrzałości pełnej do 20% wilgotności koncentracja P_{og} uległa obniżeniu do 1,21 $gP \cdot kg^{-1}$. W przypadku jęczmienia jarego w początku strzelania w źdźbło zawartość P_{og} kształtowała się średnio na poziomie 2,51 $gP \cdot kg^{-1}$. W suchej masie jęczmienia jarego zebranego w drugiej dekadzie lipca w fazie dojrzałości późnowoskowej odnotowano spadek zawartości P_{og} o 44%. W okresie wegetacji roślin ilość fosforu ulega ciągłym zmianom. Najwięcej fosforu obserwuje się w młodych roślinach – szczególnie w liściach, gdzie tempo przemian metabolicznych jest największe. Ilość ta obniża się w ciągu wegetacji,

co spowodowane jest dużym przyrostem masy rośliny [BENEDYCKA i in. 2001]. W badaniach własnych stwierdzono największą koncentrację fosforu dla kukurydzy pobranej w fazie piątego liścia rozwiniętego – 3,53 $gP \cdot kg^{-1}$ i z każdym następnym zbiorem zawartość tego składnika ulegała obniżeniu. W fazie dojrzałości żółtej zawartość P_{og} była istotnie najniższa i wynosiła 1,51 $gP \cdot kg^{-1}$. W badaniach PODLEŚNEJ I WINIARSKIEGO [2002] również stwierdzono spadek zawartości P_{og} w miarę rozwoju kukurydzy. W doświadczeniach tych autorów, różnica koncentracji fosforu ogółem w kukurydzy, miedzy fazą 6-8 liścia, a kwitnieniem wyniosła średnio 75%. W badaniach własnych różnica między fazą piątego liścia a dojrzałością żółtą kukurydzy wyniosła 57%. Również badania SZEWCZUKA i in. [2002], SZEWCZUKA I MAZURA [2004] potwierdzają, że zmiany zawartości fosforu zależą w dużej mierze od fazy rozwojowej roślin. Autorzy ci badali zawartość składników mineralnych w pokrzywie zwyczajnej. Najmniejszą kumulację fosforu stwierdzili w roślinach zebranych w fazie ich kwitnienia. Podobną tendencję zauważył MICHAŁOJĆ [2006], badając wpływ zróżnicowanego nawożenia azotem oraz terminu zbioru na skład chemiczny sałaty. Autor stwierdził, że nawożenie N nie wpłynęło istotnie na zawartość P w liściach sałaty. Kumulacja tego składnika pokarmowego malała wraz ze stopniem rozwoju rośliny testowej.

Wzajemne oddziaływanie zastosowanego w badaniach własnych nawożenia obornikiem i azotem mineralnym w istotny sposób modyfikowało zawartość fosforu ogółem w pszenicy ozimej, jęczmieniu jarym i kukurydzy. Istotnie najwyższą zawartość P_{og} (2,73 $gP \cdot kg^{-1}$) stwierdzono w pszenicy ozimej pobranej z obiektów nawożonych dawką obornika 60 $t \cdot ha^{-1}$ i azotem mineralnym w dawce N_2 (tab. 4.13). W przypadku jęczmienia jarego istotnie najwyższą zawartość fosforu ogółem (2,49 $gP \cdot kg^{-1}$) stwierdzono w próbkach pobranych z obiektów nawożonych obornikiem w dawce 80 $t \cdot ha^{-1}$ i azotem N_2 (tab. 4.14). Podobne współdziałanie obornika i azotu mineralnego stwierdzono w przypadku zawartości fosforu ogółem w kukurydzy, w której najwyższa istotna zawartość P_{og} kształtowała się na poziomie 3,23 $gP \cdot kg^{-1}$ (tab.4.15).

4.4.2. ZAWARTOŚĆ FOSFORU ZWIĄZKÓW ORGANICZNYCH

Fosfor pobierany przez roślinę w formie jonów ortofosforanowych ulega szybkiemu wbudowaniu w związki organiczne. Zmiany zawartości fosforu związków organicznych w badanych roślinach przedstawiono w tab. 4.16, 4.17, 4.18, 4.19.

Zawartość P_{org} w bulwach ziemniaka kształtowała się na poziomie 0,600 $gP \cdot kg^{-1}$. Stwierdzono istotny wpływ zastosowanych czynników doświadczalnych na zawartość

badanej frakcji fosforu. Statystycznie udowodnioną największą zawartość (średnio 0,801 $gP \cdot kg^{-1}$) uzyskano w bulwach ziemniaka pobranych z obiektów nawożonych obornikiem w dawce 60 $t \cdot ha^{-1}$. Istotnie niższe i mało zróżnicowane zawartości P_{org} (0,553 $gP \cdot kg^{-1}$) i (0,554 $gP \cdot kg^{-1}$) stwierdzono w bulwach pobranych z obiektów nawożonych obornikiem odpowiednio w dawkach 20 $t \cdot ha^{-1}$ i 40 $t \cdot ha^{-1}$. W bulwach pobranych z obiektów nie nawożonych obornikiem nastąpił spadek P_{org} o 40%, w porównaniu do zawartości fosforu związków organicznych w bulwach z obiektów nawożonych dawką 60 $t \cdot ha^{-1}$ (tab. 4.16). W suchej masie pszenicy ozimej zawartość fosforu związków organicznych wyniosła średnio 0,586 $gP \cdot kg^{-1}$ (tab. 4.17), natomiast jęczmienia jarego 0,748 $gP \cdot kg^{-1}$ (tab. 4.18). Podobnie jak w przypadku bulw ziemniaka, zawartość P_{org} w pszenicy ozimej była istotnie modyfikowana zróżnicowanymi dawkami obornika. Istotnie największą zawartość badanej frakcji fosforu stwierdzono w próbkach pobranych z obiektów nawożonych obornikiem w dawce 60 $t \cdot ha^{-1}$. W przypadku pszenicy ozimej zawartość ta kształtowała się na poziomie średnio 0,775 $gP \cdot kg^{-1}$, a dla jęczmienia jarego wyniosła średnio – 0,949 $gP \cdot kg^{-1}$. Najniższą istotną kumulację P_{org} stwierdzono w suchej masie badanych roślin zbożowych pobranych z obiektów, na których nie zastosowano obornika. Zawartość P_{org} w pszenicy ozimej zabranej z tych obiektów była niższa o 46%, jęczmienia jarego o 40% w porównaniu do najwyższej zawartości tej frakcji fosforu w roślinach pobranych z obiektów, na których zastosowano obornik w dawce 60 $t \cdot ha^{-1}$. W badaniach własnych zawartość P_{org} w kukurydzy uprawianej na kiszonkę kształtowała się na poziomie średnio 1,05 $gP \cdot kg^{-1}$ (tab. 4.19). Zawartość fosforu będącego w połączeniach organicznych w kukurydzy w istotny sposób zależała od zastosowanego w doświadczeniu obornika bydlęcego. Istotnie najniższą zawartość tej frakcji fosforu, podobnie jak w przypadku bulw ziemniaka, pszenicy ozimej czy jęczmienia jarego, stwierdzono w kukurydzy pobranej z obiektów, na których nie zastosowano obornika. Zwiększające się dawki obornika do 60 $t \cdot ha^{-1}$ powodowały systematyczny wzrost zawartości P_{org}. Najwyższą, istotną zawartość fosforu związków organicznych (średnio 1,21 $gP \cdot kg^{-1}$), stwierdzono w suchej masie kukurydzy pobranej z obiektów nawożonych obornikiem w dawce 60 $t \cdot ha^{-1}$. Zawartość P_{org} w kukurydzy pobranej z poletek, na których zastosowano obornik w dawce 80 $t \cdot ha^{-1}$ uległa obniżeniu o 11% w stosunku do zawartości P_{org} w kukurydzy pobranej z poletek nawożonych obornikiem w dawce 60 $t \cdot ha^{-1}$.

Tabela 4.16

Zawartość fosforu związków organicznych w bulwie ziemniaka w zależności od zróżnicowanego nawożenia obornikiem, azotem mineralnym i fazy rozwojowej

Dawka obornika $t \cdot ha^{-1}$ I czynnik	Dawka azotu $kg \cdot ha^{-1}$ II czynnik	Faza fenologiczna III czynnik		średnio
		Pojawienie się pędów	Początek zawiązywania jagód	
0	N_0	0,296	0,472	0,384
	N_1	0,352	0,491	0,421
	N_2	0,619	0,665	0,642
	N_3	0,439	0,511	0,475
średnio		**0,426**	**0,534**	**0,480**
20	N_0	0,371	0,427	0,399
	N_1	0,500	0,580	0,540
	N_2	0,653	0,695	0,674
	N_3	0,579	0,620	0,600
średnio		**0,526**	**0,580**	**0,553**
40	N_0	0,388	0,471	0,429
	N_1	0,408	0,514	0,461
	N_2	0,706	0,754	0,730
	N_3	0,501	0,689	0,595
średnio		**0,500**	**0,607**	**0,554**
60	N_0	0,530	0,844	0,687
	N_1	0,593	0,903	0,748
	N_2	0,858	1,02	0,939
	N_3	0,740	0,923	0,832
średnio		**0,680**	**0,922**	**0,801**
80	N_0	0,507	0,550	0,528
	N_1	0,519	0,561	0,540
	N_2	0,671	0,868	0,770
	N_3	0,568	0,649	0,609
średnio		**0,566**	**0,657**	**0,612**
Średnio	**N_0**	0,418	0,553	**0,485**
	N_1	0,474	0,610	**0,542**
	N_2	0,701	0,800	**0,751**
	N_3	0,565	0,678	**0,622**
Średnio		**0,540**	**0,660**	**0,600**
$NIR_{0,05}$	**I czynnik**	**0,077**		
	II czynnik	**0,037**		
	III czynnik	**0,020**		
$NIR_{0,05}$ dla interakcji				
I/II	**II/I**	n.i.	n.i.	
I/III	**III/I**	**0,079**	**0,044**	
II/III	**III/II**	n.i.	n.i.	

n.i. – różnice nie istotne

Tabela 4.17

Zawartość fosforu związków organicznych w pszenicy ozimej w zależności od zróżnicowanego nawożenia obornikiem, azotem mineralnym i fazy rozwojowej

Dawka obornika $t \cdot ha^{-1}$ I czynnik	Dawka azotu $kg \cdot ha^{-1}$ II czynnik	Faza fenologiczna III czynnik		średnio
		Strzelanie w źdźbło	Dojrzałość pełna do 20% wilgotności	
0	N_0	0,137	0,486	0,311
	N_1	0,212	0,542	0,377
	N_2	0,311	0,809	0,560
	N_3	0,251	0,629	0,440
średnio		**0,228**	**0,616**	**0,422**
20	N_0	0,210	0,561	0,385
	N_1	0,231	0,770	0,500
	N_2	0,363	0,885	0,624
	N_3	0,289	0,810	0,550
średnio		**0,273**	**0,756**	**0,515**
40	N_0	0,340	0,578	0,459
	N_1	0,405	0,704	0,554
	N_2	0,439	0,944	0,691
	N_3	0,351	0,879	0,615
średnio		**0,384**	**0,776**	**0,580**
60	N_0	0,628	0,720	0,674
	N_1	0,658	0,783	0,720
	N_2	0,732	1,048	0,890
	N_3	0,706	0,930	0,818
średnio		**0,681**	**0,870**	**0,775**
80	N_0	0,408	0,697	0,552
	N_1	0,501	0,709	0,605
	N_2	0,613	0,861	0,737
	N_3	0,554	0,758	0,656
średnio		**0,519**	**0,756**	**0,637**
Średnio	**N_0**	**0,344**	**0,608**	**0,476**
	N_1	**0,401**	**0,701**	**0,551**
	N_2	**0,491**	**0,909**	**0,700**
	N_3	**0,430**	**0,801**	**0,616**
Średnio		**0,417**	**0,755**	**0,586**
$NIR_{0,05}$	**I czynnik**	**0,030**		
	II czynnik	**0,024**		
	III czynnik	**0,011**		
$NIR_{0,05}$ dla interakcji				
I/II	**II/I**	n.i.	n.i.	
I/III	**III/I**	**0,032**	**0,024**	
II/III	**III/II**	**0,028**	**0,021**	

n.i. – różnice nie istotne

Tabela 4.18

Zawartość fosforu związków organicznych w jęczmieniu jarym w zależności od zróżnicowanego nawożenia obornikiem, azotem mineralnym i fazy rozwojowej

Dawka obornika $t \cdot ha^{-1}$ I czynnik	Dawka azotu $kg \cdot ha^{-1}$ II czynnik	Faza fenologicznaIII czynnik		średnio
		Strzelanie w źdźbło	Dojrzałość późnowoskowa	
0	N_0	0,344	0,388	**0,366**
	N_1	0,442	0,565	**0,503**
	N_2	0,778	0,792	**0,785**
	N_3	0,548	0,665	**0,606**
średnio		0,528	0,602	**0,565**
20	N_0	0,427	0,491	**0,459**
	N_1	0,739	0,689	**0,714**
	N_2	0,811	0,990	**0,900**
	N_3	0,773	0,794	**0,784**
średnio		0,688	0,741	**0,714**
40	N_0	0,535	0,519	**0,527**
	N_1	0,679	0,692	**0,685**
	N_2	0,851	1,16	**0,983**
	N_3	0,683	0,782	**0,732**
średnio		0,687	0,777	**0,732**
60	N_0	0,661	0,791	**0,726**
	N_1	0,876	0,802	**0,839**
	N_2	1,11	1,30	**1,21**
	N_3	0,960	1,09	**1,03**
średnio		0,903	0,996	**0,949**
80	N_0	0,594	0,682	**0,638**
	N_1	0,710	0,785	**0,748**
	N_2	0,871	0,975	**0,923**
	N_3	0,792	0,819	**0,805**
średnio		0,742	0,815	**0,778**
Średnio	**N_0**	**0,512**	**0,574**	**0,543**
	N_1	**0,689**	**0,706**	**0,698**
	N_2	**0,885**	**1,034**	**0,960**
	N_3	**0,751**	**0,830**	**0,790**
Średnio		**0,709**	**0,786**	**0,748**
$NIR_{0,05}$	**I czynnik**	**0,037**		
	II czynnik	**0,021**		
	III czynnik	**0,014**		
$NIR_{0,05}$ dla interakcji				
I/II	**II/I**	**0,054**	**0,048**	
I/III	**III/I**	n.i.	n.i.	
II/III	**III/II**	**0,028**	**0,027**	

n.i. – różnice nie istotne

Tabela 4.19

Zawartość fosforu związków organicznych w kukurydzy w zależności od zróżnicowanego nawożenia obornikiem, azotem mineralnym i fazy fenologicznej

Dawka obornika $t \cdot ha^{-1}$ I czynnik	Dawka azotu $kg \cdot ha^{-1}$ II czynnik	Faza fenologiczna III czynnik			średnio
		Piąty liść rozwinięty	Widoczny wierzchołek wiechy	Dojrzałość żółta	
0	N_0	0,144	1,32	0,803	**0,756**
	N_1	0,155	1,57	0,972	**0,900**
	N_2	0,233	1,86	1,12	**1,07**
	N_3	0,174	1,69	1,04	**0,97**
średnio		**0,176**	**1,61**	**0,98**	**0,925**
20	N_0	0,168	1,58	0,867	**0,873**
	N_1	0,183	1,68	1,06	**0,974**
	N_2	0,210	1,91	1,20	**1,11**
	N_3	0,195	1,72	0,97	**0,963**
średnio		**0,189**	**1,72**	**1,03**	**0,980**
40	N_0	0,171	1,39	0,857	**0,808**
	N_1	0,195	1,79	0,987	**0,992**
	N_2	0,226	2,16	1,31	**1,23**
	N_3	0,205	1,86	1,26	**1,11**
średnio		**0,199**	**1,80**	**1,10**	**1,04**
60	N_0	0,258	1,62	1,05	**0,979**
	N_1	0,322	2,14	1,20	**1,22**
	N_2	0,383	2,44	1,37	**1,39**
	N_3	0,346	2,25	1,16	**1,24**
średnio		**0,327**	**2,11**	**1,19**	**1,21**
80	N_0	0,233	1,58	0,879	**0,897**
	N_1	0,271	1,94	0,939	**1,05**
	N_2	0,302	2,26	1,12	**1,23**
	N_3	0,288	2,13	1,02	**1,15**
średnio		**0,274**	**1,97**	**0,993**	**1,08**
Średnio	**N_0**	**0,195**	**1,50**	**0,892**	**0,862**
	N_1	**0,225**	**1,82**	**1,03**	**1,03**
	N_2	**0,271**	**2,12**	**1,22**	**1,21**
	N_3	**0,241**	**1,93**	**1,09**	**1,09**
Średnio		**0,233**	**1,84**	**1,06**	**1,05**
$NIR_{0,05}$	**I czynnik**		**0,017**		
	II czynnik		**0,018**		
	III czynnik		**0,015**		
$NIR_{0,05}$ dla interakcji					
I/II	**II/I**	**0,037**		**0,039**	
I/III	**III/I**	**0,032**		**0,034**	
II/III	**III/II**	**0,030**		**0,031**	

Przeprowadzona analiza wariancji wyników z doświadczenia z ponad 20 - letnim stosowaniem zróżnicowanego nawożenia organiczno-mineralnego wykazała istotny wpływ nawożenia azotem mineralnym na zmiany zawartości badanej frakcji fosforu.

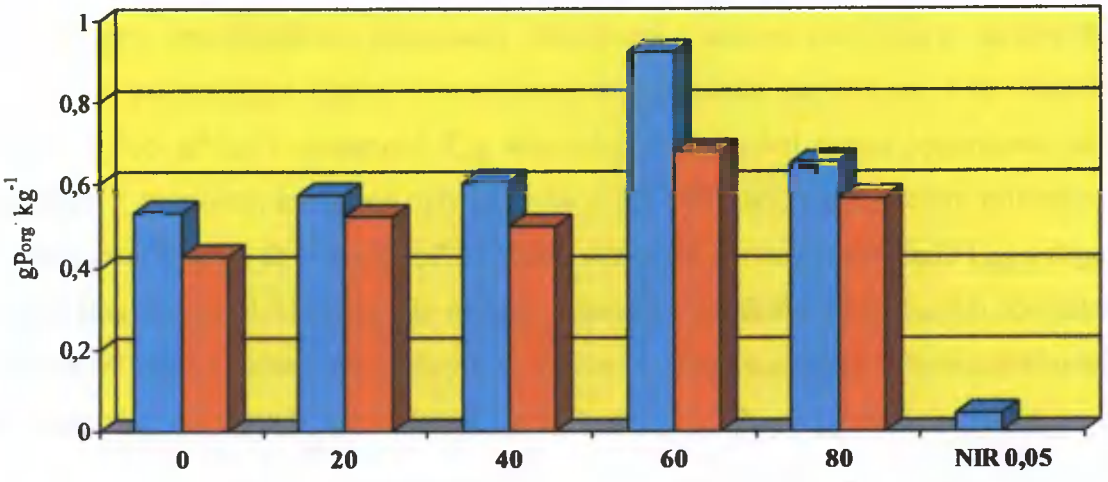
Największy wzrost wynoszący 34% - stwierdzono w bulwach pobranych z obiektów nawożonych azotem mineralnym w dawce N_2 w stosunku do zawartości P_{org} w bulwach z poletek, które nie były nawożone azotem.

Zawartość fosforu w związkach organicznych w bulwach nie nawożonych azotem, była istotnie najmniejsza i wynosiła 0,485 $gP \cdot kg^{-1}$. Po zastosowaniu maksymalnej dawki N_3 w porównaniu do dawki N_2 nastąpił spadek zawartości P_{org} o 17%. Stwierdzono również istotny wpływ nawożenia zróżnicowanymi dawkami azotu mineralnego na zmiany zawartości P_{org} w badanych roślinach zbożowych. Istotnie najwyższą zawartość P_{org} (średnio 0,700 $gP \cdot kg^{-1}$) w pszenicy ozimej, (0,960 $gP \cdot kg^{-1}$) w jęczmieniu jarym, (1,21 $gP \cdot kg^{-1}$) w kukurydzy stwierdzono w próbkach pobranych z poletek, na których zastosowano azot mineralny w dawce N_2. Azot mineralny w postaci saletry amonowej w dawce N_3 spowodowała statystycznie udowodniony spadek analizowanej frakcji fosforu w badanych roślinach. We wszystkich trzech rozpatrywanych gatunkach roślin, podobnie jak w przypadku bulw ziemniaka najniższą istotną zawartość fosforu związków organicznych stwierdzono w próbkach pobranych z poletek nie nawożonych azotem mineralnym. Zawartość P_{org} w pszenicy ozimej był niższa o 12%, jęczmieniu jarym o 18% a w kukurydzy o 10% w porównaniu do najwyższej zawartości P_{org} w analizowanych roślinach uprawianych na obiektach, na których zastosowano dawkę azotu N_2.

W bulwach ziemniaka pobranych w fazie pojawienia się pędów zawartość fosforu w związkach organicznych kształtowała się średnio na poziomie 0,540 $gP \cdot kg^{-1}$. W miarę rozwoju rośliny kumulacja P_{org} wzrastała. W fazie początku zawiązywania jagód osiągnęła wartość 0,660 $gP \cdot kg^{-1}$. Prawdopodobnie jest to związane z faktem, że u roślin gromadzących skrobię jako materiał zapasowy w okresie dojrzewania zachodzi szybkie zmniejszanie się ilości fosforu nieorganicznego, a zwiększanie organicznego. Synteza skrobi wymaga bowiem fosforylacji cząsteczek glukozy, więc właściwe zaopatrzenie w fosfor warunkuje dobrą produkcję węglowodanów. W badanych roślinach zbożowych: pszenicy ozimej i jęczmieniu jarym zawartość P_{org} również wykazywała tendencję wzrostową w miarę rozwoju roślin. W okresie dojrzewania roślin większość fosforu ze związków mineralnych zostaje włączona w skład związków organicznych.

Stwierdzono istotny wpływ interakcji zastosowanych czynników na kształtowanie się zmian zawartości P_{org} w badanych roślinach. W bulwach ziemniaka stwierdzono istotną interakcję nawożenia zróżnicowanymi dawkami obornika i fazy fenologicznej (rys. 4.6). Najniższą zawartość P_{org} (średnio 0,426 $gP \cdot kg^{-1}$), stwierdzono w bulwach ziemniaka pobranych z obiektów nie nawożonych obornikiem w fazie pojawienia się pędów.

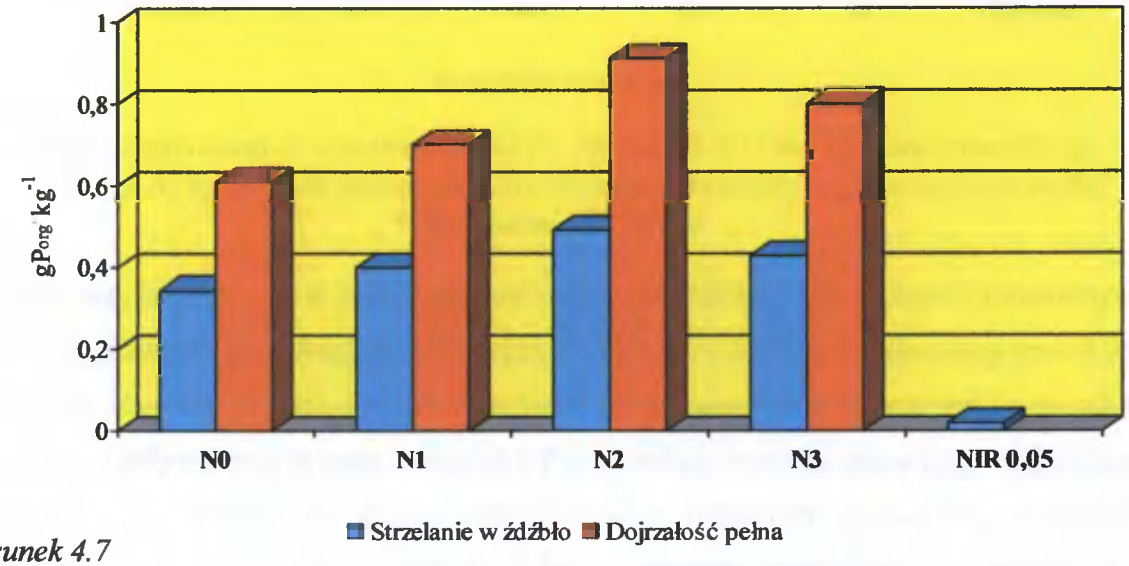
Natomiast w bulwach ziemniaka pobranych w fazie początku zawiązywania jagód z obiektów nawożonych obornikiem w dawce 60 $t \cdot ha^{-1}$ nastąpił wzrost zawartości badanej frakcji fosforu o 54% (w bulwach tych stwierdzono istotnie największą zawartość P_{org} wynoszącą 0,922 $gP \cdot kg^{-1}$).



Rysunek 4.6

Wpływ zróżnicowanych dawek obornika (0, 20, 40, 60, 80 $t \cdot ha^{-1}$) i fazy fenologicznej ziemniaka na zmiany zawartości fosforu związków organicznych

W pszenicy ozimej stwierdzono istotne wzajemne oddziaływanie nawożenia obornikiem i fazy rozwojowej badanej rośliny, jak również nawożenia azotem mineralnym i fazy rozwojowej.

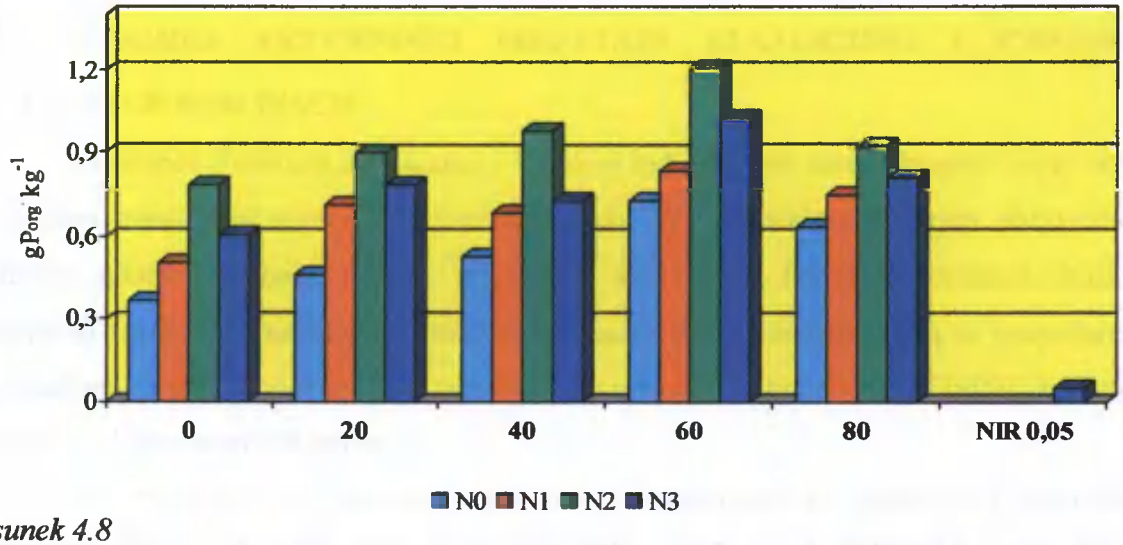


Rysunek 4.7

Wpływ zróżnicowanych dawek azotu mineralnego i fazy fenologicznej pszenicy ozimej na zmiany zawartości fosforu związków organicznych

Istotnie najniższą zawartość P_{org} (średnio 0,344 $gP \cdot kg^{-1}$) stwierdzono w suchej masie pszenicy ozimej pobranej z obiektów nie nawożonych azotem w fazie strzelania w źdźbło (rys.4.7). Natomiast najwyższą (0,909 $gP \cdot kg^{-1}$) zawartość fosforu związków organicznych oznaczono w suchej masie pszenicy ozimej w fazie dojrzałości pełnej, zebranej z poletek nawożonych azotem w dawce N_2.

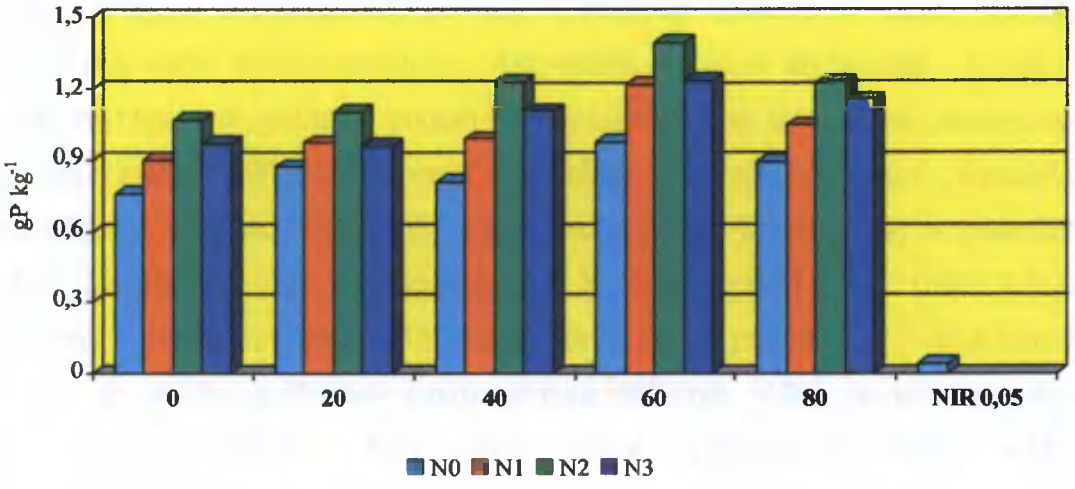
Istotny wpływ współdziałania nawożenia obornikiem i azotem mineralnym na zawartość organicznie połączonego fosforu stwierdzono w jęczmieniu jarym (rys. 4.8). Najniższą (średnio 0,366 $gP \cdot kg^{-1}$) zawartość P_{org} stwierdzono w suchej masie jęczmienia jarego pobranego z obiektów, które nie były nawożone ani obornikiem ani azotem mineralnym. W miarę zwiększania dawek obornika i azotu wzrastała również zawartość P_{org} osiągając maksymalną wartość 1,21 $gP \cdot kg^{-1}$ w roślinie pobranej z obiektów nawożonych obornikiem w dawce 60 $t \cdot ha^{-1}$ i azotem mineralnym w dawce N_2. Przy wszystkich dawkach obornika, azot mineralny w dawce N_3 powodował spadek zawartości P_{org} w jęczmieniu jarym.



Rysunek 4.8

Wpływ zróżnicowanych dawek obornika (0, 20, 40, 60, 80 $t \cdot ha^{-1}$) i azotu mineralnego (N_0, N_1, N_2, N_3 $kg \cdot ha^{-1}$) na zmiany zawartości fosforu związków organicznych w suchej masie jęczmienia jarego

Stwierdzono istotny wpływ interakcji nawożenia obornikiem, jak i azotem mineralnym w różnych dawkach na zawartość organicznych związków fosforu w kukurydzy (rys. 4.9). Wykazano również, że zastosowane w doświadczeniu nawożenie organiczne i mineralne istotnie oddziaływało na zmiany zawartości P_{org} w trakcie rozwoju kukurydzy. Najwyższą zawartość P_{org} (średnio 1,39 $gP \cdot kg^{-1}$) stwierdzono w roślinnych pobranych z obiektów nawożonych obornikiem w dawce 60 $t \cdot ha^{-1}$ i azotem mineralnym w dawce N_2. Azot mineralny w dawce N_2 powodował we wszystkich wariantach nawożenia obornikiem istotny wzrost zawartości P_{org} w kukurydzy.



Rysunek 4.9
Wpływ zróżnicowanych dawek obornika (0, 20, 40, 60, 80 t·ha^{-1}) i azotu mineralnego (N_0, N_1, N_2, N_3 kg·ha^{-1}) na zmiany zawartości fosforu związków organicznych w suchej masie kukurydzy

4.5. DYNAMIKA AKTYWNOŚCI FOSFATAZY ALKALICZNEJ I KWAŚNEJ W BADANYCH ROŚLINACH

Aktywność fosfatazy alkalicznej i kwaśnej była istotnie modyfikowana wpływem czynników uwzględnionych w doświadczalnych. W materiale roślinnym aktywność fosfatazy alkalicznej była zawsze niższa od aktywności fosfatazy kwaśnej. Niską aktywność fosfatazy alkalicznej w roślinie tłumaczy się jej znikomą rolą w gospodarce fosfatazowej roślin. Podobną tezę przedstawili również SAROOP i in. [1999], badając aktywność AlP w ziarnach gorczycy.

Aktywność AlP w bulwach ziemniaków kształtowała się średnio na poziomie 4,85 mmol pNP·kg^{-1}·h^{-1} (tab.4.20), natomiast AcP – 40,7 mmol pNP·kg^{-1}·h^{-1} (tab. 4.24) Aktywność fosfatazowa w badanych roślinach zbożowych była zróżnicowana w zależności od gatunku uprawianej rośliny. Aktywność AlP w pszenicy ozimej wyniosła średnio 14,8 mmol pNP·kg^{-1}·h^{-1} (tab.4.21), w jęczmieniu jarym 19,6 mmol pNP·kg^{-1}·h^{-1} (tab.4.22), kukurydzy 36,1 mmol pNP·kg^{-1}·h^{-1} (tab.4.23). Aktywność fosfatazy kwaśnej była wyższa – w pszenicy ozimej: 28,8 mmol pNP·kg^{-1}·h^{-1} (tab.4.25), jęczmieniu jarym 40,2 mmol pNP·kg^{-1}·h^{-1} (tab.4.26), a w kukurydzy 74,2 mmol pNP·kg^{-1}·h^{-1} (tab.4.27). Uzyskane w doświadczeniu własnym wyniki potwierdzają badania SARAPATKI i in. [2004] dotyczące aktywności kwaśnej fosfatazy w wybranych roślinach zbożowych. Aktywność AcP różnicowała się pod względem gatunku testowanych zbóż i kształtowała się następująco: jęczmień jary>orkisz>żyto>pszenica ozima.

Zastosowany w doświadczeniu obornik w różnych dawkach w istotny sposób modyfikował aktywność fosfomonoesteraz. Aktywność fosfatazy alkalicznej i kwaśnej była istotnie najniższa w roślinach pobranych z obiektów, na których nie stosowano obornika. Aktywność AlP w bulwach ziemniaka z tych obiektów wynosiła 4,12 mmol $pNP \cdot kg^{-1} \cdot h^{-1}$ (tab. 4.20), AcP – 31,9 mmol $pNP \cdot kg^{-1} \cdot h^{-1}$(tab. 4.24), w pszenicy ozimej AlP kształtowała się na poziomie 11,8 mmol $pNP \cdot kg^{-1} \cdot h^{-1}$ (tab. 4.21), AcP 25,5 mmol $pNP \cdot kg^{-1} \cdot h^{-1}$ (tab. 4.25), jęczmieniu jarym aktywność AlP – 15,4 mmol $pNP \cdot kg^{-1} \cdot h^{-1}$ (tab. 4.22), AcP 34,9 mmol $pNP \cdot kg^{-1} \cdot h^{-1}$ (tab. 4.26), a w kukurydzy przeznaczonej na kiszonkę AlP: 26,5 mmol $pNP \cdot kg^{-1} \cdot h^{-1}$ (tab. 4.23), AcP: 54,9 mmol $pNP \cdot kg^{-1} \cdot h^{-1}$ (tab. 4.27). W miarę zwiększania dawki obornika aktywność badanych fosfomonoesteraz również wzrastała, osiągając najwyższe wartości przy dawce 60 $t \cdot ha^{-1}$.

Nawożenie azotem mineralnym w zróżnicowanych dawkach istotnie wpłynęło na aktywność zarówno fosfatazy alkalicznej, jak i kwaśnej w badanym materiale roślinnym. Najwyższą aktywność AlP (średnio 5,21 mmol $pNP \cdot kg^{-1} \cdot h^{-1}$) stwierdzono w bulwach ziemniaka pobranych z poletek nawożonych azotem mineralnym w dawce N_2. Również w przypadku pszenicy ozimej, jęczmienia jarego i kukurydzy, aktywności fosfatazy alkalicznej była istotnie najwyższa w roślinach zebranych z obiektów nawożonych azotem mineralnym w dawce N_2. Azot w dawce N_3 podziałał inhibitująco na aktywność AlP. Natomiast aktywność fosfatazy kwaśnej była najwyższa w badanych roślinach pobranych z obiektów nawożonych dawką N_3. Aktywność AcP oznaczona w bulwach ziemniaka pobranych z tych obiektów wynosiła 51,8 mmol $pNP \cdot kg^{-1} \cdot h^{-1}$ i była wyższa o 17% w porównaniu do aktywności AcP w bulwach ziemniaka nawożonych azotem mineralnym w dawce N_2. Aktywność AcP w pszenicy ozimej z obiektów nawożonych dawką N_3 wynosiła 34,4 mmol $pNP \cdot kg^{-1} \cdot h^{-1}$, w jęczmieniu jarym 49,0 mmol $pNP \cdot kg^{-1} \cdot h^{-1}$. Azot mineralny w dawce N_3, który w przypadku fosfatazy alkalicznej obniżył jej aktywność, w przypadku fosfatazy kwaśnej podziałał aktywująco. Jak podaje KARCZMARCZYK i in. [1993], wysokie nawożenie azotem (150 $kgN \cdot ha^{-1}$) spowodowało wzrost aktywności AcP o 45% w liściach pszenicy, a o 30% w liściach pszenżyta. Natomiast aktywność AlP nieznacznie się obniżyła. Wpływem nawożenia mineralnego na aktywność enzymów w roślinach zajmował się również RAKOWSKI [2003], który stwierdził, że aktywność fosfataz odpowiedzialnych za gospodarkę fosforem w roślinach, zwłaszcza fosfatazy kwaśnej była istotnie modyfikowana przez nawożenie mineralne. Autor wykazał, ze na obiektach intensywnie nawożonych – potrójną dawką NPK,

aktywność AcP w liściu flagowym pszenicy jarej wzrosła o 82%, a pszenżyta o 54%, natomiast fosfatazy alkalicznej o 17,6%. WOJTASIK [2004] stwierdził wzrost aktywności AcP w jęczmieniu browarnym o 57 % a w pastewnym o 33% pod wpływem nawożenia mineralnego. Aktywność kwaśnej fosfatazy w roślinach wzrastała w miarę wzrostu kwasowości gleby. SARAPATKA i in. [2004] stwierdzają, że aktywność kwaśnej fosfomonoesterazy była wyższa w roślinach, które uprawiane były na glebie o kwaśnym odczynie (pH 5,6). W miarę wzrostu odczynu podłoża o 1,2 jednostki AcP roślin malała. Podobnie przedstawiają się wyniki badań własnych, w których azot mineralny w dawce N_3 powodował obniżenie wartości pH gleby. Aktywność AcP w roślinach pobranych z tych obiektów była najwyższa, natomiast aktywność AlP malała.

W badaniach własnych zaobserwowano wyraźną tendencję wzrostu aktywności fosfatazy alkalicznej i kwaśnej wraz z fazą rozwojową roślin. Istotnie najwyższą aktywność AlP i AcP uzyskano w bulwach ziemniaka pobranych w II dekadzie lipca w fazie początku zawiązywania jagód. Aktywność AlP wyniosła średnio 5,23 mmol $pNP \cdot kg^{-1} \cdot h^{-1}$, AcP – 45,3 mmol $pNP \cdot kg^{-1} \cdot h^{-1}$. Aktywność fosfatazy alkalicznej oznaczona w pszenicy ozimej pobranej w fazie dojrzałości pełnej do 20% wilgotności była wyższa o 23%, a kwaśnej o 32% w porównaniu do aktywności tych enzymów w fazie początku strzelania w źdźbło pszenicy ozimej. Aktywność fosfatazowa była istotnie wyższa w fazie dojrzałości późnowoskowej jęczmienia jarego (średnio AlP 29,2 mmol $pNP \cdot kg^{-1} \cdot h^{-1}$, AcP 46,9 mmol $pNP \cdot kg^{-1} \cdot h^{-1}$) niż w fazie początku strzelania w źdźbło (średnio AlP 9,91 mmol $pNP \cdot kg^{-1} \cdot h^{-1}$, AcP 33,7 mmol $pNP \cdot kg^{-1} \cdot h^{-1}$). Aktywność fosfatazowa oznaczona w kukurydzy była wyższa niż w przypadku pozostałych roślin. W fazie piątego liścia rozwiniętego aktywność AlP była istotnie najniższa i kształtowała się na poziomie 14,1 mmol $pNP \cdot kg^{-1} \cdot h^{-1}$, a AcP 50,2 mmol $pNP \cdot kg^{-1} \cdot h^{-1}$. W próbkacj zebranych w fazie dojrzałości żółtej aktywność badanych enzymów hydrolitycznych wzrosła – AlP o 72%, AcP o 48%. Zmiany aktywności enzymów w trakcie okresu wegetacyjnego roślin zaobserwowali wcześniej GURGULA I KOŁOTA [1975]. Autorzy ci badali aktywność fosfatazy kwaśnej, peroksydazy i katalazy w kapuście i porach. Stwierdzili oni wzrost aktywności AcP w miarę wzrostu roślin. W badaniach KARCZMARCZYKA i in. [1993] fosfataza kwaśna w pszenicy ozimej i pszenżycie była najbardziej aktywna w fazie kwitnienia – od 3-5 razy większa, niż w okresie kłoszenia. Według DARRAH [1993] wzrost aktywności kwaśnej fosfatazy następuje wraz ze wzrostem i rozwojem rośliny. Potwierdzają to również badania NOWAK i in. [2003], SMOLIK I NOWAK [2003]. OLCZAK [1996] tłumaczy to zjawisko udziałem fosfataz w autolizie

komórki, poprzedzonej zmianami przepuszczalności błon i uwalnianiem enzymu z lizosomów do cytoplazmy.

Tabela 4.20.

Aktywność fosfatazy alkalicznej w bulwie ziemniaka w zależności od zróżnicowanego nawożenia obornikiem, azotem mineralnym i fazy fenologicznej

Dawka obornika $t \cdot ha^{-1}$ I czynnik	Dawka azotu $kg \cdot ha^{-1}$ II czynnik	Faza fenologiczna III czynnik		średnio
		Pojawienie się pędów	Początek zawiązywania jagód	
0	N_0	3,37	4,12	3,74
	N_1	4,04	4,34	4,19
	N_2	4,19	4,71	4,45
	N_3	3,72	4,47	4,09
średnio		3,81	4,41	**4,12**
20	N_0	3,69	4,44	4,07
	N_1	4,26	4,55	4,41
	N_2	4,32	5,11	4,71
	N_3	3,85	4,94	4,38
średnio		4,02	4,76	**4,39**
40	N_0	3,78	4,74	4,26
	N_1	4,38	4,83	4,61
	N_2	4,76	5,64	5,20
	N_3	4,57	5,30	4,93
średnio		4,37	5,13	**4,75**
60	N_0	4,66	5,74	5,20
	N_1	5,49	6,10	5,80
	N_2	6,04	6,16	6,10
	N_3	5,84	6,51	6,18
średnio		5,51	6,13	**5,82**
80	N_0	4,13	5,19	4,66
	N_1	4,41	5,43	4,92
	N_2	5,05	6,20	5,62
	N_3	4,84	6,19	5,51
średnio		4,61	5,75	**5,18**
Średnio	**N_0**	3,92	4,85	**4,38**
	N_1	4,52	5,05	**4,78**
	N_2	4,87	5,56	**5,21**
	N_3	4,56	5,48	**5,02**
Średnio		**4,47**	**5,23**	**4,85**
$NIR_{0,05}$	**I czynnik**	**0,525**		
	II czynnik	**0,324**		
	III czynnik	**0,165**		
$NIR_{0,05}$ dla interakcji				
I/II	**II/I**	n.i.	n.i.	
I/III	**III/I**	n.i.	n.i.	
II/III	**III/II**	n.i.	n.i.	

n.i. – różnice nie istotne

Tabela 4.21

Aktywność fosfatazy alkalicznej w pszenicy ozimej w zależności od zróżnicowanego nawożenia obornikiem, azotem mineralnym i fazy fenologicznej

Dawka obornika $t \cdot ha^{-1}$ I czynnik	Dawka azotu $kg \cdot ha^{-1}$ II czynnik	Faza fenologiczna III czynnik		średnio
		Strzelanie w źdźbło	Dojrzałość pełna do 20% wilgotności	
0	N_0	9,15	10,1	9,65
	N_1	10,0	13,6	11,8
	N_2	12,3	14,6	13,4
	N_3	11,7	12,4	12,1
średnio		10,8	12,7	**11,8**
20	N_0	9,40	12,1	10,7
	N_1	11,5	13,7	12,6
	N_2	12,7	17,2	14,9
	N_3	9,95	16,3	13,1
średnio		10,9	14,9	**12,9**
40	N_0	10,5	13,8	12,2
	N_1	13,5	16,6	15,1
	N_2	14,5	20,1	17,2
	N_3	11,7	18,7	15,2
średnio		12,6	17,3	**14,9**
60	N_0	13,9	17,5	15,7
	N_1	16,0	20,4	18,2
	N_2	16,9	22,2	19,5
	N_3	16,3	21,8	19,0
średnio		15,8	20,5	**18,1**
80	N_0	12,9	16,9	14,9
	N_1	14,5	17,3	15,8
	N_2	15,8	21,1	18,4
	N_3	14,7	20,1	17,4
średnio		14,5	18,8	**16,6**
Średnio	**N_0**	11,2	14,1	**12,6**
	N_1	13,1	16,3	**14,7**
	N_2	14,4	19,0	**16,7**
	N_3	12,8	17,8	**14,3**
Średnio		**12,9**	**16,8**	**14,8**
$NIR_{0,05}$	**I czynnik**	**0,856**		
	II czynnik	**0,563**		
	III czynnik	**0,392**		
$NIR_{0,05}$ dla interakcji				
I/II	**II/I**	n.i.	n.i.	
I/III	**III/I**	**0,985**	**0,877**	
II/III	**III/II**	**0,780**	**0,784**	

n.i. – różnice nie istotne

Tabela 4.22

Aktywność fosfatazy alkalicznej w jęczmieniu jarym w zależności od zróżnicowanego nawożenia obornikiem, azotem mineralnym i jego fazy fenologicznej

Dawka obornika $t \cdot ha^{-1}$ I czynnik	Dawka azotu $kg \cdot ha^{-1}$ II czynnik	Faza rozwojowa III czynnik		średnio
		Strzelanie w źdźbło	Dojrzałość późnowoskowa	
0	N_0	4,30	19,2	11,7
	N_1	5,79	22,5	14,1
	N_2	8,62	29,3	18,9
	N_3	7,70	25,7	16,7
średnio		6,60	24,2	**15,4**
20	N_0	5,38	21,7	13,5
	N_1	7,25	25,7	16,4
	N_2	11,1	32,3	21,7
	N_3	8,91	26,7	17,8
średnio		8,16	26,6	**17,4**
40	N_0	7,72	25,2	16,9
	N_1	8,92	29,9	19,4
	N_2	13,2	34,9	24,1
	N_3	10,6	33,5	22,1
średnio		10,1	31,1	**20,6**
60	N_0	9,62	28,1	18,8
	N_1	12,3	31,4	21,8
	N_2	18,4	39,3	28,8
	N_3	13,8	34,1	23,9
średnio		13,5	33,2	**23,4**
80	N_0	8,64	26,3	17,5
	N_1	9,57	29,1	19,3
	N_2	14,5	36,0	25,3
	N_3	11,8	32,8	22,3
średnio		11,1	31,1	**21,1**
Średnio	**N_0**	7,13	24,3	**15,7**
	N_1	8,76	27,7	**18,2**
	N_2	13,2	34,3	**23,8**
	N_3	10,6	30,6	**20,6**
Średnio		**9,91**	**29,2**	**19,6**
$NIR_{0,05}$	**I czynnik**	**0,626**		
	II czynnik	**0,404**		
	III czynnik	**0,232**		
$NIR_{0,05}$ dla interakcji				
I/II	**II/I**	**0,984**	**0,904**	
I/III	**III/I**	**0,678**	**0,519**	
II/III	**III/II**	**0,514**	**0,464**	

Tabela 4.23

Aktywność fosfatazy alkalicznej w kukurydzy w zależności od zróżnicowanego nawożenia obornikiem, azotem mineralnym i jej fazy fenologicznej

Dawka obornika $t \cdot ha^{-1}$ I czynnik	Dawka azotu $kg \cdot ha^{-1}$ II czynnik	Faza fenologiczna III czynnik			średnio
		Piąty liść rozwinięty	Widoczny wierzchołek wiechy	Dojrzałość żółta	
0	N_0	9,55	19,8	36,4	21,9
	N_1	11,1	20,8	41,0	24,3
	N_2	13,1	34,2	47,2	31,5
	N_3	12,3	27,6	45,1	28,3
średnio		**11,5**	**25,6**	**42,4**	**26,5**
20	N_0	10,9	23,6	40,5	25,0
	N_1	12,6	29,5	43,2	28,4
	N_2	14,7	45,7	49,3	36,5
	N_3	14,2	38,4	47,6	33,4
średnio		**13,1**	**34,3**	**45,2**	**30,8**
40	N_0	11,7	35,8	45,7	31,1
	N_1	14,3	37,9	46,9	33,1
	N_2	15,7	56,3	55,1	42,4
	N_3	15,4	46,2	50,4	37,3
średnio		**14,3**	**44,1**	**49,5**	**35,9**
60	N_0	15,7	55,2	58,4	43,1
	N_1	16,2	57,7	63,6	45,8
	N_2	17,1	67,3	68,6	51,0
	N_3	16,8	63,2	65,0	48,3
średnio		**16,4**	**60,9**	**63,9**	**47,1**
80	N_0	14,2	28,0	51,2	34,4
	N_1	15,4	47,1	53,7	38,7
	N_2	16,1	62,4	61,5	46,6
	N_3	15,7	48,3	54,7	39,6
średnio		**15,3**	**48,9**	**55,3**	**39,8**
Średnio	**N_0**	12,4	34,5	46,4	**31,1**
	N_1	13,9	38,6	49,6	**34,1**
	N_2	15,3	53,2	56,3	**41,6**
	N_3	14,8	44,7	52,6	**37,4**
Średnio		**14,1**	**42,7**	**51,2**	**36,1**
$NIR_{0,05}$ I czynnik			**2,561**		
II czynnik			**2,126**		
III czynnik			**1,059**		
$NIR_{0,05}$ dla interakcji					
I/II	**II/I**	n.i.		n.i.	
I/III	**III/I**	**3,069**		**2,369**	
II/III	**III/II**	**2,731**		**2,119**	

n.i. – różnice nie istotne

Tabela 4.24

Aktywność fosfatazy kwaśnej w bulwie ziemniaka w zależności od zróżnicowanego nawożenia obornikiem, azotem mineralnym i fazy fenologicznej

Dawka obornika t·ha^{-1} I czynnik	Dawka azotu kg·ha^{-1} II czynnik	Faza fenologiczna III czynnik		średnio
		Pojawienie się pędów	Początek zawiązywania jagód	
0	N_0	13,0	23,1	**18,1**
	N_1	26,1	36,7	**31,4**
	N_2	28,0	42,1	**35,1**
	N_3	42,3	44,4	**43,4**
średnio		**27,3**	**36,6**	**31,9**
20	N_0	19,9	35,8	**27,9**
	N_1	34,0	38,0	**36,0**
	N_2	38,0	40,3	**39,2**
	N_3	40,9	44,4	**42,7**
średnio		**33,3**	**39,6**	**36,5**
40	N_0	24,9	38,9	**31,9**
	N_1	37,7	44,2	**40,9**
	N_2	39,4	47,0	**43,2**
	N_3	43,2	51,1	**47,1**
średnio		**36,3**	**45,3**	**40,8**
60	N_0	31,2	44,9	**38,1**
	N_1	34,4	48,5	**41,4**
	N_2	56,8	53,2	**55,1**
	N_3	60,8	81,1	**70,9**
średnio		**45,8**	**56,9**	**51,4**
80	N_0	28,6	42,2	**35,4**
	N_1	34,5	43,5	**39,1**
	N_2	36,4	49,2	**42,8**
	N_3	53,3	56,9	**55,1**
średnio		**38,2**	**47,9**	**43,1**
Średnio	**N_0**	**23,5**	**37,0**	**30,3**
	N_1	**33,3**	**42,2**	**37,8**
	N_2	**39,7**	**46,4**	**43,1**
	N_3	**48,1**	**55,6**	**51,8**
Średnio		**36,2**	**45,3**	**40,7**
$NIR_{0,05}$	**I czynnik**	**0,698**		
	II czynnik	**0,550**		
	III czynnik	**0,286**		
$NIR_{0,05}$ dla interakcji				
I/II	**II/I**	**1,253**	**1,229**	
I/III	**III/I**	**0,776**	**0,640**	
II/III	**III/II**	**0,674**	**0,572**	

Tabela 4.25

Aktywność fosfatazy kwaśnej w pszenicy ozimej w zależności od zróżnicowanego nawożenia obornikiem, azotem mineralnym i fazy fenologicznej

Dawka obornika $t \cdot ha^{-1}$ I czynnik	Dawka azotu $kg \cdot ha^{-1}$ II czynnik	Faza fenologiczna III czynnik		średnio
		Strzelanie w źdźbło	Dojrzałość pełna do 20% wilgotności	
0	N_0	17,1	22,9	20,0
	N_1	18,4	30,4	24,4
	N_2	18,8	31,1	24,9
	N_3	26,3	38,5	32,4
średnio		**20,2**	**30,7**	**25,5**
20	N_0	17,5	27,4	22,5
	N_1	22,1	31,4	26,8
	N_2	24,8	38,4	31,6
	N_3	25,1	44,7	34,9
średnio		**22,4**	**35,5**	**28,9**
40	N_0	19,3	31,5	25,4
	N_1	22,2	42,4	32,3
	N_2	22,5	44,9	33,7
	N_3	25,0	45,2	35,1
średnio		**22,2**	**40,9**	**31,6**
60	N_0	22,1	27,2	24,7
	N_1	23,1	27,9	25,5
	N_2	23,8	29,0	26,4
	N_3	31,8	35,5	33,7
średnio		**25,2**	**29,9**	**27,6**
80	N_0	20,2	24,3	22,3
	N_1	24,1	35,0	29,6
	N_2	30,7	37,5	34,1
	N_3	31,6	40,6	36,1
średnio		**26,7**	**34,4**	**30,5**
Średnio	**N_0**	19,3	26,6	**22,9**
	N_1	21,9	33,4	**27,7**
	N_2	24,1	36,2	**30,2**
	N_3	27,9	40,9	**34,4**
Średnio dla terminów		**23,3**	**34,3**	**28,8**
$NIR_{0,05}$	**I czynnik**	n.i.		
	II czynnik	**3,336**		
	III czynnik	**1,741**		
$NIR_{0,05}$ dla interakcji				
I/II	**II/I**	n.i.	n.i.	
I/III	**III/I**	**8,189**	**3,893**	
II/III	**III/II**	n.i.	n.i.	

n.i. – różnice nie istotne

Tabela 4.26

Aktywność fosfatazy kwaśnej jęczmieniu jarym w zależności od zróżnicowanego nawożenia obornikiem, azotem mineralnym i jego fazy fenologicznej

Dawka obornika $t \cdot ha^{-1}$ I czynnik	Dawka azotu $kg \cdot ha^{-1}$ II czynnik	Faza fenologiczna III czynnik		średnio
		Strzelanie w źdźbło	Dojrzałość późnowoskowa	
0	N_0	22,3	28,6	25,5
	N_1	25,2	45,1	35,1
	N_2	26,2	49,5	37,8
	N_3	29,9	52,3	41,1
średnio		**25,9**	**43,9**	**34,9**
20	N_0	26,8	33,8	30,3
	N_1	27,7	45,0	36,3
	N_2	28,4	56,3	42,3
	N_3	31,2	64,1	47,7
średnio		**28,5**	**49,8**	**39,1**
40	N_0	27,5	38,8	33,1
	N_1	28,8	40,7	34,7
	N_2	31,2	44,5	37,8
	N_3	47,1	47,2	47,2
średnio		**33,6**	**42,8**	**38,2**
60	N_0	30,6	47,2	38,9
	N_1	39,4	48,3	43,8
	N_2	46,2	50,5	48,1
	N_3	60,6	55,0	57,8
średnia		**44,2**	**50,2**	**47,2**
80	N_0	28,5	34,8	31,6
	N_1	34,3	45,3	39,8
	N_2	39,7	50,0	44,8
	N_3	42,1	60,7	51,3
średnia		**36,2**	**47,7**	**41,9**
Średnio	**N_0**	**27,1**	**36,6**	**31,9**
	N_1	**31,1**	**44,9**	**38,0**
	N_2	**34,3**	**50,1**	**42,2**
	N_3	**42,2**	**55,8**	**49,0**
Średnio		**33,7**	**46,9**	**40,2**
$NIR_{0,05}$	**I czynnik**	**8,878**		
	II czynnik	**4,943**		
	III czynnik	**0,310**		
$NIR_{0,05}$ dla interakcji		n.i.	n.i.	
I/II	**II/I**	**8,874**	**0,693**	
I/III	**III/I**	**4,960**	**0,620**	
II/III	**III/II**			

n.i. – różnice nie istotne

Tabela 4.27

Aktywność fosfatazy kwaśnej w kukurydzy w zależności od zróżnicowanego nawożenia obornikiem, azotem mineralnym i fazy fenologicznej

Dawka obornika $t \cdot ha^{-1}$ I czynnik	Dawka azotu $kg \cdot ha^{-1}$ II czynnik	Faza fenologiczna III czynnik			średnio
		Piąty liść rozwinięty	Widoczny wierzchołek wiechy	Dojrzałość żółta	
0	N_0	25,3	27,1	30,0	27,4
	N_1	35,4	50,5	55,3	47,1
	N_2	43,1	70,5	70,2	61,3
	N_3	50,2	85,1	115	83,6
średnio		**38,5**	**58,3**	**67,7**	**54,9**
20	N_0	29,5	31,4	48,6	36,5
	N_1	38,7	60,0	87,4	62,1
	N_2	47,5	82,4	118	82,8
	N_3	54,9	97,3	124	92,1
średnio		**42,6**	**67,7**	**94,6**	**68,4**
40	N_0	41,2	44,8	56,9	47,7
	N_1	47,4	76,6	101	74,8
	N_2	57,5	96,9	114	89,6
	N_3	68,6	119	130	105
średnio		**53,7**	**84,3**	**100**	**79,5**
60	N_0	50,7	76,6	89,2	72,2
	N_1	55,2	82,8	97,1	78,3
	N_2	71,1	94,6	124	96,7
	N_3	78,2	106	149	111
średnio		**63,8**	**90,1**	**114**	**89,6**
80	N_0	43,3	55,7	69,9	56,3
	N_1	46,7	71,4	97,1	71,7
	N_2	58,9	88,2	120	89,1
	N_3	61,0	98,0	130	96,5
średnio		**52,5**	**78,4**	**104**	**78,4**
Średnio	**N_0**	**38,0**	**47,1**	**58,9**	**48,0**
	N_1	**44,7**	**68,2**	**87,5**	**66,8**
	N_2	**55,6**	**86,5**	**109**	**83,9**
	N_3	**62,6**	**101**	**129**	**97,8**
Średnio		**50,2**	**75,7**	**96,4**	**74,2**
$NIR_{0,05}$ I czynnik			**6,253**		
II czynnik			**2,705**		
III czynnik			**1,564**		
Interakcja I/II II/I		**7,969**		**6,050**	
I/III III/I		**6,629**		**3,496**	
II/III III/II		**3,707**		**3,127**	

Spośród czynników zewnętrznych modulujących aktywność fosfataz w tkankach roślinnych istotny wpływ wywiera niedobór fosforanu w glebie bądź pożywce. Przy braku w podłożu jonów fosforanowych stwierdza się gwałtowny wzrost aktywności fosfatazowej w apoplaście ścian komórkowych i plazmalemie oraz szybkie uwalnianie enzymu na zewnątrz komórki [OLCZAK 1996, HARAN i in. 2000, RICHARDSON i in. 2000, TOMSCHA

i in. 2004, SARAPATKA i in. 2004, CIERESZKO 2005, WYSZOŁMIRSKA i in. 2006]. Podczas niedoboru fosforu nieorganicznego fosfatazy działają więc jak „system ratowniczy", hydrolizując każdy ewentualny substrat do nieorganicznego fosforu, który może być pobrany przez korzenie. HAMMOND i in. [2004] stwierdzili również, że kwaśne fosfatazy wewnątrzkomórkowe mogą efektywnie uczestniczyć w mobilizacji fosforu nieorganicznego z puli fosforanów organicznych komórki.

Niedobór wody w glebie wywołany niskimi opadami atmosferycznymi, (takie odnotowano w badaniach własnych w miesiącach wiosennych), może prowadzić do deficytu wodnego roślin. U podstaw zmian fizjologicznych wywołanych deficytem wodnym w roślinach leżą procesy biochemiczne odpowiedzialne za wzrost, rozwój i plonowanie roślin [RAKOWSKI 2003].

4.6. KORELACJE POMIĘDZY ZAWARTOŚCIĄ WYBRANYCH FRAKCJI FOSFORU W GLEBIE I ROŚLINACH, A ICH AKTYWNOŚCIĄ FOSFATAZOWĄ

Współczynniki korelacji pomiędzy badanymi parametrami zostały przedstawione w tab. 4.28, 4.29, 4.30, 4.31.

Stwierdzono istotną korelację pomiędzy zawartością węgla związków organicznych, a zawartością fosforu ogółem, fosforu związków organicznych i fosforu przyswajalnego w badanej glebie płowej, we wszystkich latach badań. Najwyższą wartość współczynnika korelacji (r=0,79*) otrzymano pomiędzy zawartością C_{org} i P_{og} w badanej glebie pobranej w roku 2002 (tab. 4.28). Również współczynnik korelacji pomiędzy zawartością C_{org}, a zawartością fosforu związków organicznych w glebie pobranej we wszystkich latach badań (tab. 4.28) był istotny i mieścił się w przedziale od r=0,50* do r=0,72* (rys. 4.10). Przeprowadzona analiza korelacji zawartości węgla związków organicznych i fosforu związków organicznych w glebie potwierdziła wcześniejsze doniesienia o wysoko istotnym związku tych dwóch parametrów w glebach Mochełka [KOPER 1990], w których uzyskano wysoko istotną korelację między zawartości P_{org} i C_{org} (r=0,91*) i w glebach z Baborówka (r=0,94*) KOPER [1996]. Podobnie BORIE I RUBIO [2003] stwierdzili wysoką korelację pomiędzy zawartością w glebie węgla związków organicznych i fosforu związków organicznych (r=0,73, $p<0,05$) sugerując wysokie powinowactwo pomiędzy fosforem i próchnicą. Natomiast na podstawie otrzymanych wyników GIBCZYŃSKA I LEWANDOWSKA [2004] nie uzyskały korelacji między zawartością fosforu ogółem i fosforu związków organicznych, a ilością próchnicy w glebie (r=0,64 i r=0,39). Autorki

tłumaczą to relatywnie niskim udziałem P_{org} w jego ogólnej zawartości w glebach (od 1,3 do 41,5%).

W badaniach własnych uzyskano istotne wartości współczynnika korelacji pomiędzy zawartością w glebie badanych frakcji fosforu. Zawartość fosforu związków organicznych była zawsze istotnie skorelowana z zawartością fosforu ogółem, jak i zawartością fosforu przyswajalnego w glebie (tab.4.28). Najwyższą wartość współczynnika korelacji pomiędzy zawartością w glebie P_{org}, a zawartością P_{E-R} (r=0,94*) uzyskano w glebie pobranej w 2001 roku, spod uprawy ziemniaka (rys. 4.11). Natomiast najniższą istotną korelacje (r=0,47*) otrzymano w glebie spod uprawy jęczmienia jarego w 2003 roku. Zależność między zawartością fosforu związków organicznych a zawartością fosforu ogółem w glebie była najwyższa (r=0,89*) w glebie pobranej spod jęczmienia jarego uprawianego w 2003 roku (rys. 4.12), a najniższa istotna (r=0,34*) w glebie spod ziemniaka uprawianego w 2001 roku. W badaniach GIBCZYŃSKIEJ I LEWANDOWSKIEJ [2004] analiza korelacji wykazała brak zależności między zawartością fosforu ogółem, a fosforu związków organicznych w badanych glebach (r=0,45).

Stwierdzono istotną korelację pomiędzy zawartością fosforu związków organicznych, a aktywnością fosfatazy alkalicznej tylko w glebie pobranej w roku 2002, spod uprawy pszenicy ozimej (r=0,33*) (tab. 4.29). Natomiast pomiędzy zawartością P_{org} w glebie, a aktywnością glebowej fosfatazy kwaśnej, istotny współczynnik korelacji stwierdzono w glebie pobranej w latach 2001: (r=0,66*), 2003: (r=0,47*), 2004: (r=0,34*) (tab.4.29). SARAPATKA I KRSKOVA [1997], SARAPATKA [2003], GIBCZYŃSKA I LEWANDOWSKA [2004] nie stwierdzili istotnej zależności pomiędzy zawartością fosforu związków organicznych, a aktywnością obu fosfataz w badanych glebach. Uzasadnieniem tego faktu może być wniosek NANNIPIERI i in. [1990], AMADOR i in. [1997], YADAVA I TARAFDARA [2001], że aktywność fosfatazy może być zastosowana jako indeks do określenia stopnia mineralizacji organicznych związków fosforu, a jednocześnie fosfatazy mogłyby być stosowane jako wskaźnik zawartości fosforu nieorganicznego w glebach.

Wysokie wartości współczynnika korelacji uzyskano między zawartością fosforu przyswajalnego, a aktywnością fosfatazy alkalicznej w glebie pobranej spod uprawy jęczmienia jarego w 2003 roku (r=0,79*) oraz aktywnością fosfatazy kwaśnej: (r=0,77*) w glebie spod ziemniaka i (r=0,85*) w glebie pobranej spod jęczmienia jarego uprawianego w 2003 roku (rys. 4.13). KOPER [1996] we wcześniejszych badaniach otrzymał również wysoko istotne zależności pomiędzy przyswajalną formą fosforu, a aktywnością badanych fosfomonoesteraz glebowych.

Określając zależność między aktywnością obydwu fosfataz w glebie, otrzymano współczynnik korelacji wynoszący r=0,81* do r=0,83*. Nie stwierdzono zależności między aktywnością badanych fosfomonoesteraz w glebie pobranej spod pszenicy ozimej uprawianej w roku 2001. Natomiast w pracy KOPERA i in. [2003] współczynnik korelacji pomiędzy aktywnością obu fosfataz wyniósł r= -0,72*. Autorzy wiążą to z innym źródłem pochodzenia omawianych fosfataz - fosfataza alkaliczna była w większości badanych prób prawdopodobnie pochodzenia bakteryjnego.

Na podstawie uzyskanych wyników badań własnych stwierdzono istotną korelację pomiędzy zawartością w glebie węgla związków organicznych, a aktywnością fosfatazy zarówno alkalicznej jak i kwaśnej prawie we wszystkich latach badań. Najwyższy współczynnik korelacji pomiędzy zawartością C_{org} a aktywnością AlP (r=0,62*) oraz zawartości $C_{org,}$ a aktywności AcP (r=0,76*) otrzymano w glebie pobranej spod jęczmienia jarego (uprawianego w 2003 roku) (tab. 4.29). W badaniach SARAPATKI I KRSKOVEJ [1997], ALBIACHA i in. [2001], AON I COLANERI [2001] stwierdzono istotną korelację pomiędzy zawartością w glebie węgla związków organicznych i azotu ogółem, a aktywnością zarówno fosfatazy alkalicznej jak i kwaśnej. Autorzy ci stwierdzają, że aktywność enzymów zależy bezpośrednio od zawartości w glebie substancji organicznych, a niewłaściwy system gospodarki z niskim dodatkiem materii organicznej wpływa ujemnie na biologiczną i biochemiczną żyzność gleby. Podobnie DENG I TABATABAI [1997] uzyskali istotną korelację dla zawartości C_{org} i aktywnością fosfatazy alkalicznej (r=0,72*) i fosfatazy kwaśnej (r=0,71*) w 40 badanych glebach. Wskazuje to na fakt, że materia organiczna gleby pełni istotną rolę w ochronie enzymów i utrzymaniu ich aktywności. Według KOBUSA [1995] substancja organiczna chroni enzymy glebowe przed niekorzystnymi czynnikami przedłużając tym samym okres ich aktywności. W badaniach własnych stwierdzono istotną korelację pomiędzy aktywnością fosfatazową gleb, a zawartością fosforu ogółem w roślinach uprawianych w trakcie rotacji w latach 2001-2004 (tab. 4.29), gdzie współczynniki korelacji wyniosły od r=0,68*, do r=0,96*. Równie istotne wartości współczynników korelacji uzyskano między aktywnością fosfatazy kwaśnej w glebie a zawartością P_{og} w badanych roślinach wynoszące od r=0,59* do r=0,79*. W swoich badaniach KUCHARSKI i in. [2006] stwierdzili również istotną korelację pomiędzy aktywnością AlP w glebie zanieczyszczonej miedzią a zawartością P_{og} (r=0,74*) oraz aktywnością AcP a zawartością P_{og} (r=0,73*) w jęczmieniu jarym.

W badaniach własnych nie uzyskano istotnych korelacji pomiędzy aktywnością fosfataz a odczynem gleby (tab. 28). Natomiast w pracach innych badaczy [ACOSTA-MARTINEZ I TABATABAI 2000] stwierdzono wysoką istotną wartość współczynnika korelacji (r=0,95*) dla zależności pH i aktywności alkalicznej fosfomonoesterazy. Istotny, ale ujemny współczynnik korelacji (r= -0,69*) autorzy ci otrzymali dla aktywności fosfatazy kwaśnej i pH gleby.

Przeprowadzono analiza korelacji uzyskanych wyników badań własnych wykazała istotny ujemny związek pomiędzy zawartością fosforu ogółem i aktywnością fosfatazy alkalicznej w jęczmieniu jarym (r= -0,68*) i kukurydzy (r= -0,40*) oraz pomiędzy zawartością P_{og} i aktywnością AcP w kukurydzy (r= -0,26*). Podobne rezultaty uzyskali MACHADO I FURLANI [2004], gdzie wartość współczynnika korelacji pomiędzy aktywnością AcP i zawartością P_{og} w kukurydzy wyniósł r= -0,73*.

Zależność pomiędzy zawartością fosforu związków organicznych i aktywnością fosfatazy alkalicznej i kwaśnej w badanych roślinach została potwierdzona statystycznie i wyrażona współczynnikiem korelacji wynoszącym: P_{org}(R)/AlP(R) r=0,89* (rys. 4.14) oraz P_{org}(R)/AcP(R) r=0,74* stwierdzono w pszenicy ozimej pobranej w roku 2002. Potwierdzają to dane HAMMONDA i in. [2004], że fosfatazy wewnątrzkomórkowe roślin skutecznie uczestniczą w mineralizacji organicznych połączeń fosforu komórek.

Istotne dodatnie współczynniki korelacji uzyskano (z wyjątkiem roku 2003) między zawartością w glebie fosforu przyswajalnego a aktywnością obu fosfataz w badanych roślinach (tab.30). Najwyższe istotne wartości współczynników korelacji (r=0,88*) uzyskano pomiędzy zawartością P_{E-R} a aktywnością fosfatazy alkalicznej w bulwach ziemniaka (2001 rok) i w pszenicy ozimej (2002 rok). Natomiast największe wzajemne oddziaływanie (r=0,71*) stwierdzono pomiędzy zawartością P_{E-R} a aktywnością kwaśnej fosfatazy kukurydzy (rys. 4.15). Tymczasem badania CIERESZKO [2002], WYSZOŁMIRSKIEJ i in. [2006] sugerują, że w warunkach niedoboru fosforu przyswajalnego w podłożu następuje wzrost aktywności kwaśnych fosfataz wewnątrzkomórkowych w tkankach roślin (ogórek, dwie odmiany owsa).

W badaniach własnych istotne współczynniki korelacji uzyskano pomiędzy aktywnością fosfatazy alkalicznej i kwaśnej gleby a zawartością fosforu ogółem w badanych roślinach (tab. 4.28). Największą wartość współczynnika korelacji (r=0,96*) uzyskano między aktywnością AlP w badanej glebie a zawartością P_{og} w kukurydzy uprawianej w 2004 roku (rys 4.16).

Stwierdzono istotne wartości współczynnika korelacji pomiędzy plonem pszenicy ozimej, a zawartością w glebie fosforu przyswajalnego (r=0,63*), aktywnością glebowej fosfatazy kwaśnej (r=0,79*), zawartością azotu ogółem (r=0,69*) oraz aktywnością fosfatazy kwaśnej oznaczonej w pszenicy ozimej (r=0,42*) (tab. 4.31). Istotne korelacje uzyskano również pomiędzy plonem ziarna jęczmienia jarego a aktywnością AcP w glebie (r=0,81*). MYŚKÓW i in. [1996] otrzymali istotne korelacje pomiędzy aktywnością fosfatazy alkalicznej w glebie a plonami kukurydzy (r=0,96*) i plonami ziemniaków (r=0,75*). Wysokie (r=0,794 - 0,837*) współczynniki korelacji pomiędzy plonami bulw ziemniaka, a aktywnością fosfatazy kwaśnej w glebie i aktywnością fosfatazy alkalicznej (r=0,822*) stwierdzili MARTYNIUK i in. [1997]. Wskazywałoby to, że enzym ten może być dobrym wskaźnikiem aktywności mikroflory glebowej kształtującej produkcyjność gleby. MARTYNIUK i in. [1998] badając aktywność wybranych enzymów w glebie uzyskali wysoka korelację (r=0,758 – 0,827*) pomiędzy aktywnością kwaśnej fosfatazy a plonami ziarna jęczmienia jarego.

Tabela 4.28

Współczynniki korelacji pomiędzy zawartością frakcji fosforu w glebie a badanymi parametrami

	ROK	P_{og} (G)	P_{org} (G)	P_{E-R}	AlP (G)	AcP (G)	C_{org}	N_{og}	P_{og} (R)	P_{org} (R)	AlP (R)	AcP (R)	pH (H_2O)	pH (KCl)
P_{og} (G)	2001	-	**0,34***	**0,42***	**0,82***	**0,40***	**0,57***	**0,39***	**0,67***	**0,76***	0,16	0,15	0,15	-0,06
	2002	-	**0,82***	**0,74***	**0,52***	0,10	**0,79***	**0,65***	**0,56***	**0,70***	**0,74***	**0,43***	-0,03	0,07
	2003	-	**0,89***	**0,56***	**0,33***	**0,46***	**0,49***	**0,34***	-0,01	**0,72***	**0,48***	**0,39***	-0,12	0,11
	2004	-	**0,78***	**0,88***	-0,04	0,11	**0,69***	**0,57***	-0,09	**0,36***	**0,74***	**0,76***	-0,22	0,01
P_{org} (G)	2001	**0,34***	-	**0,94***	-0,01	**0,66***	**0,72***	**0,59***	0,24	**0,68***	**0,87***	**0,66***	0,20	0,04
	2002	**0,82***	-	**0,85***	**0,33***	-0,17	**0,68***	**0,53***	**0,39***	**0,87***	**0,90***	**0,51***	-0,01	0,06
	2003	**0,89***	-	**0,47***	0,21	**0,47***	**0,50***	**0,45***	-0,19	**0,71***	**0,66***	**0,52***	-0,01	0,26
	2004	**0,78***	-	**0,81***	0,23	**0,34***	**0,70***	**0,60***	0,15	**0,34***	**0,54***	**0,60***	-0,15	0,06
P_{E-R}	2001	**0,42***	**0,94***	-	0,03	**0,77***	**0,78***	**0,67***	0,27	**0,63***	**0,88***	**0,71***	**0,33***	0,10
	2002	**0,74***	**0,85***	-	**0,38***	-0,04	**0,72***	**0,59***	**0,33***	**0,69***	**0,88***	**0,32***	0,10	0,13
	2003	**0,56***	**0,47***	-	**0,79***	**0,85***	**0,76***	0,57	**0,61***	**0,74***	0,05	0,28	0,09	0,16
	2004	**0,88***	**0,81***	-	0,08	0,15	**0,66***	**0,53***	0,04	**0,54***	**0,75***	**0,71***	-0,10	0,02

*Objaśnienia symboli do tabel :

*- wyniki istotne statystycznie z $p<0,05$
P_{og} – fosfor ogółem
P_{org} – fosfor związków organicznych
P_{E-R} – fosfor przyswajalny wg Egnera – Riehma
AlP - fosfataza alkaliczna
AcP – fosfataza kwaśna
C_{org} – węgiel związków organicznych
N_{og} – azot ogółem

(G) – gleba
(R) - roślina
pH (H_2O) – odczyn gleby oznaczony w wodzie
pH (KCl) – odczyn gleby w KCl o stężeniu 1 $mol \cdot dm^{-3}$
rok 2001 – uprawa ziemniak
rok 2002 – uprawa pszenicy ozimej
rok 2003 – uprawa jęczmienia jarego
rok 2004 – uprawa kukurydzy

Tabela 4.29

Współczynniki korelacji pomiędzy aktywnością fosfatazy alkalicznej i fosfatazy kwaśnej w glebie płowej a badanymi parametrami

	ROK	P_{og} (G)	P_{org} (G)	P_{E-R}	AlP (G)	AcP (G)	C_{org}	N_{og}	P_{og} (R)	P_{org} (R)	AlP (R)	AcP (R)	pH (H_2O)	pH (KCl)
AlP(G)	2001	**0,82***	-0,01	0,03	-	0,01	0,24	0,16	**0,68***	**0,59***	-0,20	-0,11	-0,01	-0,10
	2002	**0,52***	**0,33***	**0,38***	-	**0,83***	**0,56***	**0,53***	**0,95***	-0,01	0,15	-0,28	0,14	0,15
	2003	**0,33***	0,21	**0,79***	-	**0,81***	**0,62***	**0,42***	**0,88***	**0,49***	**-0,39***	-0,07	-0,06	0,15
	2004	-0,04	0,23	0,08	-	**0,83***	**0,40***	0,33	**0,96***	-0,10	**-0,43***	-0,25	-0,12	0,02
AcP(G)	2001	**0,40***	**0,66***	**0,77***	0,01	-	**0,66***	**0,47***	0,26	**0,44***	**0,73***	**0,66***	0,06	-0,08
	2002	0,10	-0,17	-0,04	**0,83***	-	0,25	0,25	**0,78***	**-0,49***	-0,30	**-0,53***	-0,03	-0,04
	2003	**0,46***	**0,47***	**0,85***	**0,81***	-	**0,76***	**0,68***	**0,59***	**0,64***	0,01	**0,33***	-0,12	0,24
	2004	0,11	**0,34***	0,15	**0,83***	-	**0,51***	**0,46***	**0,79***	-0,15	**-0,30***	-0,06	-0,15	0,01

*Objaśnienia symboli znajdują sie pod tabelą 4.28

Tabela 4.30

Współczynniki korelacji pomiędzy zawartością frakcji fosforu w roślinach a badanymi parametrami

	ROK	P_{og} (G)	P_{org} (G)	P_{E-R}	AlP (G)	AcP (G)	C_{org}	N_{og}	P_{og} (R)	P_{org} (R)	AlP (R)	AcP (R)	pH (H_2O)	pH (KCl)
P_{og} (R)	**2001**	**0,67***	0,24	0,27	**0,68***	0,26	**0,50***	0,12	-	**0,70***	0,14	0,19	0,02	-0,23
	2002	**0,56***	**0,39***	**0,33***	**0,95***	**0,78***	**0,55***	0,48	-	0,06	0,16	-0,20	-0,03	0,05
	2003	-0,01	-0,19	**0,61***	**0,88***	**0,59***	**0,34***	0,24	-	0,16	**-0,68***	-0,29	-0,07	0,03
	2004	-0,09	0,15	0,04	**0,96***	**0,79***	**0,40***	**0,31***	-	-0,06	**-0,40***	**-0,26***	-0,13	0,03
P_{org} (R)	**2001**	**0,76***	**0,68***	**0,63***	**0,59***	**0,44***	**0,69***	**0,40***	**0,70***	-	**0,52***	**0,42***	0,03	-0,17
	2002	**0,70***	**0,87***	**0,69***	-0,01	**-0,49***	**0,54***	**0,37***	0,06	-	**0,89***	**0,74***	-0,01	0,04
	2003	**0,72***	**0,71***	**0,74***	**0,49***	**0,64***	**0,80***	**0,39***	0,16	-	**0,53***	**0,60***	-0,13	0,03
	2004	**0,36***	**0,34***	**0,54***	-0,10	-0,15	0,19	0,12	-0,06	-	**0,73***	**0,48***	-0,07	-0,03

*Objaśnienia symboli znajdują sie pod tabelą 4.28

Tabela 4.31

Współczynniki korelacji pomiędzy aktywnością fosfomonoesteraz roślinnych a badanymi parametrami

	ROK	P_{og} (G)	P_{org} (G)	P_{E-R}	AlP (G)	AcP (G)	C_{org}	N_{og}	P_{og} (R)	P_{org} (R)	AlP (R)	AcP (R)	pH (H_2O)	pH (KCl)
AlP(R)	**2001**	0,16	**0,87***	**0,88***	-0,20	**0,73***	**0,69***	**0,58***	0,14	**0,52***	-	**0,81***	0,16	-0,06
	2002	**0,74***	**0,90***	**0,88***	0,15	-0,30	**0,70***	**0,56***	0,16	**0,89***	-	**0,64***	0,06	0,11
	2003	**0,48***	**0,66***	0,05	**-0,39***	0,01	**0,35***	0,23	**-0,68***	**0,53***	-	**0,74***	-0,04	0,01
	2004	**0,74***	**0,54***	**0,75***	**-0,43***	**-0,30***	**0,38***	**0,29***	**-0,40***	**0,73***	-		-0,12	0,02
AcP(R)	**2001**	0,15	**0,66***	**0,71***	-0,11	**0,66***	**0,65***	**0,47***	0,19	**0,42***	**0,81***	-	-0,18	**-0,39***
	2002	**0,43***	**0,51***	**0,32***	-0,28	**-0,53***	**0,45***	0,17	-0,20	**0,74***	**0,64***	-	-0,26	-0,29
	2003	**0,39***	**0,52***	0,28	-0,07	**0,33***	**0,52***	0,29	-0,29	**0,60***	**0,74***	-	**-0,36***	-0,08
	2004	**0,76***	**0,60***	**0,71***	-0,25	-0,06	**0,62***	**0,34***	**-0,26***	**0,48***	**0,78***	-	**-0,46***	**-0,32***

*Objaśnienia symboli znajdują sie pod tabelą 4.28

Tabela 4.32

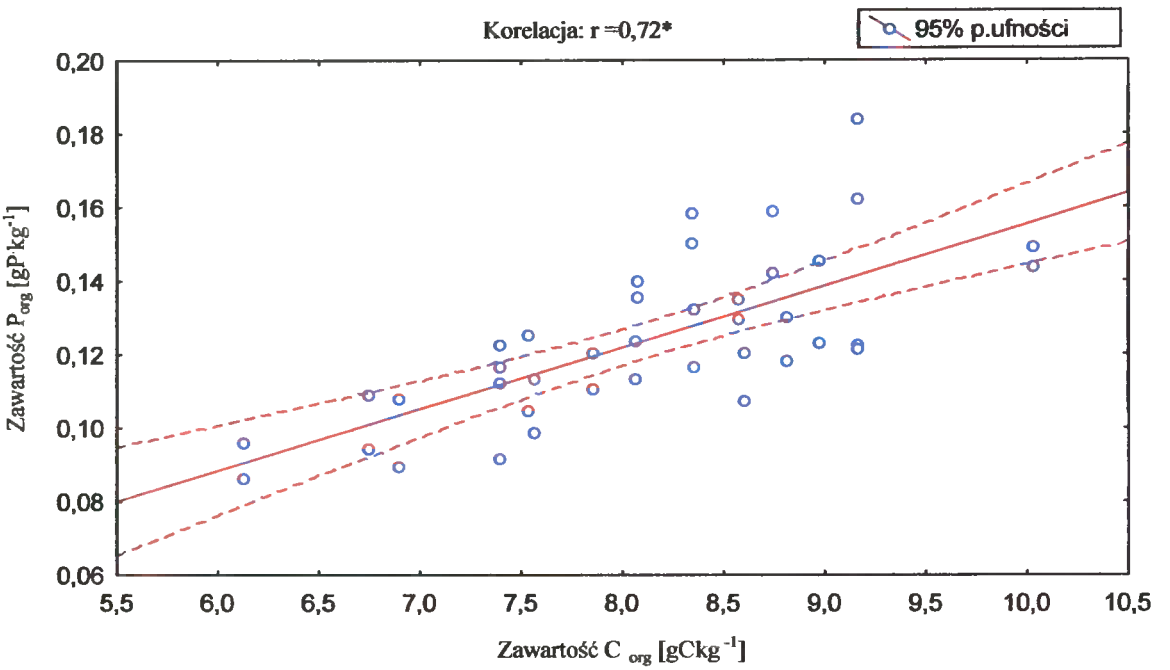
Współczynniki korelacji pomiędzy plonem roślin a badanymi parametrami

ROK	P_{og} (G)	P_{org} (G)	P_{E-R}	AlP (G)	AcP (G)	C_{org}	N_{og}	P_{og} (R)	P_{org} (R)	AlP (R)	AcP (R)	pH (H_2O)	pH (KCl)
2001	-0,02	0,17	0,25	-0,21	0,24	**0,34***	0,11	-0,06	-0,14	-0,27	**0,42***	0,23	0,02
2002	0,18	0,13	**0,63***	-0,40	**0,79***	0,20	**0,69***	-0,21	0,28	0,24	**0,42***	-0,07	-0,05
2003	0,02	-0,06	**0,77***	**0,43***	**0,81***	0,03	**0,71***	**0,50***	0,03	**-0,40***	**-0,38***	0,27	0,31
2004	0,06	0,08	0,01	0,05	0,17	0,18	0,15	0,09	-0,01	0,03	0,05	0,02	0,01

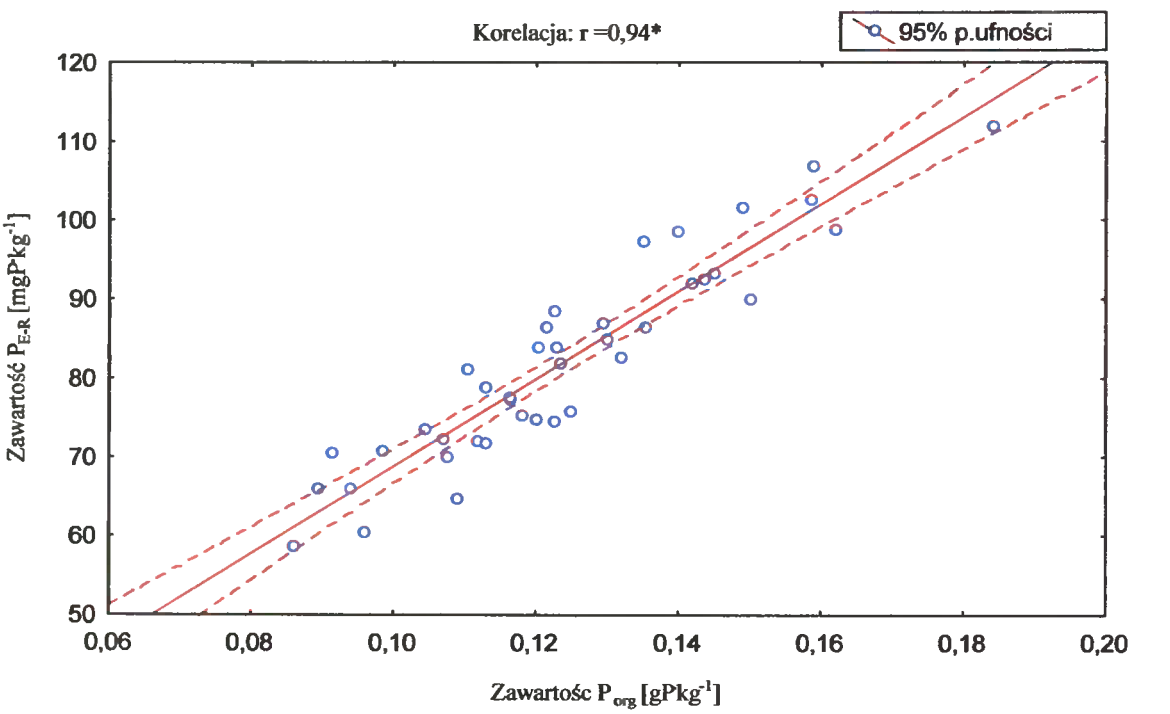
*Objaśnienia symboli znajdują sie pod tabelą 4.28

Plony roślin ($t \cdot ha^{-1}$) uprawianych w zmianowaniu w latach 2002-2004 (Dane dotyczące plonów roślin publikowane za zgodą dr hab. Janusza Igrasa - kierownika Zakładu Żywienia Roślin i Nawożenia Instytutu Uprawy)

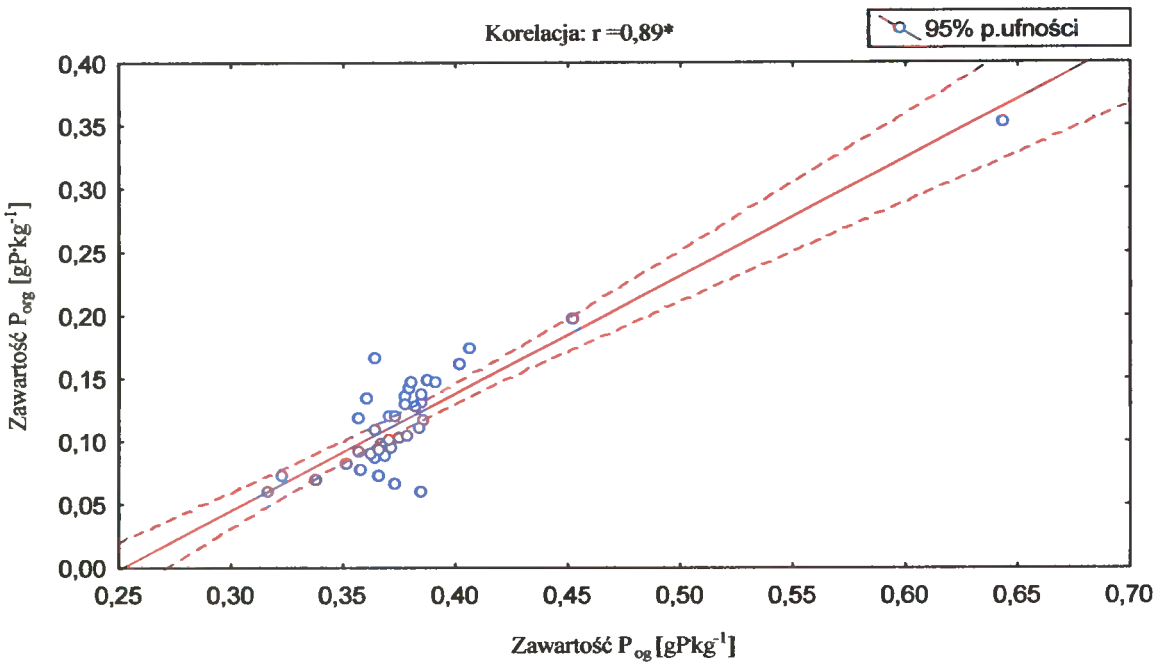
Dawka obornika $t \cdot ha^{-1}$	Dawka azotu $kg \cdot ha^{-1}$	Rośliny - lata						
		Ziemniaki - 2001	Pszenica ozima - 2002		Jęczmień jary - 2003		Kukurydza - 2004	
		bulwy	ziarno	słoma	ziarno	słoma	ziarno	słoma
0	N_0	11,7	2,94	3,65	2,15	2,08	24,8	9,48
	N_1	13,1	4,33	4,53	2,21	2,43	28,3	11,4
	N_2	16,4	5,40	4,96	2,06	2,56	28,6	13,4
	N_3	20,6	5,79	5,76	1,87	2,61	27,7	13,1
20	N_0	13,1	3,30	3,81	2,38	2,19	27,0	10,9
	N_1	18,7	4,83	4,96	2,23	2,53	31,9	13,9
	N_2	21,6	5,46	5,57	2,16	2,61	33,2	14,5
	N_3	23,1	6,09	5,87	1,96	2,72	22,3	16,2
40	N_0	17,9	3,98	4,24	2,70	2,27	29,9	12,4
	N_1	20,5	4,85	5,47	2,40	2,61	30,1	13,9
	N_2	22,8	5,64	5,60	2,32	2,75	31,4	14,5
	N_3	24,7	6,31	6,51	2,09	3,07	32,3	15,2
60	N_0	21,2	4,74	4,51	2,76	2,29	33,6	13,9
	N_1	24,9	5,46	5,52	2,19	3,04	33,4	15,3
	N_2	25,8	5,83	5,89	2,10	3,39	31,6	14,9
	N_3	28,7	6,45	6,67	1,93	3,23	31,6	15,6
80	N_0	22,9	4,98	5,15	2,82	2,32	30,3	12,9
	N_1	26,0	5,73	5,60	2,35	2,93	33,4	15,9
	N_2	28,0	6,41	6,32	2,11	3,57	32,7	16,0
	N_3	29,7	4,69	6,72	1,82	3,33	32,3	16,1



Rysunek 4.10
Zależność pomierzy zawartością węgla związków organicznych a zawartością fosforu związków organicznych w glebie pobranej w 2001 roku spod ziemniaka

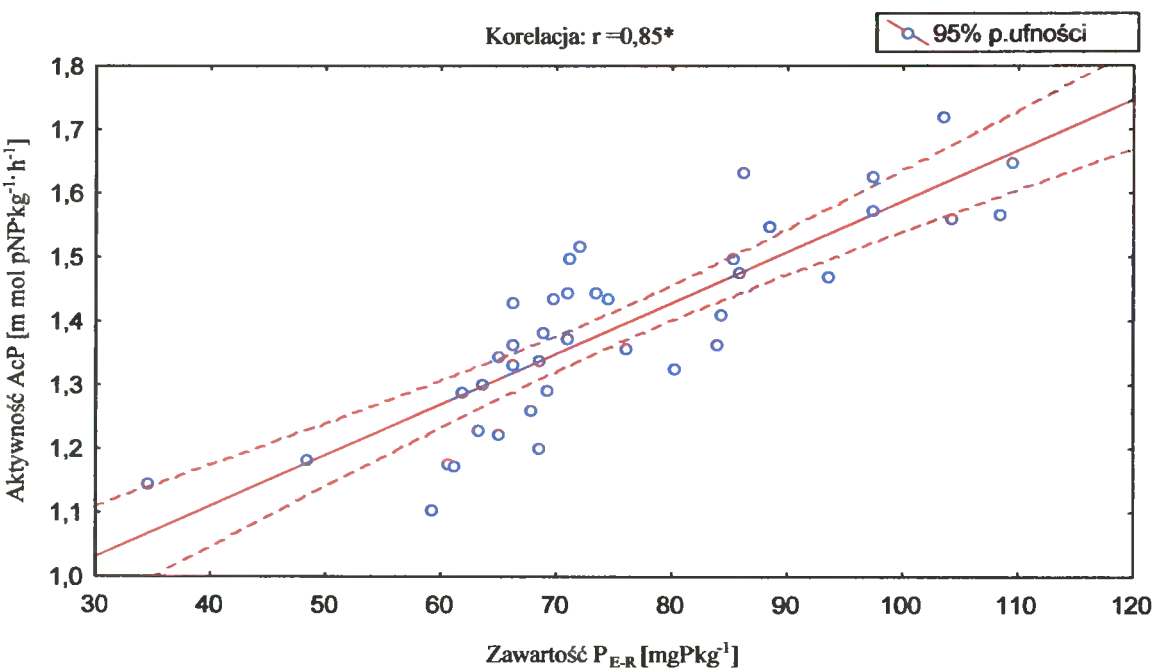


Rysunek 4.11
Zależność pomiędzy zawartością fosforu związków organicznych a zawartością fosforu przyswajalnego w glebie pobranej w 2001 roku



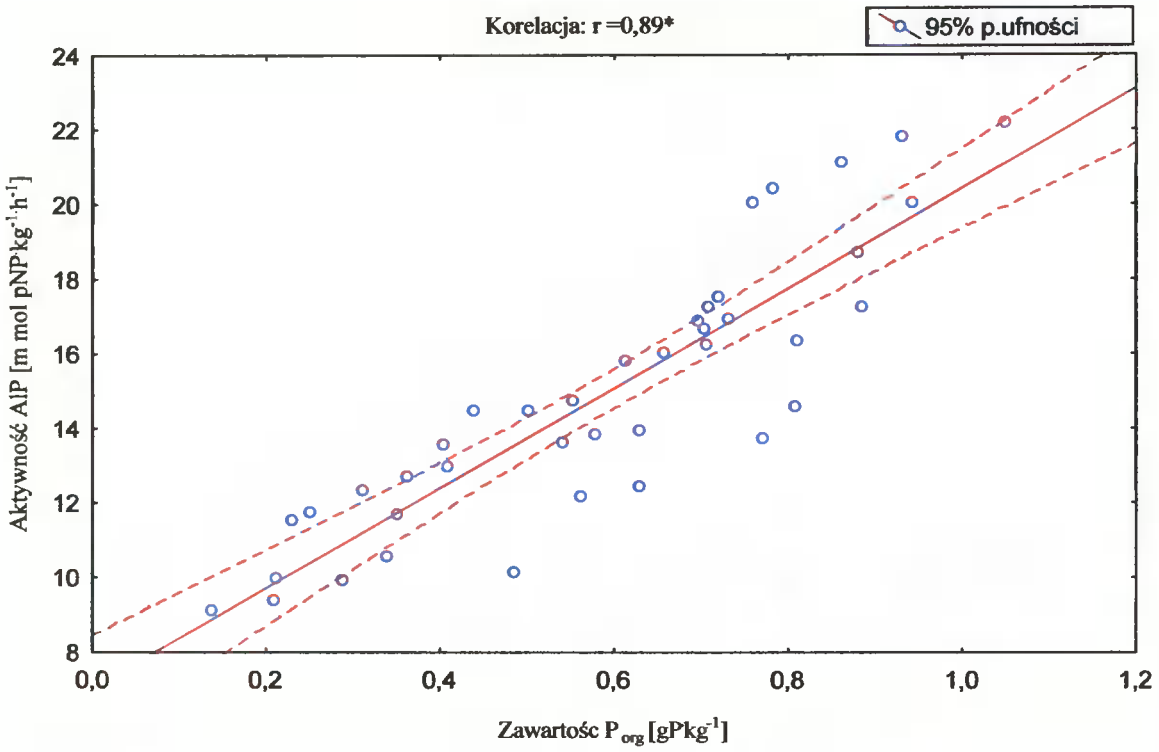
Rysunek 4.12

Zależność pomiędzy zawartością fosforu ogółem a zawartością fosforu związków organicznych w glebie pobranej w 2003 roku spod uprawy jęczmienia jarego

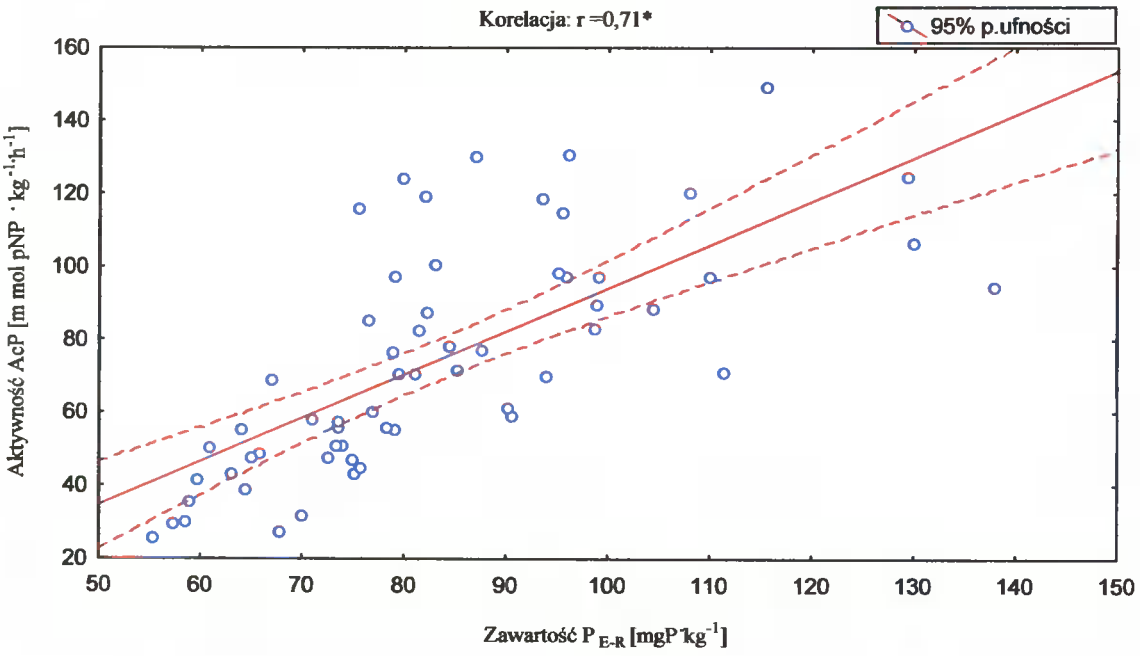


Rysunek 4.13

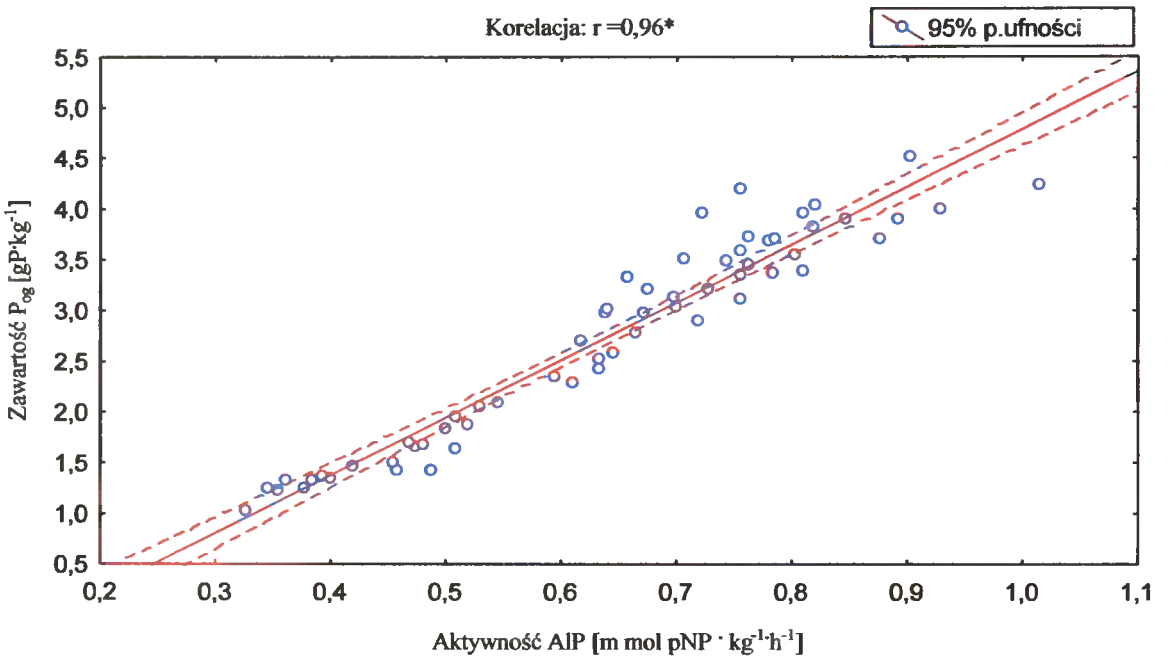
Zależność pomiędzy zawartością fosforu przyswajalnego a aktywnością fosfatazy kwaśnej w glebie pobranej w 2003 roku spod uprawy jęczmienia jarego



Rysunek 4.14
Zależność pomiędzy zawartością fosforu związków organicznych i aktywnością fosfatazy alkalicznej w pszenicy ozimej pobranej w 2002 roku



Rysunek 4.15
Zależność pomiędzy zawartością fosforu przyswajalnego a aktywnością fosfatazy kwaśnej w kukurydzy pobranych w 2004 roku



Rysunek 4.16
Zależność pomiędzy aktywnością fosfatazy alkalicznej w badanej glebie i zawartością fosforu ogółem w kukurydzy pobranych w 2004 roku

6. WNIOSKI

1. Wykazano, że zawartość węgla związków organicznych i azotu ogółem jako głównych składników materii organicznej była uwarunkowana wieloletnim nawożeniem obornikiem bydlęcym i azotem mineralnym w postaci saletry amonowej. Zmiany zawartości tych biopierwiastków w badanej glebie płowej uzależnione były istotnie od dawek zastosowanych nawozów. Otrzymane wartości stosunku C_{org}:N_{og} świadczą o zróżnicowanym tempie mineralizacji organicznych związków węgla i azotu.

2. Stwierdzono istotny wpływ nawożenia zróżnicowanymi dawkami obornika i azotu mineralnego na dynamikę fosforu ogółem oraz fosforu związków organicznych w badanej glebie płowej. Najwyższą zawartość badanych frakcji fosforu stwierdzono w glebie nawożonej obornikiem w dawce 60 $t \cdot ha^{-1}$ i azotem mineralnym w dawce N_2. Zmiany zawartości tych frakcji fosforu były również istotnie determinowane terminem pobierania próbek glebowych.

3. Zastosowane w doświadczeniu czynniki w istotny sposób wpłynęły na zawartość fosforu przyswajalnego w glebie. Badana gleba należy do bardzo dobrze zaopatrzonej we frakcje fosforu niezbędnego dla rozwoju roślin, a jej zmiany ściśle zależały od dawki obornika oraz azotu mineralnego.

4. Zawartość fosforu w oznaczonych frakcjach w badanej glebie zmieniała się istotnie w okresie wegetacyjnym badanych roślin. Zmiany te były wywołane przede wszystkim stopniem aktualnego zapotrzebowania roślin na fosfor w zależności od ich fazy fenologicznej.

5. Na podstawie obliczonych wartości C_{org}:P_{org}, stwierdzono, że w badanej glebie panują warunki fizyko-chemiczne decydujące o szybkim tempie uwalniania fosforanów do roztworu glebowego. Nasilenie procesu uruchamiania fosforu ze związków organicznych stwierdzono w glebie nawożonej obornikiem w dawce 60 $t \cdot ha^{-1}$, świadczą o tym najniższe wartości stosunku C_{org}:P_{org}.

6. Aktywność fosfatazy alkalicznej i kwaśnej w badanej glebie płowej charakteryzowała się zmiennością w okresie wegetacyjnym roślin uwzględnionych w trakcie 4-letniej rotacji.

Zmieniająca się aktywność fosfatazowa gleby w poszczególnych latach prowadzenia badań była dodatnio stymulowana zawartością fosforu przyswajalnego.

7. Wykazano, że zawartość fosforu w oznaczonych frakcjach oraz aktywność fosfatazowa badanej gleby ulegały dynamice, lecz tendencje zmian ilościowych były trwałe w poszczególnych latach prowadzenia eksperymentu Zmiany zawartości fosforu w badanych frakcjach oraz aktywność fosfatazowa gleby były istotnie stymulowane zarówno czynnikami zastosowanymi w eksperymencie polowym jak i pozostawały w ścisłej zależności od warunków pogodowych w trakcie trwania doświadczenia.

8. Zróżnicowane nawożenie organiczno-mineralne trwale stosowane przez 4 lata prowadzenie badań z doświadczenia w Grabowie nad Wisłą w sposób istotny wpłynęło na ukształtowanie odpowiedniego poziomu aktywności fosfatazowej gleby płowej. Na podstawie uzyskanych wyników pomiarów aktywności fosfatazy alkalicznej i fosfatazy kwaśnej obliczono wartość stosunku AlP:AcP określany jako enzymatyczny wskaźnik poziomu pH gleby. Wyniki świadczą, że badana gleba należy do gleb kwaśnych i lekko - kwaśnych.

9. Stwierdzono, że zawartość frakcji fosforu oraz aktywność fosfatazy alkalicznej i kwaśnej w badanych roślinach była istotnie modyfikowana zarówno dawkami obornika i azotu mineralnego jak również ulegała zmianom ilościowym w trakcie rozwoju wegetacyjnego ziemniaka, pszenicy ozimej, jęczmienia jarego i kukurydzy uprawianych w czteroletniej rotacji.

10. Przeprowadzona analiza korelacji dla uzyskanych wyników badań chemiczno – biochemicznych wykazała wysoce istotną zależność miedzy zawartością fosforu w badanych frakcjach w glebie i roślinach uwzględnionych w zmianowaniu, a aktywnością fosfatazową gleby i roślin oraz materią organiczną gleby. Dodatnie korelacje między aktywnością fosfataz a zawartością fosforu badanych frakcji świadczą o tym, że fosfatazy mogą być stosowane jako wskaźnik zawartości fosforu w badanej glebie płowej pozostającej w ścisłych zależnościach nawożeniowo-uprawowych. Zatem znajomość natężenia procesów życiowych wyrażanych aktywnością fosfatazową roślin może być

bardzo pomocna w rozpoznaniu stanu odżywiania roślin w określonych warunkach siedliskowych.

Uniwersytet ... Biblioteka Główna Bydgoszcz

7. SPIS LITERATURY

1. **ACOSTA-MARTÍNEZ V., TABATABAI M.A. 2000**. *Enzyme activities in a limed agricultural soil.* Biol. Fertil. Soils, 31: 85-91.
2. **AGBENIN J.O., GOLADI J.T. 1997**. *Carbon, nitrogen and phosphorus dynamics under continuous cultivation as influenced by farmyard manure and inorganic fertilizers in the savanna of northern Nigeria.* Agric. Ecosys. Envir., 63: 17-24.
3. **AJAWA H.A., DELL C.J., RICE C.W. 1999.** *Changes in enzyme activities and microbial biomass of tallgrass prairie soil as related to burning and nitrogen fertilization.* Soil Biol. Biochem., 31: 769-777.
4. **ALBERTS B., BRAY D. JOHNSON A., LEWIS J., RAFF M., ROBERTS K., WALTER P. 1999.** *Podstawy biologii komórki. Wprowadzenie do biologii molekularnej.* PWN Warszawa, s 167.
5. **ALBIACH R., CONET R., POMARES F., INGELMO F. 2001.** *Organic matter components aggregate stability and biological activity in a horticultural soil fertilized with different rates of two sewage sludges during ten years.* Biores. Technol., 77: 109-114.
6. **AMADOR J.A., GLUCKSMAN A.M., LYONS J.B., GORRES J.H. 1997.** *Spatial distribution of soil phosphatase activity within a riparian forest.* Soil Sci., 162: 808-825.
7. **ANTONKIEWICZ J. 2006.** *Influence of various ash-sludge and ash-peat mixtures on quantity and quality of maize yield. Part I. Macroelements.* Ecol. Chem. Eng., 9 (13): 865-873.
8. **AON M.A. COLANERI A.C. 2001**. *Temporal and spatial evolution of enzymatic activities and physico-chemical properties in an agricultural soil.* Appl. Soil Ecol., 18(3): 255-270.
9. **BALOTA E.L., KANASHIRO M., FILHO A.C., ANDRADE D.S., DICK R.P. 2004.** *Soil enzyme activities under long-term tillage and crop rotation systems in subtropical agro-ecosystems*. Brazil. J. Microbiol., 35:300-306.
10. **BENEDYCKA Z., CZAPLA J., KOZIKOWSKI A. 2001.** *Gospodarka fosforem gryki w zależności od stosowania regulatorów wzrostu.* Pr. Nauk. AE Wrocław, Chemia, 888: 246-253.

11. **Bielińska E.J. 2001.** *Aktywność enzymatyczna gleby w sadzie wiśniowym w zależności od metody jej pielęgnacji.* Rozprawy naukowe AR WR Lublin, 251.
12. **Bielińska E.J. Ligęza S. 2003.** *Kształtowanie się aktywności enzymatycznej w glebach na obszarach wieloletnich kolonii lęgowych kormoranów i fermach gęsich.* Zesz. Probl. Post. Nauk Roln., 492: 15-23.
13. **Bielińska E.J. 2005**. *Oznaczanie aktywności fosfataz.* Acta Agrophys., Rozprawy i Monografie, 3: 63-74.
14. **Blacke L., Mercik S., Körschens M., Moskal S., Poulton P.R., Goulding K.W. T. Weigel A., Pawlson D.S. 2000.** *Phosphorus content in soil, uptake by plants and balance in three European long-term field experiments.* Nutr. Cyc. Agroekosys., 56: 263-275.
15. **Borie F., Rubio R. 2003.** *Total and organic phosphorus in Chilean volcanic soils.* Gayana Bot., 60 (1): 69-78.
16. **Brady N.C., Weil R.R. 2002.** *The nature and properties of soil.* 13th Edition. Prentice Hall. Upper Saddle River, New Jersey, s.960
17. **Buckman H.C., Brady N.C. 1971.** *Gleba i jej właściwości.* PWRiL. Warszawa s. 433.
18. **Budnakova M., Jermak P., Cyganek., Trawnik K. 2002.** *The phosphorus in Czech agriculture.* Fertilizers and Fertilization, 4 (13): 175-181.
19. **Carreira J.A., Garcia-Ruiz R., Liétor J., Harrison A.F. 2000.** *Changes in soil phosphatase activity and P transformation rates induced by application of N – and S – containing acid-mist to a forest canopy.* Soil Biol. Biochem., 32: 1857-1865.
20. **Chen W.S., Huang Y.F., Chen Y. R. 1992**. *Localization of acid phosphatase in root cap of rice plant.* Bot. Bull. Acad. Sin., 33: 233-239.
21. **Chen H. 2003.** *Phosphatase activity and P fractions in soils of an 18-year-old Chinese fir (Cunninghamia lanceolata) plantation.* Forest Ecol. Manag., 178: 301-310.
22. **Ciereszko I., Janonis A., Kociakowska M. 2002.** *Growth and metabolism of cucumber (Cucumis sativus* L.*) in phosphate-deficient conditions.* J. Plant Nutr., 25: 1115-1127.
23. **Ciereszko I. 2003.** *Molekularne podstawy odpowiedzi roślin na niedobór fosforanu.* Post. Biol. Kom., 30: 1-19. 647-666.
24. **Ciereszko I. 2005.** *Czy można usprawnić pobieranie fosforanów przez rośliny?* Kosmos, Probl. Nauk Biol., 54 (4): 391-400.

25. **COLVAN S.R., SERS J.K., O'DONNEL A.G. 2001**. *Effect of long-term fertilizer use on acid and alkaline phosphomonoesterase and phosphodiesterase activities in managed grassland.* Biol. Fertil. Soils, 34: 258-263.

26. **CRIQUET S., FERRE E., FARNET A.M., LE PETIT J. 2004**. *Annual dynamics of phosphatase activities in an evergreen oak litter: influence of biotic and abiotic factors.* Soil Biol. Biochem., 36: 1111-1118.

27. **CWOJDZIŃSKI W., NOWAK K. 2000.** *Wpływ nawożenia na wybrane właściwości gleby w statycznym doświadczeniu nawozowym.* Foila Univ. Agric. Stetin 211, Agricultura, 84: 69-74.

28. **CZEKAŁA J., BLECHARCZYK A., SZUKAŁA J. 1992.** *Wieloletnie badania nad wpływem obornika i nawozów mineralnych na zawartość kilku form fosforu w glebie.* Mat. Konf. Nawozy Organiczne. PAN-AR, Szczecin, 2: 133-138.

29. **CZUBA R. 1996.** *Nawożenie mineralne roślin uprawnych.* Police, ss. 32-263.

30. **CZUBA R. 2001.** *Fosfor we współczesnych krajowych systemach nawożenia.* Prace Nauk. AE Wrocław, Chemia. Związki fosforu w chemii, rolnictwie i medycynie, 888: 144-150.

31. **DARRAH P.R. 1993.** *The rhizosphere and plant nutrition: a quantitative approach.* Plant Soil, 155: 1-20.

32. **DĄBKOWSKA-NASKRĘT H., JAWORSKA H., DYMIŃSKA M. 1996.** *Miedź i cynk w wybranych glebach płowych z Ziemi Dobrzyńskiej.* Zesz. Probl. Post. Nauk Roln., 434: 500-504.

33. **DENG S.P., TABATABAI M.A. 1997**. *Effect of tillage residue management on enzyme activities in soils: III. Phosphatases and arylosulphatase.* Biol. Fertil. Soils, 24: 141-146.

34. **DĘBSKA B. GONET S.S. 2001.** *Wpływ zmianowania oraz nawożenia obornikiem i azotem na zawartość węgla rozpuszczalnego w glebie płowej.* Obieg azotu organicznego w rolnictwie. Fertilizers and Fertilization, 1 (10): 209-215.

35. **DĘBSKA B. 2003.** *Rola resztek roślinnych w kształtowaniu żyzności gleb.* W: Substancje humusowe w glebach i nawozach. Red. Dębska B., Gonet S.S. PTSH, Wrocław, ss: 105-121.

36. **DICK R.P. 1992.** *Long-term effect of agricultural systems on soil biochemical and microbial parameters.* Agric. Ecosys. Environ., 40: 25-36.

37. **DICK W.A., CHENG L., WANG P. 2000**. *Soil acid alkaline phosphatase activity as pH adjustment indicators.* Soil Biol. Biochem., 32: 1915-1919.

38. **DICK W.A., TABATABAI M.A. 1984.** *Kinetic parameters of phosphatases in soils and organic waste materials.* Soil Sci., 137: 7-15.

39. **DICK W.A., TABATABAI M.A. 1999.** *Use of immobilized enzymes for bioremediation. Bioremediation of Contaminated soils.* Dick W.A. (red.), Soil Sci. Am., 37: 315-337.

40. **DINKELAKER B., MARSCHNER H. 1992.** *In vivo demonstration of acid phosphatase activity in the rhizosphere of soil grown plants.* Plant Soil, 144: 199-205.

41. **DOMSKA D., WOJTKOWIAK K. 2000.** *Ocena niektórych właściwości gleb nawożonych obornikiem.* Zesz Nauk. AR Szczecin, 211: 95-98.

42. **EIVAZI F., TABATABAI M.A. 1977.** *Phosphatases in soils.* Soil Biol. Biochem., 9: 167-172.

43. **ERICH M.S., FITZGERALD C.B., PORTER G.A. 2002.** *The effect of organic amendments on phosphorus chemistry in a potato cropping system.* Agric. Ecosys. Environ., 88: 79–88.

44. **FERENS M., MORAWIECKA B. 1984.** *Kwaśne fosfatazy roślin wyższych.* Post. Biochem., 30: 461-475.

45. **FILIPEK T. 2001.** *Przyrodnicze i antropogeniczne przyczyny oraz skutki zakwaszenia gleb.* Fertilizers and Fertilization, 3 (8): 5-26.

46. **FILIPEK T. 2002.** *Zarządzanie zasobami fosforu w środowisku rolniczym.* Fertilizers and Fertilization, 4 (13): 247-258.

47. **FLIS-BUJAK M., DĄBEK-SZRENIAWSKA M., ŻUKOWSKA G. 2006.** *Wpływ systemu produkcji roślinnej na substancję organiczną oraz aktywność enzymatyczną asparaginazy i ureazy gleby płowej.* Acta Agrophys., 8(3): 559-568.

48. **FOSTER R.C., DORMAAR J.F. 1991.** *Bacteria–grazing amoebae in situ in the rhizosphere.* Biol. Fertil. Soils, 11: 83-87.

49. **FOTYMA M., GOSEK S., SZEWCZYK M. 1996.** *Porównanie przydatności różnych metod określania odczynu gleby oraz zawartość przyswajalnych form fosforu, potasu i magnezu.* Roczn. Glebozn., 47 (1/2): 65-78.

50. **FRAKENBERGER W.T. JR., DICK W.A. 1983.** *Relationship between enzyme activities and microbial growth and activity indices in soil.* J. Am. Soil. Sci., 47: 945-951.

51. **FUKUDA T., OSAKI M., SHINANO T., WASAKI J. 2001.** *Cloning and characterization of two secreted acid phosphatases from rice call,* Plant nutrition: Food security and sustainability of agro-ecosystems through basic and applied research. Kluwer Academic: ss 34-35.

52. **Furczak J., Joniec J., Deryło S. 2001.** *Aktywność enzymatyczna gleby bielicowej pod żytem uprawianym w zmianowaniu i monokulturze.* Zesz. Post. Nauk. Roln., 478: 145-154.

53. **Furczak J. 2006.** *Aktywność biochemiczna gleby płowej pod soją uprawianą w różnych systemach.* Acta Agrophys., 8(4): 815-824.

54. **Gahoonia T.S., Care D., Nielsen N.E. 1997.** *Root hairs and phosphorus acquisition of wheat and barley cultivars.* Plant Soil, 191 (2): 181-188.

55. **Gaj R., Grzebisz W. 2003.** *Fosfor w roślinie. Pierwiastki w środowisku. Fosfor.* J. Elementol., 8 (3) Suppl.: 8-18.

56. **Gajda A., Martyniuk S., Stachyra A., Wróblewska B., Zięba S. 2000.** *Relations between microbiological and biochemical properties of soil under different agrotechnical conditions and its productivity.* Polish J. Soil Sci., 33/2: 55-60.

57. **George T.S., Gregory P.J., Wood M., Read M., Buresh R.J. 2002.** *Phosphatase activity and organic acids in the rizosphere of potential agroforestry species and maize.* Soil Biol. Biochem., 34: 1487-1494.

58. **Gianfreda L., Bollag J.M. 1996.** *Influence of natural and anthropogenic factors on enzyme activity in soil.* W: Soil Bioch. Stotzky G., Bollag J.M. (red.), Marcel Dekker, New York, 9: 123-193.

59. **Gibczyńska M., Lewandowska L. 2004.** *Zależność między aktywnością fosfatazy a zawartością różnych frakcji fosforu w glebach różniących się zawartością próchnicy.* Zesz. Probl. Post. Nauk Roln., 501: 127-133.

60. **Gorlach E., Mazur T. 2002.** *Chemia rolna. Podstawy żywienia i zasady nawożenia roślin.* PWN Warszawa, ss 148-346.

61. **Górecki H., Biskupski A., Hoffmann J. 2002.** *Postępy w technologii produkcji nawozów fosforowych z uwzględnieniem wykorzystania surowców wtórnych i odpadowych.* Fertilizers and Fertilization, 4 (13): 8-13.

62. **Grzebisz W., Potarzycki J. 2003.** *Czynniki kształtujące pobieranie fosforu przez rośliny. Pierwiastki w środowisku.* Fosfor. J. Elementol. 8 (3), Suppl.: 47-60.

63. **Grzebisz W., Potarzycki J. 2004.** *Mechanizm pobierania fosforu przez rośliny uprawne – od teorii do praktyki.* Pr. Nauk. AE Wrocław, Chemia, Związki fosforu w chemii, rolnictwie, medycynie i kształtowaniu środowiska, 1017: 88-98.

64. **Grzebisz W., Blecharczyk A., Maj M. 1993.** *Wpływ wieloletniego nawożenia organicznego i mineralnego na formy fosforu w glebie pod monokulturą żyta i ugorem czarnym.* Zesz. Nauk AR Kraków, 37: 75-83.

65. **GURGUL E., KOŁOTA E. 1975:** *Wpływ nawożenia mineralnego i nawadniania na aktywność peroksydazy, katalazy i fosfatazy kwaśnej w dwóch fazach wzrostu kapusty i porów.* Acta Agrobot., 28 (2): 275-290.

66. **HAMMOND J.P., BROADLEY M.R., WHITE P.J. 2004.** *Genetic responses to phosphorus deficiency.* Ann. Bot., 94: 323-332.

67. **HARAN S., LOGENDRA S., SESKAR M., BRATANOVA M., RASKIN I. 2000.** *Characterization of Arabidopsis acid phosphatase promoter and regulation of acid phosphatase expression.* Plant Physiol., 124:615–626.

68. **HSU RY, CLELAND WW, ANDERSON L. 1966.** *Mechanism of action of the nonspecific phosphomonoesterase from potatoes.* Biochem., 5(2): 799-807.

69. **JANOWIAK J. 1995.** *Wpływ nawożenia obornikiem z dodatkiem słomy i zróżnicowanych dawek azotu na właściwości materii organicznej.* Zesz. Probl. Post. Nauk Roln., 421a:145-150.

70. **JANOWIAK J., SPYCHAJ-FABISIAK E., MURAWSKA B. 1999.** *Zawartość węgla i azotu ogółem oraz właściwości materii organicznej w glebach uprawnych.* Zesz. Probl. Post. Nauk Roln., 467: 169-179.

71. **JANOWIAK J., SPYCHAJ-FABISIAK E., MURAWSKA B. 2005.** *Kształtowanie odczynu gleby i zawartość przyswajalnych form fosforu w warunkach doświadczenia wieloletniego.* Fragm. Agronom., 22, 1 (85): 78-87.

72. **JANUSZEK K. 1999.** *Aktywność enzymatyczna wybranych gleb leśnych Polski Południowej w świetle badań polowych i laboratoryjnych.* Zesz Nauk. AR Kraków, Rozprawy 250, s.:132.

73. **JONIER E.J., JAKOBSEN I. 1995.** *Growth and extracellular phosphatase activity of arbuscular mycorrhizal hyphae as influenced by soil organic matter.* Soil Biol. Biochem., 27 (9): 1153-1159.

74. **KACZOROWSKA R. 1999.** *Aktywność fosfatazy kwaśnej i alkalicznej w meliorowanych torfowiskach bagna Wizna.* Archiwum Ochrony Środowiska. 25 (3): 111-121.

75. **KALEMBASA D., TKACZUK K., FELCZYŃSKI K. 2005.** *Wpływ wieloletniego stosowania obornika i nawożenia mineralnego na zawartość wybranych makroelementów w glebie.* Fragm. Agronom., 22, 1 (85):111-116.

76. **KALEMBASA S., AMBERGER A., SZYMANOWICZ B., GODLEWSKA A. 1995.** *Zawartość organicznych i nieorganicznych związków siarki i fosforu po wieloletnim zróżnicowanym nawożeniu.* Zesz. Probl. Post. Nauk Roln., 421a:173-179.

77. **KALEMBASA S. GODLEWSKA A. 2006.** *Plonowanie i zawartość makroskładników w rajgrasie włoskim pod wpływem stosowania mieszaniny torfu niskiego i osadów z popłuczyn farb.* Zesz. Probl. Post. Nauk Roln., 512: 287-296.

78. **KANDELER E., TASCHERKO D., SPIEGEL H. 1999.** *Long-term monitoring of microbial biomass, N-mineralisation and enzyme activities of a Chernozem under different tillage management.* Biol. Fertil. Soils, 28: 343-351.

79. **KARCZMARCZYK S., KOSTAŃSKA M., ŚCIEŻKO D., ROY M. 1993.** *Przebieg niektórych procesów fotosyntetycznych oraz plonowanie pszenicy ozimej i pszenżyta pod wpływem deszczowania i nawożenia azotem. (II). Aktywność niektórych enzymów oraz plonowanie pszenicy ozimej i pszenżyta.* Acta Agrobot., 46 (1): 31-38.

80. **KIELISZEWSKA – ROKICKA B. 2001.** *Enzymy glebowe i ich znaczenie w badaniach aktywności mikrobiologicznej gleby.* [w] H. Dahm, A. Pokojska – Burdziej (red.): Drobnoustroje środowiska glebowego. Toruń: 37-47.

81. **KŁYSZEJKO – STEFANOWICZ L. 1999.** *Ćwiczenia z biochemii.* PWN, Warszawa, ss. 556-558.

82. **KNAPOWSKI T., MURAWSKA B., KLUPCZYŃSKI Z., RALCEWICZ M. 2001.** *Uproszczony bilans fosforu w zależności od zróżnicowanego nawożenia azotem pszenicy ozimej.* Prace Nauk. AE Wrocław, Chemia, 888: 238-245.

83. **KOBUS J. 1995.** *Biologiczne procesy a kształtowanie żyzności gleby.* Zesz. Probl. Post. Nauk Roln., 421 a: 209-219.

84. **KOŁODZIEJCZYK M., SZMIGIEL A., SOBOL Z., BARAN D. 2005.** *Wpływ zróżnicowanego nawożenia na właściwości gleby lekkiej i ciężkiej.* Fragm. Agronom., 1 (85): 446-455.

85. **KONDRATOWICZ-MACIEJEWSKA K., GONET S.S. 2005.** *Effect of fertilization and crop rotation on humus status in soil.* Humic Subst. Ecosyst., 6:89-93.

86. **KOPER J. 1990.** *Glebowy fosfor organiczny na tle zawartości C, N i S w warunkach statycznego wieloletniego doświadczenia nawozowego.* Roczn. Glebozn., 41(3/4): 135-145.

87. **KOPER J. 1996.** *Zmiany zawartości fosforu związków organicznych i jego frakcji w glebie wywołane wieloletnim nawożeniem organicznym.* ATR Bydgoszcz, Rozprawy nr 75:102.

88. **KOPER J., GŁAŻEWSKA-MANIEWSKA R., PIOTROWSKA A. 2003.** *Występowanie bakterii „fosforowych" i aktywność fosfataz w glebie pod uprawą owsa siewnego (Avena sativa* L.). Zesz. Probl. Post. Nauk Roln., 492:155-160.

89. **KRAUZE A. 1995.** *Stan żyzności gleby w warunkach intensywnego i ekstensywnego nawożenia roślin w 4-polowym zmianowaniu.* Zesz. Probl. Post. Nauk Roln., 421 a: 221-232.

90. **KRÄMER S., GREEN D.M. 2000.** *Acid and alkaline phosphatase dynamics and their relationship to soil microclimate in a semiarid woodland.* Soil Biol. Biochem., 32: 179-188.

91. **KRISTAPONYTE I. 2005.** *Effect of fertilisation systems on the balance of plant nutrients and soil agrochemical properties.* Agron. Res., 3(1), 45-54.

92. **KRUCZEK A., SULEWSKA H. 2005.** *Wpływ sposobu stosowania nawozów azotowych i nawozu wieloskładnikowego na gromadzenie składników mineralnych w początkowym okresie wzrostu kukurydzy.* Acta. Agrophys., 6 (3): 677-688.

93. **KRZYWY J., JONIAK K., KRZYWY E., KRZYWY-GAWROŃSKA E. 2006.** *Wpływ kompostów i nawozów mineralnych na aktywność dehydrogenazy, fosfatazy kwaśnej i zasadowej oraz ureazy w glebie przed siewem i po zbiorze rzepaku jarego.* Zesz. Probl. Post. Nauk Roln., 512: 381-389.

94. **KUCHARSKI J. 1992.** *Wpływ wieloletniego nawożenia gnojowicą na biologiczne właściwości gleby.* Mat. Konf. Nauk. Nawozy Organiczne PAN-AR Szczecin, 2: 24-29.

95. **KUCHARSKI J. 1997.** *Relacje miedzy aktywnością enzymów a żyznością gleby.* W: Drobnoustroje w środowisku, występowanie aktywność i znaczenie. AR Kraków, 327-347.

96. **KUCHARSKI J., NIEWOLAK T. 1997.** *Wpływ systemu uprawy roślin zbożowych na aktywność enzymów glebowych.* W: Drobnoustroje w środowisku, występowanie aktywność i znaczenie. AR Kraków, 349-356.

97. **KUCHARSKI J., NOWICKI J., WANIC M. 1996.** *Wpływ różnego udziału roślin zbożowych w płodozmianie na aktywność enzymatyczną gleby.* Zesz. Nauk. ART Olsztyn, 63: 77-83.

98. **KUCHARSKI J., WAŁDOWSKA E. 2001.** *Mikrobiologiczne skutki wieloletniego nawożenia gnojowicą.* Mat. Konf. Nauk. „Kształtowanie Środowiska" UW-M, Olsztyn, 97-98.

99. **KUCHARSKI J., JASTRZĘBSKA E., WYSZKOWSKA J. 2006.** *Contamination of soil with hard coal ash as modifier of physicochemical and biological properties of soil* **EJPAU**, Agronomy, 9 (1). *http://www.ejpau.media.pl/volume9/issue1/art-35.html*

100. **KUPERMAN R.G., CARREIRI M.M. 1997.** *Soil heavy metal concentration, microbial biomass and enzyme activities in a contaminated grassland ecosystem.* Soil Biol. Biochem., 29: 179-190.

101. **LEE R.B. 1988.** *Phosphate influx and extra cellular phosphatase activity in barley roots and rose cells.* New Phytol., 109: 141-148.

102. **LITYŃSKI T., JURKOWSKA H., GORLACH E. 1976.** *Analiza chemiczno-rolnicza.* PWN, Warszawa: s.: 149.

103. **LÓPES – BUCIO J., CRUZ – RAMIREZ A., HERRERA – ESTRELLA L. 2003.** *The role of nutrient availability in regulation root architecture.* Curr. Opin. Plant Biol., 6: 280-287.

104. **ŁABĘTOWICZ J. 2000.** *Współczesne poglądy na żyzność i metody testowania gleb.* Fertilizers and Fertilization, 3:106-130.

105. **ŁABĘTOWICZ J., KORC M., GUTOWSKA A. 1998(a).** *Ocena skutków niezrównoważonego nawożenia dla zasobów fosforu glebowego w trwałym doświadczeniu nawozowym.* Prace Nauk. AE Wrocław, Chemia. Związki fosforu w chemii, rolnictwie i medycynie, 729: 259-266.

106. **ŁABĘTOWICZ J., KORC M., SZULC W. 1998(b).** *Zmiany odporności gleb lekkich na zakwaszenie w zróżnicowanych warunkach nawozowych.* Zesz. Probl. Post. Nauk Roln., 456: 159-164.

107. **ŁABĘTOWICZ J., KUSZELEWSKI L., KORC M., SZULC W. 1999.** *Znaczenie nawożenia organicznego dla trwałości plonów i równowagi jonowej gleby lekkiej.* Zesz. Probl. Post. Nauk Roln., 465: 123-134.

108. **ŁABĘTOWICZ J., RUTKOWSKA B. 2001.** *Czynniki kształtujące stężenie fosforu w roztworze glebowym gleb rolniczych.* Polski. Prace Nauk. AE Wrocław. Chemia. Związki fosforu w chemii, rolnictwie i medycynie, 888: 151-159.

109. **ŁABUDA ST. Z., MAZURKIEWICZ I., MAĆKOWIAK CZ. 2003.** *Pierwiastki zmiennowartościowe w glebie pod wpływem nawożenia substancją organiczną i azotem w doświadczeniu polowym.* Zesz. Probl. Post. Nauk Roln., 493: 409-420.

110. **MACHADO C.T. de T., FURLANI A.M.C. 2004.** *Root phosphatase activity, plant growth and phosphorus accumulation of maize genotypes.* Sci. Agric.,61 (2): 216-223.

111. **MAĆKOWIAK CZ., ŻEBROWSKI J. 1999.** *Wpływ nawożenia obornikiem i doboru roślin w zmianowaniu na zawartość w glebie węgla organicznego i azotu ogólnego.* Zesz. Probl. Post. Nauk Roln., 465: 341-351.

112. **Maćkowiak Cz., Żebrowski J. 2000.** *Skład chemiczny obornika w Polsce.* Fertilizers and Fertilization, 4: 119-130.

113. **Malinowska E., Kalembasa D., Jeżewski S. 2006.** *Wpływ dawek azotu na plon i zawartość makroelementów w trawie Miscanthus sacchariflorus uprawianej w doświadczeniu wazonowym.* Zesz. Probl. Post. Nauk Roln., 512: 403-409.

114. **Marcote I., Hernandez T., Garcia C., Polo A. 2001.** *Influence of one or two successive annual applications of organic fertilizers on the enzyme activity of a soil under barley cultivation* Biores. Technol., 79: 147-154.

115. **Martyniuk S. stachyra A., Wróblewska B., Zięba S. 1997.** *Związki pomiędzy mikrobiologicznymi i enzymatycznymi właściwościami gleby a plonami ziemniaków.* Drobnoustroje w środowisku, występowanie aktywność i znaczenie. AR Kraków, 439-445.

116. **Martyniuk S., Zięba S., Maćkowiak Cz. 1998.** *Zależność pomiędzy aktywnością enzymatyczną gleby a plonami jęczmienia jarego w wieloletnim doświadczeniu polowym.* Zesz. Nauk. AR Wrocław, 332: 31-37.

117. **Mazurkiewicz I. 2002.** *Potencjał redoks w glebie jako wskaźnik chemiczno-rolniczy w badaniach agrosystemu.* Annales UMCS, 57: 17-24.

118. **McDowell R. W., Monaghan R. M. 2002.** *The potential for phosphorus loss in relation to nitrogen fertiliser application and cultivation.* New Zealand J. Agric. Res., 45: 245–253.

119. **McKercher R.B., Anderson G. 1968.** *Content of inositol penta- and hexa phosphates in some Canadian soils.* J. Soil Sci., 19:47-55.

120. **Mehta N.C., Legg J.O., Goring C.A., Black C.A. 1954.** *Determination of organic phosphorus in soils.* Soil Sci Soc. Amer. Proc., 44: 443-449.

121. **Mercik S., Moskal S., Stępień W., Turemka E. 1998.** *Losy fosforu z superfosfatu i z obornika w zależności od zmianowań w wieloletnich doświadczeniach nawozowych.* Prace Nauk. AE Wrocław. Chemia. Związki fosforu w chemii, rolnictwie i medycynie, 792: 297-308.

122. **Mercik S., Stępień W., Lenart S. 2000.** *Żyzność gleb w trzech systemach nawożenia: mineralnym, organicznym i organiczno-mineralnym w doświadczeniach wieloletnich. Cz. I. Właściwości fizyczne i fizyko-chemiczne gleb.* Folia Univ. Agric. Stetin, 211, Agricultura, 84: 311-316.

123. **Michałojć Z.M. 2006.** *Wpływ zróżnicowanego nawożenia azotem oraz terminu zbioru na plonowanie i skład chemiczny sałaty.* Zesz. Probl. Post. Nauk Roln., 513: 277-283.

124. **Mocarski N. 2004.** *Porównanie zawartości fosforu przyswajalnego oznaczonego metodami Egnera-Riehma i Houby w glebie użytkowanej rolniczo w trzech systemach uprawy.* Zesz. Probl. Post. Nauk Roln., 499: 271-278.

125. **Mocek A., Owczarzak W., Gilewska M., Rybczyński P. 2004.** *Wybrane właściwości fizyczno-chemiczne gleb wytworzonych na zwałowisku wewnętrznym odkrywki Pątnów pod monokulturą pszenicy i wpływem zróżnicowanych dawek nawożenia mineralnego* Ann. UMCS, 59 (4): 1577–1585.

126. **Morel C., Tunney H., Plénet D., Pellerin S. 2000.** *Transfer of phosphate ions between soil and solution: Perspectives in soil testing.* J. Environ.Qual., 29: 50-59.

127. **Moskal S., Mercik S., Turemka E., Stępień W. 1999.** *Bilans fosforu nawozowego w wieloletnich doświadczeniach polowych w Skierniewicach.* Zesz. Probl. Post. Nauk Roln., 465: 61-69.

128. **Myśków W., Stachyra A., Zięba S., Masiak D. 1996.** *Aktywność biologiczna gleby jako wskaźnik jej żyzności i urodzajności.* Roczn. Glebozn., 47, 1/2: 89-99.

129. **Nagaraja M.S., Parama V.R.R., Srinivasamurthy C.A., Siddaramappa R., Suseela–Devi L., Lalitha B.S. 1998.** *Soil biological processes: Seasonal changes in natural and man made ecosystems.* Proc. 16th Word Congres of Soil Sci., Montpellier, France (CD.ROM)

130. **Nannipieri P., Grego S., Ceccanti B. 1990.** *Ecological significance of the biological activity in soil* . Soil Biochem., 6: 293-355.

131. **Nannipieri P., Sequi P., Fusi P. 1996.** *Humus and enzyme activity.* W: Piccolo A. (red.): Humic substances in terrestrial ecosystems., Elsevier, Amsterdam, ss.293-237.

132. **Nash D.M., Halliwell D.J. 1999.** *Fertilizers and phosphorus loss from productive grazing systems.* Austr. J.Soil Res., 37: 403-429.

133. **Nowacki W. 2005. (Opracowanie zbiorowe).** *Metodyka integrowanej produkcji ziemniaków.* PIORiN, *http://.piorin.gov.pl*

134. **Nowak J., Tyrakowska-Bielec U., Durlej J. 2000.** *Wpływ zróżnicowanych dawek nawozów azotowych na aktywność fosfomonoesteraz glebowych.* Folia Univ. Stetin. Agricultura 209 (83): 131-138.

135. **NOWAK J., KĄKLEWSKI K. 2003.** *Wpływ różnych warunków przechowywania gleby na zmiany aktywności wybranych enzymów.* Zesz. Probl. Post. Nauk. Roln., 492: 225-232.

136. **NOWAK J., ŚNIEG B., SZYMCZAK J. 2003.** *Phosphatase activity and ATP content in soil and plant related to copper (II) nitrate (V) concentration in soil.* EJPAU, Environmental Development, 6 (2).
http://www.ejpau.media.pl/series/volume6/issue2/environment/art-05.html

137. **NOWOTNY –MIECZYŃSKA A. 1976.** *Fizjologia mineralnego żywienia roślin.* PWRiL, Warszawa, ss: 38-125.

138. **OEHL F., FROSSARD E., FLIESSBACH A., DUBOIS D., OBERSON A. 2004.** *Basal organic phosphorus mineralization in soils under different farming systems.* Soil Biol. Biochem., 36: 667–675.

139. **OLCZAK M. 1996.** *Kwaśne fosfatazy roślin wyższych.* Wiad. Bot., 40 (2): 9-51.

140. **PARHAM J.A., DENG S.P., RAUN W.R., JOHNSON G.V. 2002.** *Long-term cattle manure application in soil. I. Effect on soil phosphorus levels, microbial biomass C, and dehydrogenase and phosphatase activities.* Biol. Fertil. Soils, 35 (5): 328-337.

141. **PAUL E.A., CLARK F.E. 2000.** *Mikrobiologia i biochemia gleb.* WUMC-S Lublin, ss: 350.

142. **PAWLUCZUK Z. 1990.** *Zmiany aktywności enzymatycznej gleby pod wpływem roślin uprawianych w monokulturze.* Zesz. Probl. Post. Nauk Roln., 386: 48-53.

143. **PHIRI S., E. BARRIOS E., RAO I.M., SINGH B.R. 2001.** *Changes in soil organic matter and phosphorus fractions under planted fallows and a crop rotation system on a Colombian volcanic-ash soil.* Plant Soil, 231: 211–223.

144. **PIOTROWSKA A., KOPER J. 2006.** *Manganese content and soil hydrolases activity as affected by differentiated fertilization.* Ecol. Chem. Eng., 13(9): 954-958.

145. **PŁAZA A. 2004.** *Skład chemiczny bulw ziemniaka jadalnego w warunkach zróżnicowanego nawożenia organicznego.* Ann. UMCS, 59 (3): 1327-1334.

146. **PN-R-04023. 1996.** Marzec. *Analiza chemiczno-rolnicza gleby - Oznaczanie zawartości przyswajalnego fosforu w glebach mineralnych.* Polski Komitet Normalizacji.

147. **PN-R-04033. 1998.** *Gleby i utwory mineralne. Podział na frakcje i grupy granulometryczne.* Polski Komitet Normalizacji.

148. **Podleśna A., Winiarski A. 2002.** *Wykorzystanie azotu i fosforu z USP w porównaniu do fosforanu dwuamonowego i superfosfatu prostego oraz mocznika.* Fertilizers and Fertilization, 4 (13): 74-82.

149. **Potarzycki J. 2003.** *Fosfor w glebie.* Pierwiastki w środowisku. Fosfor. J. Elementol. Suppl.,:19-32.

150. **Potarzycki J. 2006.** *Przemiany związków fosforu w glebie w zależności od systemu nawożenia w przeszłości.* Zesz. Probl. Post. Nauk Roln., 512: 465-473.

151. **Potarzycki J., Grzebisz W. 2001.** *Dynamika uwalniania fosforu wodnorozpuszczalnego z gleb nawożonych w przeszłości gnojowicą i nawozami mineralnymi (Eksperyment Inkubacyjny).* Chemia. Związki fosforu w chemii, rolnictwie i medycynie. Prace Nauk. AE Wrocław, 888: 190-196.

152. **Puła J., Łabza T. 2004a.** *Wpływ nawożenia organicznego na zawartość składników mineralnych w warstwie ornej gleby lekkiej.* Ann. UMCS, 59 (3): 1505–1511.

153. **Puła J., Łabza T. 2004b.** *Wpływ nawożenia organicznego na zawartość i skład frakcyjny związków próchnicznych gleby lekkiej.* Ann. UMCS, 59 (3): 1513-1519.

154. **Rabikowska B. 1999.** *Oddziaływanie długoletniego nawożenia obornikiem i azotem na plonowanie i zawartość podstawowych składników w kukurydzy.* Zesz. Probl. Post. Nauk Roln., 465: 219-231.

155. **Rabikowska B., Piszcz U. 1994.** *Wpływ nawożenia organicznego na plonowanie i pobieranie fosforu przez kukurydzę.* Prace Nauk. AE Wrocław, 677: 87-98.

156. **Rabikowska B., Piszcz U. 1998.** *Dynamika nagromadzenia fosforu przez pszenicę ozimą w warunkach trwałego zróżnicowanego nawożenia obornikiem i azotem.* Prace Nauk. AE Wrocław. Chemia, 792:308-316.

157. **Rabikowska B., Piszcz U. 2000.** *Zakres i zasięg zmian odczynu i właściwości sorpcyjnych w glebie płowej pod wpływem długotrwałego nawożenia obornikiem i azotem.* Zesz. Nauk., AR Szczecin 84: 422-428.

158. **Rabikowska B., Piszcz U. 2002.** *Bilans fosforu w warunkach długoletniego zróżnicowanego nawożenia obornikiem i azotem mineralnym.* Fertilizers and Fertilization, 4 (13): 149-159.

159. **Rakowski D. 2003.** *Wpływ deszczowania i nawożenia mineralnego na plonowanie wybranych odmian pszenicy jarej i pszenżyta jarego uprawianych na glebie lekkiej. Cz. III. Aktywność procesów fizjologicznych w roślinach.* Acta Sci. Pol., Agricultura 2 (2):33-42.

160. **RICHARDSON A.E., HADOBAS, P.A., HAYNES, J.E. 2000.** *Acid phosphomonoesterase and phytase activities of wheat (Triticum aestivum* L.*) roots and utilization of organic phosphorus substrates by seedling grown in sterile culture.* Plant Cell Environ., 23: 397-405.

161. **RUSSEL S. 2005.** *Znaczenie badań enzymów w środowisku glebowym.* Acta Agrophys., Rozprawy i Monografie, 3: 5-9.

162. **SAPEK A., SAPEK B. 2002.** *Obieg i bilans fosforu w łańcuchu pokarmowym człowieka w Polsce* . Fertilizers and Fertilization, 4 (13): 105-123.

163. **SARAPATKA B., KRSKOVA M. 1997.** *Interactions between phosphatase activity and soil characteristics from some locations in the Czech Republic.* Plant Production, 43: 415-419.

164. **SARAPATKA B., DUDOVA L., KRSKOVA M. 2004.** *Effect of pH and phosphate supply on acid phosphatase activity in cereal roots.* Biol. Bratislava, 59 (1): 127-131.

165. **SAROOP S., CHANDA S.V. SINGH Y.D. 1999.** *Biochemical changes associated with Brassica juncea seed development. IV. Acid and alkaline phosphatases.* J. Plant Growth Regul., 19: 67-72.

166. **SĄDEJ W. 2000.** *Badania nad przemianami fosforu w glebach i jego wykorzystanie przez rośliny uprawne w warunkach zróżnicowanego nawożenia.* Rozprawy i Monografie, ART Olsztyn. 33, 1-78.

167. **SCHNEIDER K., TURRION M.B., GRIERSON P.F., GALLARDO J.F. 2001.** *Phosphatase activity, microbial phosphorus and fine root growth in forest soils in the Sierra de Gata western central Spain.* Biol. Fertil. Soils, 34: 151-155.

168. **SIENKIEWICZ S., KRZEBIETKE S., WOJNOWSKA T. 2004 (a).** *Fizykochemiczne właściwości gleby w warunkach wieloletniego nawożenia organiczno-mineralnego i mineralnego* . Ann. UMCS, 59 (1): 407-413.

169. **SIENKIEWICZ S., KRZEBIETKE S., WIERZBOWSKA J., CZAPLA J. 2004 (b).** *Zmiany chemiczne właściwości gleby w zależności od systemu nawożenia.* Ann. UMCS, 59 (1): 415-422.

170. **SIUDA W. 2001.** *Enzymatyczna regeneracja ortofosforanu w wodach jezior.* Post. Mikrobiol., 40 (2): 187-217.

171. **SMAGACZ J. 2000.** *Rola zmianowania w rolnictwie zrównoważonym.* Pam. Puł., 120 (2): 411-414.

172. **SMOLIK B., NOWAK J. 2003.** *Zależność między aktywnością fosfataz w glebie i pszenicy oraz ilością dodanej miedzi do podłoża.* Zesz. Probl. Post. Nauk Roln., 492: 321-327.

173. **SOIL SURVEY STAFF. 1998.** *Keys to Soil Taxonomy.* 8th ed. USDA NRCS. US. Govt. Printing Office, Washington DC.

174. **SOSULSKI T., STĘPIEŃ M., SZARA E., MERCIK S. 2005.** *Zawartość azotu w glebie oraz bilans tego składnika w doświadczeniach wieloletnich.* Fragm. Agronom., 22, 1(85): 264-273.

175. **SPEIR T.W., COWLING J.C. 1991.** *Phosphatase activities of pasture plants and soils: relationship with plant productivity and soil P fertility indices.* Biol. Fertil. Soils, 12: 189-194.

176. **STANISŁAWSKA-GLUBIAK E., KORZENIOWSKA J. 2005.** *Wpływ różnych systemów nawożenia na zawartość węgla organicznego w glebie w doświadczeniu 32-letnim.* Fragm. Agronom., 22, 1(85): 274-282.

177. **STEINECK S., JAKOBSSON C., CARLSON G. 2000.** *Phosphorus - application, utilization by crops and accumulation in agricultural soils.* Falenty IMUZ Publisher: 138-150.

178. **STĘPIEŃ A. 2000.** *Zmiany chemicznych właściwości gleby pod wpływem różnych sposobów nawożenia w zmianowaniu.* Zesz. Nauk. AR Szczecin 211, Agricultura, 84: 459-464.

179. **STĘPIEŃ M., MERCIK S., STĘPIEŃ W. 2002.** *Regeneracja gleb ubogich w próchnicę oraz bardzo kwaśnych i wyczerpanych z fosforu przy pomocy obornika.* Fertilizers and Fertilization, 4 (13): 211-219.

180. **SPYCHAJ-FABISIAK E., MURAWSKA B., JANOWIAK B., 2003.** *Zmiany podstawowych wskaźników zakwaszenia gleb i zawartości przyswajalnych form fosforu pod wpływem czynników antropogenicznych.* Zesz. Probl. Post. Nauk Roln., 492: 347-355.

181. **SYSTEMATYKA GLEB POLSKI. PTG. 1989.** Wydanie czwarte. Rocz. Glebozn. PWN, Warszawa, 40,3/4, 45-85.

182. **SZARA E., MERCIK S., SOSULSKI T. 2005.** *Formy fosforu w doświadczeniach wieloletnich.* Fragm. Agronom. 22, 1 (85): 298-309.

183. **SZEWCZUK CZ., STĘPNIAK M., SUGIER D. 2002.** *Zawartość wybranych związków organicznych i mineralnych w części nadziemnej pokrzywy zwyczajnej (Urtica dioica*

L.) *w zależności od fazy rozwojowej zebranych roślin.* Acta Sci. Pol. Agricultura, 1(2): 163-169.

184. **Szewczuk Cz., Mazur M. 2004.** *Wpływ zróżnicowanych dawek nawozów azotowych na skład chemiczny pokrzywy zwyczajnej (Urtica dioica* L.*) zbieranej w trzech fazach rozwojowych. Cz. II zawartość składników mineralnych.* Acta. Sci. Pol. Agricultura, 3(1): 239-248.

185. **Szymańska M., Łabętowicz J., Korc M. 2005.** *Ocena czynników nawozowych w kształtowaniu form fosforu w glebie w warunkach trwałego doświadczenia nawozowego. Część I. Fosfor przyswajalny.* Fragm. Agronom. 22, 1 (85): 310-218.

186. **Tabatabai M.A., Bremner J.M. 1969.** *Use of p–nitrophenol phosphate for assay of soil phosphatase activity.* Soil Biol. Bioch., 1: 301-307.

187. **Tarafdar J.C., Classen N. 1988.** *Organic phosphorus compounds as a phosphorus source for higher plants through the activity of phosphatase produced by plant roots and microorganisms.* Biol. Fertil. Soils, 5: 308-312.

188. **Ticconi C. A., Abel S. 2004.** *Short on phosphate: plant surveillance and countermeasures.* Trends Plant Sci., 9 (11): 548-555.

189. **Tkaczyk P. 2002.** *Efekty wapnowania, nawożenia azotem i fosforem gleby bardzo kwaśnej cz. I. mineralne frakcje i ruchome formy fosforu.* Acta Sci. Pol. Agricultura, 1(2): 43-55.

190. **Tkaczyk P., Chwil S. 2004.** *Formy i frakcje fosforu mineralnego w glebie nawożonej nawozami mineralnymi i obornikiem.* Ann. UMCS, 59 (2): 599–606.

191. **Tomscha J. L., Trull M. C., Deikman J., Lynch J. P., Guiltinan M. J. 2004.** *Phosphatase under-producer mutants have altered phosphorus relations.* Plant Physiol., 135: 334–345.

192. **Trawczyński C. 2002.** *Wykorzystanie fosforu przez ziemniak w warunkach zróżnicowanego nawożenia.* Fertilizers and Fertilization, 4 (13): 228-237.

193. **Tujaka A. 2002.** *Wpływ nawożenia na zawartość i rozkład frakcji fosforu w profilu glebowym.* Fertilizers and Fertilization, 4 (13): 238-246.

194. **Wacławowicz R., Zimny L., Malak D. 2005.** *Dynamika zmian właściwości chemicznych gleby średniej pod wpływem różnych systemów nawożenia buraka cukrowego.* Fragm. Agronom., 22, 1(85): 560-612.

195. **Weaver D.M., Ritchie G.S.P. 1994.** *Phosphorus leaching in soils amended with piggery effluent or lime residues from effluent treatment.* Environ. Pollut., 84: 227-235.

196. **WITTMANN CH., KÄHKÖNEN M.A., ILVESNIEMI H., KUROLA J., SALKINOJA-SALONEN M.S. 2004.** *Areal activities and stratification of hydrolytic enzymes involved in the biochemical cycles of carbon, nitrogen, sulphur and phosphorus in podsolized boreal forest soils* Soil. Biol. Bioch., 36: 425-433.

197. **WOJTASIK D. 2004.** *Wpływ deszczowania i nawożenia mineralnego na plonowanie jęczmienia browarnego i pastewnego uprawianego na glebie lekkiej, Cz. I. Wzrost i rozwój roślin.* Acta Sci. Pol. Agricult., 3 (2), 119-129.

198. **WYSZOŁMIRSKA E., SUTUŁA E., CIERESZKO I. 2006.** *Wpływ niedoboru fosforu na wzrost dwóch odmian owsa i aktywność kwaśnych fosfataz.* Zesz. Probl. Post. Nauk Roln., 509: 161-166.

199. **VERMA S., SUBEHIA S.K. SHARMA S.P. 2005** *Phosphorus fractions in an acid soil continuously fertilized with mineral and organic fertilizers.* Biol. Fertil. Soils, 41: 295–300.

200. **YADAV R.S., TARAFDAR J.C. 2001**. *Influence of organic and inorganic phosphorus supply on the maximum secretion of acid phosphatase by plant.* Biol. Fertil. Soils, 34: 140-143.

201. **ZIMNY L., KUC P. 2005.** *Zawartość podstawowych składników pokarmowych w buraku cukrowym w różnych systemach nawożenia w drugiej rotacji płodozmianu.* Ann. UMCS, 60:185-194.

Biblioteka Główna UTP w Bydgoszczy
D 316