

Ocena przydatności testów chemicznych do opisu stanu fosforowego gleb uprawnych

Urszula Piszcz

**Ocena przydatności
testów chemicznych
do opisu stanu fosforowego
gleb uprawnych**



Wrocław 2013

Autor
Urszula Piszcz

Opiniodawcy:
prof. dr hab. Wiesław Bednarek
dr hab. Stanisław Sienkiewicz, prof. nadzw.

Redaktor merytoryczny
prof. dr hab. inż. Zofia Spiak

Opracowanie redakcyjne i korekta
Elżbieta Winiarska-Grabosz

Łamanie i projekt okładki
Paweł Wójcik

Monografie CLXVI

© Copyright by Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, Wrocław 2013

ISSN 2083-5531
ISBN 978-83-7717-145-5

WYDAWNICTWO UNIWERSYTETU PRZYRODNICZEGO WE WROCŁAWIU
Redaktor Naczelny – prof. dr hab. inż. Andrzej Kotecki
ul. Sopocka 23, 50–344 Wrocław, tel. 71 328–12–77
e-mail: wyd@up.wroc.pl

Nakład 100 + 16 egz. Ark. wyd. 6,5. Ark. druk. 7,75
Druk i oprawa: EXPOL, P. Rybiński, J. Dąbek, Spółka Jawna
ul. Brzeska 4, 87–800 Włocławek

Spis treści

1. Wstęp i cel pracy	7
2. Przegląd literatury	9
2.1. Fosfor w roślinach i glebach	9
2.2. Agrochemia fosforu i wskaźniki stanu fosforowego gleb	11
2.3. Metody oceny stanu fosforowego gleb	12
3. Metody badań	15
3.1. Badania terenowe	15
3.2. Doświadczenie polowe	16
3.3. Doświadczenie mikropoletkowe	18
3.4. Doświadczenie wazonowe	20
3.5. Analizy roślin i gleb	23
3.6. Technika opracowania wyników	26
4. Omówienie wyników badań	27
4.1. Badania terenowe	27
4.1.1. Gleby pól uprawnych południowo-zachodniej Polski	27
Właściwości fizyczno-chemiczne	27
Stan fosforowy	31
4.1.2. Gleby pól uprawnych okolic Wrocławia	47
Właściwości fizyczno-chemiczne	47
Stan fosforowy	49
4.2. Doświadczenie polowe	57
4.2.1. Gleby pola doświadczalnego	57
Właściwości fizyczno-chemiczne gleb	57
Stan fosforowy	66
4.2.2. Roślina pola doświadczalnego	84
Plonowanie pszenicy ozimej	84
Zawartość azotu i fosforu w ziarnie oraz słomie pszenicy ozimej	86
Pobranie azotu i fosforu przez pszenicę ozimą	89
4.3. Doświadczenie mikropoletkowe	92
Właściwości fizyczno-chemiczne	92
Stan fosforowy	93
Plonowanie roślin	95

4.4. Doświadczenie wazonowe	99
Plonowanie rośliny doświadczalnej	100
Zawartość i pobranie fosforu	101
Stan fosforowy	104
5. Wnioski.	111
6. Piśmiennictwo.	113

1. Wstęp i cel pracy

Fosfor jest jednym ze składników pokarmowych, który ze względu na wyczerpywanie się zasobów surowcowych wykorzystywanych do produkcji nawozów coraz częściej będzie limitował plonowanie roślin. Całkowite wyczerpanie nieodnawialnych źródeł fosforytów szacowane jest w zależności od źródła na około 50–100 lat. Wagę tego zagadnienia zwiększa fakt, że obszary gleb o zbyt niskiej zasobności w fosfor, które zawierają ten składnik w ilości niewystarczającej na optymalne zaopatrzenie roślin, szacowane są na około połowę światowych gruntów rolnych. Jest to związane z niewielką naturalną zasobnością w ten składnik gleb, powstałych zarówno ze skał magmowych, jak i osadowych, a także z powszechnym występowaniem niekorzystnego układu właściwości fizyczno-chemicznych gleb, utrudniających migrację fosforanów do korzeni roślin. Dużą rolę odgrywa również reaktywność chemiczna fosforu, skutkująca silnym i trwałym wiązaniem w glebie i przechodzeniem tego składnika do form trudno rozpuszczalnych, niedostępnych dla roślin. Możliwość pobierania fosforu przez rośliny jako jednego z głównych składników pokarmowych decydujących o ilości i jakości plonów odgrywa ważną rolę w zapewnieniu bezpieczeństwa żywnościowego ludzi i zwierząt, nie tylko wybranych regionów, ale i całego świata.

Z tego powodu w wielu ośrodkach podejmowane są interdyscyplinarne badania mające na celu rozwiązanie problemu deficytu tego pierwiastka. Proponuje się, aby efektywność wykorzystania fosforu zwiększyć między innymi poprzez selekcjonowanie odmian roślin wysoko plonujących, a zarazem niewrażliwych na niską zasobność gleb w ten składnik. Trwają też próby identyfikowania genów odpowiadających za efektywność wykorzystania fosforu, które można wykorzystać do modyfikacji roślin uprawnych, tak aby uzyskać odmiany o większej wydajności pomimo deficytu tego składnika w podłożu. Genetyczna poprawa zaopatrzenia roślin może być uzyskana poprzez aktywizację wzrostu korzeni, zwiększenie ich aktywności biologicznej i chemicznej oraz poprawę odporności roślin na stresy, głównie abiotyczne [Lambers i in. 2006].

Możliwości poprawy zaopatrzenia roślin w fosfor upatruje się również w wykorzystaniu na szerszą skalę alternatywnych źródeł tego składnika. Znaczne zasoby fosforu zgromadzone są bowiem w odpadach różnego pochodzenia i mogą stanowić jego cenne źródło w przypadku zastosowania ich w rolnictwie jako substancje poprawiające właściwości gleby lub wspomagające wzrost roślin. Trudności w prawidłowym wykorzystaniu tych substancji polegają jednak na tym, że zawarte w nich składniki (w tym fosfor) występują w formach nieprzyswajalnych dla roślin, mogą również zawierać związki i pierwiastki tok-

syczne dla roślin. Najbardziej przydatna do tego celu wydaje się być metoda polegająca na takiej modyfikacji właściwości gleb, która ułatwić będzie przechodzenie fosforu zawartego w glebie w formy dostępne dla roślin.

O procesach wpływających na zwiększenie przyswajalności tego składnika przez rośliny decyduje szereg procesów fizyczno-chemicznych i biologicznych, takich jak: rozpuszczanie, strącanie, sorpcja i desorpcja oraz mineralizacja i immobilizacja. Procesy te, decydując o kierunku przemian związków fosforowych w glebie, zależą od szeregu jej właściwości, spośród których najważniejszymi wydają się być: odczyn, zawartość substancji organicznej oraz obecność innych składników pokarmowych. Utrzymanie prawidłowego odczynu gleby, odpowiedniego poziomu substancji organicznej oraz wystarczającej ilości składników pokarmowych w glebie wymaga prawidłowej uprawy. Niezbędne staje się systematyczne kontrolowanie stanu zakwaszenia gleb, bilansowanie materii organicznej oraz składników mineralnych [Blake i in. 2000]. W przypadku niewłaściwego gospodarowania może nastąpić zaburzenie równowagi w środowisku, prowadząc do strat fosforu na drodze spływu powierzchniowego czy wymywania i powodować wzbogacenie wód w ten składnik, co skutkuje biodegradacją zbiorników wodnych [Smith i in. 2001a,b].

Poszukiwanie sposobów zwiększania wykorzystania fosforu przez rośliny jest więc uzasadnione zarówno z agrochemicznego punktu widzenia, jak i ekonomicznego oraz ochrony środowiska. W celu ulepszenia gospodarowania fosforem bardzo ważną rzeczą, przy złożoności przemian i bogactwie form tego składnika, jest poznanie jego aktualnego stanu w glebie. W literaturze przedmiotu szeroko dyskutuje się o metodach oceny tego stanu, przedstawiając zalety jednych z nich i trudności z wykorzystaniem innych. Wielu autorów pracujących nad tym problemem sugeruje, że sukces stosowania metody zależy od regionu geograficznego, rodzaju gleb i prowadzonej na danym terenie gospodarki fosforem. Celem badań była więc ocena przydatności kilku testów chemicznych do opisu stanu fosforowego gleb uprawnych o różnej historii nawożenia. W badaniach wykorzystano:

- glebę pochodzącą z wieloletniego, statycznego doświadczenia polowego o znanej od 1974 r. historii nawożenia,
- gleby z rozległego terenu południowo-zachodniej Polski o zróżnicowanych właściwościach fizyczno-chemicznych i chemicznych,
- gleby z najbliższych okolic Wrocławia o dużej zmienności w zakresie zawartości fosforu,
- glebę z gospodarstwa rolnego, skrajnie wyczerpaną z fosforu w wyniku wieloletniego gospodarowania ujemnym bilansem tego składnika.

2. Przegląd literatury

Fosfor występuje w przyrodzie wyłącznie w stanie związanym. Zarówno w glebie, jak i w organizmach roślin, zwierząt i ludzi pierwiastek ten występuje na najwyższym (+5) stopniu utlenienia w formie pochodnych kwasu ortofosforowego. Jest pierwiastkiem niezbędnym dla wszystkich żywych organizmów z uwagi na to, że spełnia kluczową rolę w szeregu fizjologicznych i biochemicznych procesów i nie może być zastąpiony przez inny składnik [Johnston 2000]. W roślinach nieodzowny jest w podstawowych procesach życiowych, do których zalicza się fotosyntezę, oddychanie oraz przemiany węglowodanów, tłuszczów i białek. Z biologicznego punktu widzenia za najważniejszą rolę uważa się zdolność tego pierwiastka do tworzenia wysokoenergetycznych wiązań umożliwiających syntezę związków wymagających nakładu energii. Na uwagę zasługuje również rola fosforu w pobieraniu i transporcie soli mineralnych, co wynika z obecności tego pierwiastka w fosfolipidach znajdujących się w strukturach komórkowych roślin [Mengel i Kirkby 1987, Marschner 1995].

Fosfor pobierany jest przez korzenie roślin z roztworu glebowego, głównie w postaci jonów ortofosforanowych – głównie H_2PO_4^- , a w mniejszym stopniu HPO_4^{2-} . Pobieranie to jest kontrolowane przez rośliny, gdyż stężenie fosforu w komórkach ich korzeni może być 100–1000 razy większe niż w roztworze glebowym. Pobrany przez korzenie roślin fosfor transportowany jest do poszczególnych organów i tam wbudowywany w związki organiczne. Najczęściej są to kwasy nukleinowe, fityna i fosfolipidy [Besford 1979, Anghinoni i Barber 1980, Itoh i Barber 1983].

2.1. Fosfor w roślinach i glebach

Zawartość fosforu w skorupie ziemskiej wynosi około 0,11% wagowych, a w przyrodzie pierwiastek ten występuje w formie związków. Naturalnym źródłem występowania fosforu w glebie jest bardzo powolny proces chemicznego, fizycznego i biologicznego wietrzenia skał osadowych, tzw. apatytów, a także rozkład minerałów stanowiących związki fosforu z żelazem i glinem [Bray i Kurtz 1945, Omotoso i Wild 1970, Bielecki 1973].

Całkowita zawartość fosforu w glebach waha się w szerokich granicach od 130 do 650 $\text{mg P}\cdot\text{kg}^{-1}$ w zależności od charakteru skał, z jakich zostały wytworzone pod wpływem wietrzenia i procesów glebotwórczych, a także w zależności od zawartości substancji organicznej. Gleby wytworzone ze skał magmowych oraz gleby organiczne zawierają znacznie więcej fosforu niż powstałe ze skał kwaśnych oraz osadowych, takich jak gliny czy piaski [Fardeau 1996, Holford 1997, Lewis i McGechan 2002].

Badania Pondela i in. [1971] wykonane na ponad 150 profilach gleb pseudobielicowych, brunatnych, czarnych ziem, mad średnich i ciężkich wskazują, że gleby próchniczne (czarne ziemie i mady) zawierają z reguły więcej fosforu całkowitego niż uboższe w próchnicę gleby pseudobielicowe wytworzone z piasków czy glin lekkich. Z badań tych wynika, że pierwiastek ten, podobnie jak azot, w większych ilościach gromadzi się w wierzchniej warstwie profilu glebowego.

Jak podaje Gibczyńska [2008], na całkowity fosfor składają się organiczne i mineralne połączenia tego pierwiastka zawierające fosfor w postaci połączeń kwasu ortofosforowego. Relacje między fosforem występującym w związkach organicznych i mineralnych układają się różnie w różnych gatunkach gleb. Badania Sharpleya i in. [1995] oraz Szymańskiej i in. [2009] wykazały, że w glebach mineralnych wytworzonych z piasków 8–10% całkowitego fosforu występuje w postaci organicznej, natomiast w wytworzonych z glin aż 11–21%. Na uwagę zasługuje fakt, że gleby organiczne (torfy) mogą zawierać nawet do 60% całkowitej ilości fosforu w postaci związków organicznych.

Niezależnie od formy chemicznej związku fosforu w glebie w zależności od możliwości pobierania ich przez rośliny można podzielić na:

- fosfor aktywny,
- fosfor ruchomy,
- fosfor zapasowy.

Pomiędzy tymi trzema grupami zachodzi ciągła wymiana, ale równocześnie znajdują się one w stanie dynamicznej równowagi [Fotyma 1978, Fotyma i in. 1987].

Fosfor aktywny znajduje się w roztworze glebowym z reguły w formie jonów fosforanowych. Stężenie fosforu w roztworze gleb użytkowanych rolniczo wynosi od 0,3–3,0 mg P·dm⁻³, a udział poszczególnych jonów ortofosforanowych w roztworze zależy od odczynu. Jak podają Larsen [1967] i Johnston [2000], w glebach o najczęściej spotykanym odczynie (pH 4,5–7,0) występują głównie jony H₂PO₄⁻. Zjawisko to jest korzystne, gdyż szybkość absorpcji tych jonów przez korzenie roślin jest ok. 10 razy większa niż jonów HPO₄⁻².

Fosfor ruchomy to ta ilość fosforu glebowego, która pozostaje w szybko ustalającej się równowadze z fosforem aktywnym w roztworze glebowym. Jest to głównie fosfor zasorbowany na uwodnionych tlenkach żelaza i glinu, na powierzchniach minerałów ilastych oraz CaCO₃. W tej grupie znajduje się również część fosforu organicznego.

Ze względu na tak zróżnicowaną rozpuszczalność związków fosforowych w glebie całkowita zawartość tego pierwiastka nie może być trafnym wskaźnikiem oceny potrzeb nawozowych. Wskazuje jednak na potencjalne możliwości określonej gleby do uruchomienia form rozpuszczalnych [Fotyma i in. 1987, Barber 1995].

Relacje pomiędzy formami fosforu glebowego oraz korzeniami roślin przedstawił Łąbętowicz [2000]. Autor za główne procesy glebowe decydujące o przyswajalności składników mineralnych uznał wietrzenie, mineralizację, sorpcję niewymienną i wymienną, hydrolizę, utlenianie, redukcję, powstawanie ligandów oraz ilość wody pobieraną przez rośliny. O przyswajalności fosforu decyduje więc szereg wymienionych procesów o charakterze długookresowym, ale także procesy krótkookresowe, do których zalicza się dyfuzję i przepływ z wodą oraz przebiegające wolniej procesy hydrolizy, utleniania i redukcji. Procesy zachodzące między fazą ruchomą i aktywną decydują o uzupełnianiu fosforu

w roztworze glebowym, w miarę jak jest pobierany przez rośliny, oraz utrzymywaniu jego stężenia na możliwie wysokim poziomie. Roztwór glebowy musi być bowiem uzupełniany zapasami składników zawartymi w fazie stałej. Zdaniem Łabętowicza [2000] w największym stopniu dotyczy to fosforu, którego stężenie w roztworze glebowym jest bardzo niskie, a ruchliwość znikoma.

2.2. Agrochemia fosforu i wskaźniki stanu fosforowego gleb

Złożoność stanu fosforowego określonej gleby, a tym bardziej różnych gleb, trudno scharakteryzować na podstawie jednej cechy. Zachowanie fosforu w glebie, zawartość różnych jego form oraz przemiany między nimi określa się w literaturze chemiczno-rolniczej różnymi terminami i ocenia wieloma metodami [Sharpley 1995, Higgs i in. 2000, Gibczyńska i in. 2008].

Według Richtera [1982] najczęściej używane pojęcia dotyczące fosforu to:

- Fosforany ruchome (ruchliwe) są to jony fosforanowe ekstrahowane za pomocą roztworów słabo kwaśnych, słabo zasadowych, roztworów soli, związków kompleksujących oraz anionów. W literaturze [Sibbesen 1978, Barrow 1997, Abdu 2006] nazywa się je również fosforanami łatwo rozpuszczalnymi.
- Fosforany wymienne – określane są tak jony zasorbowane na powierzchni fazy stałej gleby i przechodzące do roztworu w efekcie wymiany z innymi anionami, bez naruszania fazy koloidalnej. Fosforany te są bardzo trudne do oznaczenia [Sparks 1985, Abdu 2006].
- Fosforany izotopowo-wymienne – są częścią fazy stałej, która w warunkach równowagi z fazą płynną może ulegać wymianie na fosforany obecne w roztworze. Zawartość ich w warunkach równowagi można oznaczyć za pomocą ^{32}P metodą rozcieńczenia izotopowego [Nelson i in. 1953, Sharpley 2000].
- Fosforany dostępne dla roślin – teoretycznie to te, które mogą być pobrane przez rośliny. Ich eksperymentalne oznaczenie jest bardzo trudne. Obecnie oznacza się je różnymi metodami ekstrakcyjnymi. Kryterium przydatności określonej metody ekstrakcyjnej do celów diagnostycznych jest ścisła korelacja między ilością fosforu ekstrahowaną z gleby a pobraniem tego składnika przez rośliny [Uusitalo i Tuhkanen 2000, McDowell i Sharpley 2003, Fuhrman i in. 2005, Assubale 2012].

Do oceny dostępności fosforanów glebowych dla roślin bardzo ważne są wskaźniki stanu fosforowego. Do najważniejszych z nich należą:

- Intensywność (I) – charakteryzuje stopień ruchliwości fosforanów glebowych. Parametr ten nie zależy od masy gleby i przedstawiany jest jako stężenie jonów fosforanowych w wyciągu wodnym lub rozcieńczonym CaCl_2 . Intensywność charakteryzuje również potencjał fosforowy według Schoefielda.
- Pojemność (Q) – określa ilość ruchomych fosforanów, które mogą przejść ze stałej fazy gleby do roztworu. Pojemność określana jest w stosunku do masy gleby, a oznaczana za pomocą różnych metod ekstrakcyjnych, np. kwaśnymi roztworami.
- Kinetyka – charakteryzuje szybkość przechodzenia z fazy stałej do roztworu. Charakteryzuje się ją różnymi metodami, np. wielokrotną ekstrakcją roztworami soli, anionitami, elektroultrafiltracją czy wielokrotnym zasiewem i zbiorem roślin.

- Pojemność buforowa gleby względem fosforu – charakteryzuje możliwości gleby do przeciwstawiania się zmianie wielkości wskaźnika intensywności po wprowadzeniu do gleby nawozu fosforowego lub po wyczerpaniu fosforu przez rośliny. Wyraża się ją stosunkiem Q/I.
- Sorpcja fosforanów – proces przechodzenia fosforanów z fazy płynnej do stałej. Możliwe są przy tym trzy drogi sorpcji: adsorpcja fizyczna (tworzenie jednocząsteczkowej warstwy na powierzchni fazy stałej gleby), sorpcja chemiczna (reakcja fosforanów na powierzchni fazy stałej gleby) i absorpcja (proces przemiany nieograniczonych fosforanów w inną postać fazy stałej). Wszystkie te procesy przebiegają równocześnie i rozdzielnie nie są możliwe do oznaczenia.
- Desorpcja fosforanów – jest procesem przeciwstawnym do sorpcji i przyczynia się do wzbogacenia fazy płynnej w te jony.
- Mineralizacja fosforanów – to przechodzenie form organicznych fosforu w formy mineralne przy udziale drobnoustrojów.
- Immobilizacja fosforu – to proces przeciwstawnym, w trakcie którego fosforany mineralne ulegają przekształceniu w organiczne.
- Fiksacja fosforu – termin znany zwłaszcza w starszej literaturze. Określa przechodzenie fosforu wprowadzonego z nawozami z formy rozpuszczalnej w trudno rozpuszczalną. Fosfor zafiksowany (utrwalony) stanowi część tzw. pozostałych fosforanów, czyli zastosowanych do gleby i niewykorzystywanych w pierwszym roku po nawożeniu.

W literaturze niemieckiej [Frossard i Stadelmann 1987] używa się też często pojęcia „Nachlieferung” – uwalnianie. Jest to przekazywanie fosforu z fazy stałej do roztworu glebowego, a także możliwość gleby do zaopatrywania roślin w fosfor.

2.3. Metody oceny stanu fosforowego gleb

Do oceny poszczególnych wskaźników stanu fosforowego gleb stosuje się wiele metod. Najbardziej znane i najczęściej stosowane to:

- Ocena wskaźnika intensywności i pojemności
Wskaźnik intensywności najczęściej oznacza się, ekstrahując fosfor z gleby, za pomocą rozcieńczonego roztworu CaCl_2 ($0,01 \text{ mol} \cdot \text{dm}^{-3}$) przy wąskim stosunku gleby do roztworu (1:5) i krótkim czasie wytrząsania (5 min). Intensywność cechuje także fosfor rozpuszczalny w wodzie przy stosunku gleby do roztworu 1:50 w czasie ekstrakcji wynoszącym 2 godziny. Obecnie znacznie częściej charakteryzuje się intensywność z wykorzystaniem rozcieńczonego CaCl_2 niż wody.
- Ocena wskaźnika kinetyki i właściwości sorpcyjnych
Wskaźnik pojemności można określać wieloma metodami, jednak najbardziej rozpowszechnione są metody ekstrakcyjne. Jedną z nich jest metoda Egnera-Riehma, przyjęta w Polsce do badań masowych w celu oceny zasobności gleb w fosfor przyswajalny dla roślin [Raven i Hossner 1993]. Pojemność można ocenić również, wykorzystując metodę Olsena [Olsen i in. 1954], Kirsanowa, a także stosowaną do ekstrakcji wielu innych składników metodę Mehlich [Mehlich 1984].
- Ocena wskaźnika kinetyki i właściwości sorpcyjnych
W ocenie dostępności fosforanów glebowych dla roślin należy brać pod uwagę stężenie jonów fosforanowych nie tylko w roztworze glebowym, ale również zapas

ruchomych fosforanów, które warunkują wielokrotne wyrównanie stężenia fosforu w roztworze wraz z jego wykorzystaniem przez rośliny. Jedną z metod oceny wskaźnika kinetyki jest wielokrotne usuwanie fosforu z gleby za pomocą rozcieńzonego chlorku wapnia przy stosunku gleby do roztworu 1:20 [Tiyapongpattana i in. 2004].

W ostatnich latach, w niektórych krajach kinetykę uwalniania fosforu oznaczono metodą elektroultrafiltracji. Najszerzej wykorzystywano ją na Węgrzech oraz w krajach byłej Jugosławii. Metodą analizowano uwalnianie nie tylko fosforu, ale również innych składników pokarmowych. Kinetykę uwalniania fosforu z gleb można analizować także metodą nieprzerwanej ekstrakcji wodnej [Tiyapongpattana i in. 2004].

Właściwości sorpcyjne gleb względem fosforu można ocenić, wyznaczając izotermy sorpcji tego składnika zastosowanego w formie $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$. Właściwości sorpcyjne charakteryzuje również maksimum adsorpcji fosforu według Gunary oraz maksimum adsorpcji wyznaczone z izoterm adsorpcji Langmuira. Wskaźnikiem sorpcji fosforu w glebie opartym na jednym punkcie izotermy adsorpcji jest indeks sorpcyjny według Bache [Bache i Wiliams 1971]. Jest to stosunek ilości fosforu zasorbowanego przez glebę do logarytmu odpowiadającego mu stężenia równowagi. W ostatnich latach do oceny właściwości sorpcyjnych gleb stosuje się również izotermy sorpcji według Van Huay'a [Pagel i Van Huay 1976, Rhodes 1977, Allen i in. 2001].

– Ocena starzenia się fosforanów w glebie

Starzenie się fosforanów można scharakteryzować poprzez analizę zmian zawartości ruchomych fosforanów w ściśle określonej temperaturze i przy optymalnej wilgotności gleby. W tym celu glebę wysyca się fosforem do uzyskania odpowiedniego poziomu tego składnika. Starzenie się fosforanów można ocenić również za pomocą tzw. okresu połowicznego rozpadu. Metoda polega na wyznaczeniu czasu, po którym połowa dodanego do gleby fosforu nie przechodzi do wyciągu Egnera-Riehma [Wójcik 1990].

3. Metody badań

W badaniach nad oceną przydatności testów chemicznych do opisu stanu fosforowego gleb przeprowadzono następujące eksperymenty:

1. Badania terenowe:
 - a) analiza stanu fosforowego gleb położonych na terenie południowo-zachodniej Polski,
 - b) analiza stanu fosforowego gleb położonych w okolicy Wrocławia.
2. Doświadczenie polowe:
 - a) analiza właściwości i stanu fosforowego gleb
 - b) plonowanie, zawartość oraz nagromadzenie N i P.
3. Doświadczenie mikropletkowe:
 - a) analiza właściwości i stanu fosforowego gleb,
 - b) plonowanie, zawartość oraz nagromadzenie N i P.
4. Doświadczenie wazonowe.

3.1. Badania terenowe

W celu zgromadzenia zróżnicowanego materiału badawczego wytypowano około 60 pól uprawnych położonych na terenie południowo-zachodniej Polski. Miejsca pobrania próbek wybierano tak, aby badaniami objąć różne typy i gatunki gleb, o zróżnicowanych właściwościach fizyczno-chemicznych, zbliżonych do przeciętnie występujących w naszym kraju. Szczególnie zwracano uwagę, aby gleby różniły się pod względem zawartości części spławialnych, substancji organicznej oraz stanu zakwaszenia, gdyż jak wiadomo z licznych badań, czynniki te decydują o możliwościach sorpcyjnych gleb.

Po określeniu podstawowych właściwości stwierdzono, że gleby były zróżnicowane pod względem składu granulometrycznego, zawartości C_{org} i odczynu, ale zawartość fosforu prawie we wszystkich próbkach była wysoka. Do dalszych badań zakwalifikowano 57 gleb. Uzyskane wyniki skłoniły do poszukiwania takich gleb, które byłyby potencjalnie mniej zasobne w fosfor, dzięki czemu zróżnicowanie pozyskanego materiału glebowego byłoby pod tym względem znacznie większe. W tym celu wyznaczono obszar pól uprawnych w okolicach Wrocławia, gdzie z powodu przeznaczenia gruntów pod zabudowę pola od wielu lat przypuszczalnie nawożone były ekstensywnie. Kolejne 33 próbki gleb pobrane z tego terenu po wstępnej ocenie ich stanu fosforowego spełniły oczekiwania pod tym względem.

Próbki z pól uprawnych pobierano po zbiorach roślin, z warstwy ornej 0–20 cm. Na podstawie tak zebranego materiału badawczego określono aktualny stan zasobności gleb, natomiast nie można było przeprowadzić analizy wpływu nawożenia fosforem na właściwości gleb czy porównywać uzyskanych wyników testów z ilościami składników pobieranych przez rośliny uprawne ze względu na brak wiarygodnych informacji na temat historii nawożenia pól produkcyjnych, poziomu uzyskiwanych plonów oraz ich składu chemicznego.

3.2. Doświadczenie polowe

Podstawę badań nad oceną przydatności testów chemicznych do opisu modyfikacji stanu fosforowego gleb pod wpływem różnych systemów nawożenia stanowił materiał uzyskany z wieloletniego statycznego doświadczenia polowego zlokalizowanego na terenie Stacji Doświadczalnej Pawłowice. Zostało ono założone przez prof. Wilka i dr Rabikowską na stałym polu doświadczalnym Katedry. Pole to znajdowało się na wysokości 130 m n.p.m., a jego położenie geograficzne odpowiadało 51°11'N oraz 17°6'E. Gleba pola doświadczalnego została zakwalifikowana do typu gleb płowych typowych, wytworzonych z gliny lekkiej, zalegającej na glinie średniej. Według nomenklatury FAO [1990] gleba pola doświadczalnego zalicza się do typu Haplic Luvisols. Pod względem przydatności rolniczej glebę zaliczono do kompleksu pszennego dobrego. Średnia roczna temperatura powietrza, według danych ze stacji położonej na terenie gospodarstwa, wynosiła w wieloleciu 8,5°C. Najcieplejszym miesiącem w tym rejonie był lipiec (18,4°C), a najzimniejszym styczeń (-1,5°C). Największe opady miesięczne odnotowywane były w lipcu, w wieloleciu średnio wynosiły około 68 mm, natomiast najsuchszym miesiącem był luty (26,6 mm opadu).

Doświadczenie dwuczynnikowe założono metodą podbloków, w pięciu powtórzeniach. Czynnikiem rozlokowanym jako podbloki (I czyn.) było nawożenie obornikiem, przy czym taka sama ilość obornika 40 lub 60 t na ha stosowana była trzema sposobami: b – corocznie po 1/4 dawki przewidzianej na rotację; c – co drugi rok po 1/2 dawki oraz d – pełna dawka obornika pod 1. roślinę rotacji (kukurydzę na kiszonkę) (tab. 1). Wzrastające nawożenie azotem (II czyn.) rozlokowano w obrębie każdego podbloku, przy czym kolejne dawki N były wielokrotnościami dawki podstawowej – N_1 . W doświadczeniu najniższa dawka N stosowana była jednorazowo, natomiast dawki podwójne i potrójne w dwóch względnie trzech terminach. W przypadku analizowanej w pracy pszenicy ozimej azot stosowano w trzech terminach: przed siewem, w czasie ruszenia wegetacji oraz w początkowym okresie strzelania w źdźbło.

Omawiane doświadczenie obejmowało 80 poletek (4 x 4 x 5), każde o powierzchni 50 m² (5 x 10 m). Powierzchnia do zbioru wahała się zależnie od uprawianej rośliny od 14 do 27,4 m².

Podstawowa dawka azotu (N_1), którą stosowano w doświadczeniu, była uwarunkowana potrzebami gatunkowymi uprawianej rośliny (tab. 1). Składnika tego używano w postaci saletry amonowej, a pod kukurydzę w postaci mocznika. Termin nawożenia azotem był zharmonizowany odpowiednio z fazą rozwojową poszczególnych roślin.

Tabela 1
Table 1

Schemat nawożenia obornikiem i azotem obiektów doświadczenia polowego
FYM treatment and nitrogen fertilization scheme of field experiment sites

Roślina Plant	Nawożenie obornikiem FYM treatment				Nawożenie N Nitrogen fertilization			
	a	b	c	d	N ₀	N ₁	N ₂	N ₃
	[t·ha ⁻¹]				[kg·ha ⁻¹]			
Kukurydza na kiszonkę Maize for silage	0	10* 15	20* 30	40* 60	0	100** 70***	200** 140***	300** 210***
Jęczmień jary Spring barley	0	15	0	0	0	30	60	90
Rzepak ozimy lub jary, bądź gorczyca biała Spring or winter rape or white mustard	0	15	30	0	0	50	100	150
Pszenvica ozima Winter wheat	0	15	0	0	0	40	80	120

* I rotacja – 40 t·ha⁻¹·4 lata⁻¹, od II rotacji 60 t·ha⁻¹·4 lata⁻¹, ** rotacje I–V, *** rotacje VI i VII

* I rotation – 40 t·ha⁻¹·4 years, from II rotation 60 t·ha⁻¹·4 years, ** rotations from I to V, *** rotations VI and VII

Nawożenie potasem i fosforem było jednakowe w całym doświadczeniu. Dawki tych składników wnoszone corocznie wynosiły 83 kg K i 17,4 kg P·ha⁻¹·rok⁻¹. Potas stosowano w postaci soli potasowej (47,3% K), fosfor natomiast w postaci superfosfatu pojedynczego (8,3% P) lub superfosfatu potrójnego (20,0% P). W doświadczeniu wykorzystywano dobrze przefermentowany obornik bydlęcy, w takiej samej dawce na całą rotację (60 t·ha⁻¹), jednakże w zróżnicowany sposób. Na podbloku: **b** – 15 t·ha⁻¹ pod każdą roślinę w zmianowaniu, na **c** – 30 t·ha⁻¹ pod kukurydzę i rzepak (lub gorczycę), a na podbloku **d** – 60 t·ha⁻¹ pod kukurydzę na kiszonkę. Przeciętny skład chemiczny stosowanego obornika, a także ilość składników pokarmowych wprowadzonych wraz z nim do gleby, średnio w rotacji, zamieszczono w tabeli 2.

Tabela 2
Table 2

Przeciętny skład chemiczny obornika i ilość wprowadzonych składników w rotacji
Average chemical composition of FYM and quantity of nutrients introduced in the rotation

Parametr Parameter	Zawartość składników Nutrients content	Wprowadzone ilości Quantities introduced
	[g·kg ⁻¹]	[kg·ha ⁻¹]
C _{org.}	291,0	4909,0
N	21,9	360,3
P	8,8	142,0
K	26,5	466,3
Ca	19,8	326,7
C : N	13,5	–
Sucha masa – 263,5 g·kg ⁻¹ św.m Dry mass – 263,5 g·kg ⁻¹ f.m		

W pracy przedstawiono wyniki dotyczące kumulatywnego, 28-letniego efektu stosowania zróżnicowanego nawożenia obornikiem oraz azotem mineralnym, analizując próby roślin i gleb pobrane w ostatnim roku badań.

Plonowanie oraz analizę składu chemicznego, uprawianej jako ostatnia w rotacji, pszenicy ozimej przeprowadzono, uwzględniając wszystkie obiekty doświadczenia. Efekt wieloletniego nawożenia obornikiem zawężono do analizy oddziaływania na gleby zróżnicowanej dawki tego nawozu (pominięto sposoby stosowania obornika). Gleby pobrano z dwóch skrajnych podbloków nawożenia obornikiem – bez stosowania tego nawozu i z podbloku nawożonego raz na cztery lata oraz ze wszystkich obiektów nawożenia azotem (tab. 3). Analizowano oddzielnie każdą dwudziestocentymetrową warstwę gleby, pobraną od 0 do 80 cm po zbiorze pszenicy, za pomocą laski glebowej zawieszanej na ciągniku.

Tabela 3
Table 3

Obiekty doświadczenia polowego obejmujące analizę gleb
Field experiment sites including soil analysis

Czynniki doświadczenia Test factors	Obiekty badawcze Test sites
I. Nawożenie obornikiem FYM treatment	a – bez obornika – without FYM
	d – dawka 60 t·ha ⁻¹ ·4 lata ⁻¹ (w 1. roku rotacji) d – dose of 60 t·ha ⁻¹ ·4 years (in one year of rotation)
II. Nawożenie azotem Nitrogen fertilization	N ₀ – bez N – without N
	N ₁
	N ₂ – 2 x N ₁
	N ₃ – 3 x N ₁

3.3. Doświadczenie mikropoletkowe

Badania mikropoletkowe rozpoczęto po likwidacji doświadczenia polowego. Obejmowały one sześć wybranych obiektów z doświadczenia polowego, które opisano wcześniej. Do badań zakwalifikowano po trzy obiekty o zróżnicowanym poziomie nawożenia azotem, z dwóch podbloków nawożenia obornikiem (tab. 4). Glebę z doświadczenia polowego pobrano z zachowaniem naturalnego układu jej warstw w profilu do głębokości 60 cm i umieszczono ją w betonowych, impregnowanych kręgach o powierzchni 0,50 m² podścielonych warstwą żwiru i piasku, każda o miąższości 20 cm. Powstałe, na bazie gleb z doświadczenia polowego, doświadczenie mikropoletkowe obejmowało 6 obiektów rozmieszczonych losowo na 48 mikropoletkach (każdy obiekt w 6 powtórzeniach).

Tabela 4
Table 4

Porównanie schematów doświadczenia polowego i mikropoletkowego
Comparison of field and micro-field experiment scheme

Czynniki doświadczalne Test factors	Obiekty doświadczenia polowego Field experiment sites	Obiekty doświadczenia mikropoletkowego Micro-field experiment sites
Nawożenie obornikiem tylko w doświadczeniu polowym FYM treatment only in field experiment	– bez obornika (kontrola) without FYM (control) – obornik 60 t·ha ⁻¹ ·4 lata ⁻¹ FYM every 4 years 60 t·ha ⁻¹	– nawożenie wyłącznie mineralne fertilization only with mineral fertilizers – dawne nawożenie obornikiem former FYM treatment
Nawożenie azotem mineralnym Fertilization with mineral nitrogen	– bez azotu without nitrogen – dawka pojedyncza N single dose of N – dawka podwójna N double dose of N – dawka potrójna N tripled dose of N	– bez azotu without nitrogen – dawka pojedyncza N single dose of N – dawka potrójna N tripled dose of N

W doświadczeniu mikropoletkowym nie stosowano obornika ani nawozów fosforowych. Zróżnicowane właściwości gleby (między podblokami I. czynnika) oraz zróżnicowany stan fosforowy gleby na wszystkich obiektach był skutkiem stosowania obornika w doświadczeniu polowym.

Wapnowanie oraz nawożenie potasem i magnezem było jednakowe na wszystkich obiektach badawczych i stosowane w dawkach uwarunkowanych właściwościami gleby oraz wymaganiami pokarmowymi uprawianych roślin.

W doświadczeniu uprawiano: owies, gorczycę oraz bazylię. Przedsięwzięcie zastosowano w przeliczeniu na hektar pod owies 90 kg K i 90 kg Mg, pod bazylię: 192 kg K oraz 81 kg Mg. Potas i magnez stosowano w postaci siarczanu potasu (52%) oraz siarczanu magnezu (26,6%). W doświadczeniu uprawiano także dwukrotnie gorczycę, ale gatunek ten nie był nawożony K i Mg.

Dawki używanych w doświadczeniu nawozów azotowych były zależne nie tylko od wymagań uprawianej rośliny, ale również od schematu doświadczenia (tab. 4). W analizowanym okresie pojedyncza dawka azotu mineralnego wynosiła w przeliczeniu na hektar – pod owies i obie uprawiane gorczyce po 30 kg N oraz po 45 kg N pod każdy z dwóch zbiorów bazylii. W trzyletnim zmianowaniu suma azotu zastosowanego na obiektach z pojedynczą dawką N wyniosła 180 kg·ha⁻¹. Nawozy azotowe pod owies i dwukrotnie uprawianą gorczycę stosowano w formie saletry amonowej (34%), natomiast pod bazylię w postaci saletrzaku dolomitowego o zawartości 27% N.

Przed rozpoczęciem badań gleby mikropoletek wykazywały odczyn lekko kwaśny, dlatego po uprawie owsa użyto dolomitu (50% CaO + MgO) w ilości 50 g na każde poletko, aby zmniejszając zakwaszenie, pozostawić różnice w kwasowości gleb pomiędzy obiektami badań.

W doświadczeniu oznaczano ilość nagromadzonej biomasy, zawartość oraz pobranie fosforu przez rośliny, jak również stan fosforowy gleb i podstawowe jej właściwości fizyczno-chemiczne. Próbkę glebową i roślinną pobraną z doświadczenia mikropoletkowego poddano analizom za pomocą tych samych metod, którym poddano próby z doświadczenia polowego.

3.4. Doświadczenie wazonowe

Do badań wytypowano glebę o niskiej zawartości fosforu, którą pobrano jesienią z warstwy położonej na głębokości 10–20 cm, z pola gospodarstwa rolnego mieszczącego się we wsi Janów w gminie Krotoszyn, na Wysoczyźnie Kaliskiej, będącej częścią Niziny Południowo-Wielkopolskiej. Była to gleba płowa o składzie granulometrycznym gliny średniej pylastej. Po wysuszeniu do stanu powietrznie suchego glebę roztarto i przesiano przez sito o średnicy oczek 1 mm, a następnie dokładnie wymieszano. Tak przygotowaną glebę poddano wstępnym analizom chemicznym (takim samym jak gleby pobrane z innych pól uprawnych), a następnie użyto do badań inkubacyjnych i wegetacyjnych.

Uzyskane wyniki wstępnej analizy gleby przedstawiono w tabeli 5. Gleba charakteryzowała się kwaśnym odczynem i niskim stężeniem P aktywnego wynoszącym $0,1 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$. Całkowita zawartość fosforu była także stosunkowo niska i wynosiła $345 \text{ mg P}\cdot\text{kg}^{-1}$ gleby.

Tabela 5
Table 5

Charakterystyka gleby wykorzystanej w doświadczeniu wazonowym
Characteristics of the soil used in pot experiments

Odczyn Reaction	Zawartość fosforu Phosphorus content			Zawartość form rozpuszczalnych Content of soluble forms	
	P całkowity P total	P rozpuszczalny P soluble	P aktywny P active	K	Mg
pH (KCl)	[mg·kg ⁻¹]		[mg·dm ⁻¹]	[mg·kg ⁻¹]	
4,8	345	33	0,10	74	164
kwaśny acid	zasobność gleby soil nutrient availability				
	niska low				bardzo wysoka very high

Badania prowadzone na glebie wyczerpanej z fosforu obejmowały dwa doświadczenia: inkubacyjne i wegetacyjne. Oba wykonywane były według tego samego schematu przedstawionego w tabeli 6. Powietrznie suchą glebę po oddzieleniu części szkieletowych rozważono na porcje o wadze 2 kg, wymieszano ją z odpowiednią ilością dodatków, następnie dzielono na 5 części. Pierwsze cztery części testowane były wegetacyjnie, natomiast piątą część gleby z dodatkami inkubowano przez okres wegetacji roślin.

Dodatki zastosowane w doświadczeniu przedstawiono w tabeli 6. Związki chemiczne wnoszono w postaci odczynników czystych do analiz. Fosforany dodawane były w formie

roztworów, w celu uzyskania równomiernego ich rozmieszczenia w całej objętości gleby. Dawki fosforanów ustalono na poziomie 55 oraz 110 mg P·kg⁻¹.

Tabela 6
Table 6

Schemat doświadczenia wazonowego, I cz. doświadczenia
List of pot experiments, part I

Obiekt Test Pots	Wnoszone do gleby substancje Substances added to the soil
gleba kontrolna control soil	–
2 N K	199 mg N-NH ₄ NO ₃ , 555 mg K-K ₂ SO ₄
CaCO ₃	10 g CaCO ₃
CaCO ₃ + 2 NK	10 g CaCO ₃ + 2NK
PRP dawka max. – odkwaszanie PRP max. dose – deacidification	12 g PRP (30% CaO)
PRP dawka min. PRP minimum dose	0,4 g PRP
P-N	469 mg NH ₄ H ₂ PO ₄ + N, 2K
P-K	483 mg KH ₂ PO ₄ + 2N, K
P-Ca	856 mg Ca(H ₂ PO ₄) + 2N, 2K
2 P-N	938 g NH ₄ H ₂ PO ₄ + 2K
2 P-K	967 mg KH ₂ PO ₄ + 2N
2 P-Ca	1790 mg Ca(H ₂ PO ₄) + 2N, 2K

Ponieważ wraz z fosforanami w doświadczeniu stosowano związki azotu i potasu – składników silnie oddziałujących na wzrost roślin – ich różny początkowy poziom na poszczególnych obiektach wyrównywano. Dodatkowy azot wnoszono w postaci azotanu amonu, potas w formie siarczanu w ilościach pozwalających na uzyskanie stałego ich poziomu na obiektach, na których używano fosforanów, oraz obiekcie CaNK i NK.

Dawka węgla wapnia zastosowana w doświadczeniu obliczona była na poziomie 1 Hh celem zneutralizowania wykrytych jonów wodorowych w glebie. W taki sam sposób obliczono i zastosowano pierwszą – większą dawkę nawozu PRP, zgodnie z podawaną przez producenta 30% zawartością CaO. Dawkę mniejszą zastosowano na drugim obiekcie, jako użyźniacz poprawiający właściwości gleby, zgodnie z zaleceniem producenta i dystrybutorów tego nawozu w ilości 120 kg na hektar.

W celu przetestowania w doświadczeniu kolejnego dodatku, którym były Efektywne Mikroorganizmy (EM), aby zwiększyć i przyspieszyć ich oddziaływanie na stan fosforowy gleby, wnoszono je w dawkach 10 razy większych od zalecanych przez producenta. Aby umożliwić pełną ocenę działania EM na glebę, w doświadczeniu wprowadzono warianty ze stosowaniem odkażania gleby (utrzymywania gleby w pełnym nasyceniu wodą w temperaturze 105°C przez 2 godziny). W badaniach porównywano także efektywność oddziaływania EM w obecności dodatku nierozłożonych resztek roślinnych. W tym celu do wa-

zonów wnoszono wysuszone, drobno zmielone nadziemne części gorczycy w ilości 8 g na 2 kg gleby, co w przeliczeniu na hektar wynosiło 12 t suchej masy, czyli około 10 razy więcej niż uzyskiwana masa gorczycy uprawianej jako międyzplon (tab. 7).

Tabela 7

Table 7

Obiekty i substancje stosowane w doświadczeniu wazonowym, II. cz. doświadczenia
Pots and substances used in pot experiments, part II

Obiekt Object	Wnoszone do gleby substancje Substances added to the soil
gleba kontrolna control Soil	gleba nieodkazona soil without heat disinfection
gleba + EM soil + effective microorganisms	roztwór EM 8 cm ³ = 10 x dawka zalecana EM solution 8 cm ³ = 10 x the recommended dose
gleba + EM + gorczyca soil + effective microorganisms + white mustard	roztwór EM 8 cm ³ + 8 g s.m. gorczycy EM solution 8 cm ³ + 8 g d.m. of white mustard
gleba odkazona heat disinfection soil	gleba odkazona (wilgotna w 105°C) heat disinfection soil (moist in 105°C)
gleba odkazona + EM heat disinfection soil + effective microorganisms	roztwór EM 8 cm ³ EM solution 8 cm ³
gleba odkazona + EM + gorczyca heat disinfection soil + effective microorganisms + white mustard	roztwór EM 8 cm ³ + 8 g s.m. gorczycy EM solution 8 cm ³ + 8 g d.m. of white mustard

W doświadczeniu glebę, po nawilżeniu do wilgotności 60% ppw., inkubowano przez 12 tygodni w temperaturze 21°C. Co trzy tygodnie mieszano ją i uzupełniano odpowiednią ilością wody destylowanej. Po zakończeniu doświadczenia gleba była suszona, rozcierana i przeznaczana do analiz.

Badania vegetacyjne podzielono na dwie części. Doświadczenie I prowadzono 15 tygodni. Gorczycę zbierano dwukrotnie, w odstępach co 6 tygodni. Po oznaczeniu zielonej i suchej masy roślin uzyskanych z 2 zbiorów próbki połączone, aby umożliwić przeprowadzenie analiz chemicznych.

Doświadczenie II prowadzone było krócej i trwało 6 tygodni. Testowano w nim działanie EM bez dodatków i z dodatkiem gorczycy. Schemat poszczególnych doświadczeń wyszczególniono w tabeli 8.

Schemat doświadczeń wazonowych
List of pot experiments

Obiekty I części doświadczenia Test pots for the first part of the experiment	Obiekty II części doświadczenia Test pots for the second part of the experiment
gleba kontrolna control soil	
2 N K	
CaCO ₃	gleba soil
CaCO ₃ + 2 NK	gleba + EM soil + effective microorganisms
PRP max. – odkwaszanie PRP max. dose – deacidification	gleba + EM + gorczyca soil + effective microorganisms + white mustard
PRP min. PRP minimum dose	gleba odkażona heat disinfection soil
P-N	gleba odkażona + EM heat disinfection soil + effective microorganisms
P-K	gleba odkażona + EM + gorczyca heat disinfection soil + effective microorganisms + white mustard
P-Ca	
2 P-N	
2 P-K	
2 P-Ca	

Rośliną testową w obu doświadczeniach była gorczyca odmiany Bardena, wysiewana po sześciotygodniowej inkubacji gleby z testowanymi substancjami, a następnie uprawiana przez 6 tygodni. Doświadczenie przeprowadzono w czterech powtórzeniach w wazonach o pojemności 0,5 dm³ (wnoszono 400 g s.m. gleby). Wilgotność gleby była stale utrzymywana na tym samym poziomie (60% ppw), kontrolowana poprzez ważenie wazonów i uzupełnianie niedoborów wody dwa razy dziennie.

W celu scharakteryzowania stanu fosforowego gleb wykonano w nich analizy podstawowych form tego pierwiastka i wyznaczono parametry sorpcji fosforu, analogicznie jak w testach przeprowadzonych w glebach pobranych z pól uprawnych. Dodatkowo w próbkach gleb doświadczenia wazonowego wykonano w glebach analizę zawartości fosforu testem stosowanym w Japonii do wspólnej ekstrakcji makro- i mikroskładników zaproponowanych przez Yanai i in. [2000].

3.5. Analizy roślin i gleb

Analizy składu chemicznego materiału roślinnego uzyskanego ze wszystkich doświadczeń wegetacyjnych przeprowadzono tymi samymi metodami. Podczas zbiorów roślin ozna-

czano zieloną i suchą masę. W zmielonych próbkach oznaczono powszechnie stosowanymi metodami [Kamińska i in. 1972]:

- Zawartość azotu całkowitego – metodą destylacyjno-miareczkową po uprzedniej mineralizacji materiału w próbkach, w bloku ogrzewanym elektrycznie. Próbki mineralizowano za pomocą stężonego kwasu siarkowego z dodatkiem perhydrolu.
- Zawartość fosforu oznaczano metodą kolorymetryczną po mineralizacji próbek roślinnych na sucho w piecu muflowym w temperaturze 450°C i roztworzeniu popiołu w kwasie azotowym.

Uzyskane wyniki zawartości obu składników w roślinach przeliczono na g·kg⁻¹ próbki roślinnej. Z iloczynu suchej masy roślin i zawartości obliczano ilość składników pobranych przez rośliny z poszczególnych obiektów doświadczenia.

Przygotowanie materiału glebowego obejmowało suszenie w temperaturze pokojowej, przesianie przez sito o średnicy oczek 1 mm w celu oddzielenia części szkieletu, aby umożliwić ocenę zasobności gleb w składniki pokarmowe. Przed oznaczaniem całkowitej zawartości fosforu oraz węgla i azotu – gleby dodatkowo rozcierano w moździerzu agatowym.

W próbkach glebowych przeznaczonych do badań, przed wykonaniem testów stanu fosforowego gleb, przeprowadzono w laboratorium Katedry Żywienia Roślin oraz w Okręgowej Stacji Chemiczno-Rolniczej analizy ich podstawowych właściwości fizycznych i chemicznych:

- skład granulometryczny metodą areometryczną Bouyocosa w modyfikacji Casagrande'a i Prószyńskiego;
- stan zakwaszenia
 - odczyn w roztworze KCl o stężeniu 1 mol·dm⁻³ przy stosunku gleby do roztworu jak 1 do 2,5, za pomocą pehametru,
 - kwasowość hydrolityczną – metodą Kappena według opisu podanego przez Liłyńskiego i in. [1976],
 - odczyn w roztworze CaCl₂ o stężeniu 0,01 mol·dm⁻³ przy stosunku gleby mineralnej do roztworu jak 1 do 2,5 – za pomocą pehametru [Black 1965];
- zawartość węgla organicznego – metodą Tiurina;
- zawartość azotu ogólnego – metodą Kjeldahla.

Ocena stanu fosforowego gleb obejmowała następujący zakres testów chemicznych:

- Testy pojemności (statyczne):
 - zawartość fosforu całkowitego – po uprzedniej mineralizacji próbek glebowych w 60% HClO₄ w bloku do spalań, przy temperaturze końcowej 285–310°C oraz hydrolizie fosforanów (3 godz. w temp. 80°C) – metodą kolorymetryczną wana-do-molibdenianową [Prace PTG 1976];
 - zawartość rozpuszczalnego fosforu według metody Egnera-Riehma DL [Richter i in. 1982], obowiązującej w polskim systemie doradztwa nawozowego – w tym celu ekstrahowano związki fosforu z gleby za pomocą roztworu buforowego mleczanu wapnia (pH 3,6) – oznaczano P kolorymetrycznie z molibdenianem amonu i kwasem askorbinowym w obecności soli antymonu [Watanabe i Olsen 1965];
 - zawartość fosforu rozpuszczalnego według testu Mehlich-3, stosowanego do oznaczania makro- i mikroelementów w glebie; wytrząsano gleby w mieszaninie

roztworów NH_4NO_3 , CH_3COOH , NH_4F , HNO_3 oraz EDTA przy stosunku gleby do roztworu 1:10 [Mehlich 1984] – oznaczano P kolorymetrycznie [Watanabe, Olsen 1965];

- zawartość fosforu według Yanai przeprowadzono, ekstrahując glebę roztworem o $\text{pH}=1,3$, będącym mieszaniną o składzie; $0,25 \text{ mol}\cdot\text{dm}^{-3} \text{NH}_4\text{Cl}$, $0,05 \text{ mol HCl}\cdot\text{dm}^{-3}$; $0,2 \text{ mol}\cdot\text{dm}^{-3} \text{CH}_3\text{COOH}$ i $0,005 \text{ mol}\cdot\text{dm}^{-3} \text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$ [Yanai i in. 2000].
- Test intensywności (ruchliwości):
 - stężenie fosforu aktywnego – oznaczano przy wąskim stosunku gleby do roztworu (1:5) i krótkiej (5 min) ekstrakcji $0,01 \text{ mol}\cdot\text{dm}^3 \text{CaCl}_2$, metodą opracowaną przez IUNG Puławy [Fotyma i in. 1991] – P oznaczano kolorymetrycznie [Watanabe, Olsen 1965].
- Test kinetyki (uwalniania):
 - uwalnianie fosforu do CaCl_2 przeprowadzono poprzez wielokrotną ekstrakcję tej samej próbki gleby $0,01 \text{ mol}\cdot\text{dm}^3 \text{CaCl}_2$ według metody opisanej przez Richtera [1982] – P oznaczano kolorymetrycznie z molibdenianem amonu i kwasem askorbinowym w obecności soli antymonu.
- Testy pojemności buforowej (sorpcyjnej) gleb względem fosforu:
 - parametry sorpcji fosforu – według metody Van Huay’a uproszczonej przez Pagela [Pagel i Van Huay 1976, Pagel i in. 1981], stężenie fosforu oznaczano kolorymetrycznie z molibdenianem amonu i kwasem askorbinowym w obecności soli antymonu.

W tym celu glebę poddawano ekstrakcji dwoma roztworami: $0,01 \text{ mol}\cdot\text{dm}^{-3} \text{CaCl}_2$ oraz roztworem $0,01 \text{ mol}\cdot\text{dm}^{-3} \text{CaCl}_2$ zawierającym dodatkowo 5 mg Pdm^{-3} w postaci $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$. Po dwóch godzinach ustalania równowagi oznaczano stężenie fosforu w obu roztworach.

Obliczano:

- I_a – stężenie P w roztworze chlorku wapnia, określając ilość fosforu, którą gleba może desorbować – wynik podawano w $\text{mg P}\cdot\text{dm}^{-3}$ lub $\text{mg P}\cdot\text{kg}^{-1}$ po przeliczeniu na masę gleby.
- I_b – stężenie P w roztworze wzbogaconym w fosfor, określając ilość tego składnika, jaką gleba może sorbować.

Uzyskane wyniki posłużyły do wyliczenia parametrów sorpcji z równania:

$$dQ = n\sqrt{I} + b$$

gdzie: dQ – adsorpcja względnie desorpcja fosforu,

I – stężenie fosforu w stanie równowagi,

b i n – stałe charakterystyczne dla gleby: b – teoretyczna ilość fosforu, którą gleba może desorbować, n – intensywność wiązania fosforu przez glebę – wartość obrazująca buforowość gleby w stosunku do tego składnika.

Równania izotermy opisujące przebieg sorpcji fosforu z roztworów o niskich stężeniach, które zwykle występują w glebie, pozwoliły także na wyznaczenie stężenia równowagi fosforu (I_0) w glebach, odpowiadającemu stężeniu P w roztworze glebowym, przy którym procesy adsorpcji i desorpcji ilościowo się równo-

ważą ($dQ = 0$); za pomocą równania określać można zdolność buforową gleb względem fosforu dQ/dI ;

- indeks sorpcji fosforu według Bache – testowanie gleb przeprowadzono i obliczono wg opisu zmieszczzonego w opracowaniu Bache i Williams [1971].

Próbki gleby wytrząsano z roztworem $0,02 \text{ mol}\cdot\text{dm}^{-3}$ KCl zawierającym $2,5 \text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{P}$, czyli $77,5 \text{ mg P}\cdot\text{dm}^{-3}$, przy stosunku gleby do roztworu 1:20 przez 18 godzin. Z różnicy stężenia początkowego i końcowego obliczano ilość fosforu zatrzymanego przez fazę stałą gleby.

3.6. Technika opracowania wyników

Wyniki analiz próbek glebowych pobranych z terenu poddano podstawowej analizie statystycznej, obliczając współczynniki zmienności. Wszystkie wyniki doświadczenia polowego poddano ocenie statystycznej z zastosowaniem analizy wariancji dla doświadczeń dwuczynnikowych w układzie zależnym (program AWA), a doświadczeń wazonowych za pomocą programu komputerowego ANOVA. Przeprowadzono również analizę korelacji programem Statistica w celu ustalenia występowania zależności pomiędzy badanymi cechami.

4. Omówienie wyników badań

4.1. Badania terenowe

4.1.1. Gleby pól uprawnych południowo-zachodniej Polski

Właściwości fizyczno-chemiczne

W zasadniczym stopniu o właściwościach gleb decyduje udział poszczególnych frakcji w masie gleby. Właściwości sorpcyjne są zdeterminowane udziałem i jakością cząstek ilastych, ponieważ mają dużą pojemność sorpcyjną zarówno w stosunku do wody, jak i rozpuszczonych w niej soli. Rozdrobnienie cząstek gleby zwiększa powierzchnię sorpcyjną, stąd pojemność gleb ilastych jest bardzo duża.

Tabela 9

Table 9

Skład granulometryczny gleb
Granulometric composition of soils

Nr gleby Soil No.	Zawartość frakcji Fraction content		Skład granulometryczny Granulometric composition	Nr gleby Soil No.	Zawartość frakcji Fraction content		Skład granulometryczny Granulometric composition
	<0,02	<0,002			<0,02	<0,002	
1.	25	9	gl	30.	25	4	gl
2.	25	7	gl	31.	21	7	gl
3.	34	7	glp	32.	21	5	gl
4.	10	5	psp	33.	11	4	pgl
5.	9	3	psp	34.	9	3	ps
6.	18	9	pgm	35.	43	7	pli
7.	16	5	pgm	36.	24	7	gl
8.	12	5	pgl	37.	33	14	gl
9.	23	10	gl	38.	20	7	pgm
10.	8	3	ps	39.	19	6	pgm
11.	12	3	pgl	40.	8	1	ps
12.	13	5	pgl	41.	24	6	gl
13.	13	4	pgl	42.	12	5	pgl
14.	5	2	pl	43.	9	5	ps

Tabela 9 cd.
Table 9 cont.

15.	10	4	psp	44.	21	7	gl
16.	25	7	gl	45.	35	7	glp
17.	8	2	ps	46.	25	7	gl
18.	8	4	ps	47.	45	10	pli
19.	21	8	gl	48.	21	7	gl
20.	15	5	pglp	49.	35	9	glp
21.	20	7	pghm	50.	32	12	glp
22.	10	3	ps	51.	33	14	glp
23.	26	8	glp	52.	30	10	gl
24.	21	5	glp	53.	43	11	pli
25.	22	8	gl	54.	20	7	pghm
26.	46	10	pli	55.	33	14	glp
27.	9	4	ps	56.	29	10	glp
28.	26	7	glp	57.	42	21	gsp
29.	9	4	ps				

Pomimo obowiązywania nowych norm oceny składu granulometrycznego gleb, PN-R-04033 I FAO-USDA, ustalających rozmiary frakcji: piasek: 2,0–0,05, pył: 0,05–0,002 i il < 0,002, w pracy posłużono się starym podziałem ze względu na konieczność wyceny stanu zakwaszenia i zasobności gleb zgodnie z obowiązującymi zaleceniami IUNG.

Gleby pól produkcyjnych południowo-zachodniej Polski wytypowane do badań charakteryzowały się zróżnicowaną zawartością frakcji o średnicy <0,02 mm, której udział wahał się od 5% w glebie 14. do 46% w glebie 26. (tab. 9). Udział frakcji koloidalnej badanych gleb był również silnie zróżnicowany, zawierał się w przedziale od 1 do 21%. Ponad połowa gleb zawierała od 10 do 20% części spławialnych, co pozwalało zaliczyć je do gleb średnich. Najmniej, bo tylko 5, było gleb ciężkich. Natomiast gleb zaliczanych do bardzo lekkich i lekkich było po 13 prób. Większość gleb wykorzystanych w badaniach wykazywała skład granulometryczny charakterystyczny dla glin oraz piasków (tab. 9). Tylko 4 gleby wykazywały skład pyłów ilastych.

Zakwaszenie badanych gleb było również zróżnicowane. Odczyn gleb wahał się od pH 4,0 do pH 7,0 (średnia wartość liczona ze stężenia jonów wynosiła 5,4). Gleby o małej zawartości części spławialnych (poniżej 10%), a więc gleby bardzo lekkie, charakteryzowały się głównie odczynem kwaśnym i lekko kwaśnym. Ich kwasowość wymienna oznaczana jako pH w roztworze KCl o stężeniu 1 mol·dm⁻³ mieściła się w przedziale od 4,8 do 6,5.

W glebach lekkich, o zawartości części spławialnych od 10 do 20%, odczyn wahał się w przedziale pH 5,1–7,0, co świadczy o dużym zróżnicowaniu zakwaszenia tych gleb. Wśród gleb średnich można było zaobserwować jeszcze większe zróżnicowanie kwasowości wymiennej. Gleby te charakteryzowały się odczynem od silnie kwaśnego po obojętny, a ich pH mierzone w roztworze KCl o stężeniu 1 mol·dm⁻³ wahało się od 4,0 w glebie nr 1. do pH 7,0 w glebie nr 57. Gleby ciężkie, stanowiące najmniej liczną grupę spośród badanych gleb, wykazywały najmniejsze zakwaszenie. Odczyn tych gleb wahał się od 5,9 do 7,0, a więc mieściły się w przedziale lekko kwaśnych i obojętnych.

Dokładniej stan zakwaszenia gleb odzwierciedla pomiar ich kwasowości hydrolitycznej. W badaniach własnych jej wartości wahały się od 4,4 do 42 mmol(+)-kg⁻¹ gleby (średnia wartość wynosiła 18,3 mmol(+)-kg⁻¹ gleby. Najmniej zakwaszone okazały się gleby ciężkie, ich Hh wynosiła średnio 9,6 mmol(+)-kg⁻¹ gleby. W pozostałych glebach nie stwierdzano zależności pomiędzy kategorią ciężkości a ich zakwaszeniem. Wśród gleb o wysokich wartościach kwasowości hydrolitycznej znajdowała się gleba średnia (1.) i gleba lekka (12.) o Hh = 42 mmol(+)-kg⁻¹, jak i gleby bardzo lekkie (4., 5., 14., 15.), dla których wartości Hh przekraczały 30 mmol(+)-kg⁻¹ (tab. 10).

Tabela 10
Table 10

Stan zakwaszenia gleb
Soil acidification status

Nr gleby Soil No.	pH KCl	Hh	Nr gleby Soil No.	pH KCl	Hh
		mmol(+)-kg ⁻¹			mmol(+)-kg ⁻¹
1.	4,0	42,0	30.	6,0	15,8
2.	4,7	28,0	31.	6,0	16,6
3.	4,7	29,8	32.	6,1	12,3
4.	4,8	36,8	33.	6,1	20,1
5.	5,1	34,1	34.	6,1	22,8
6.	5,1	29,8	35.	6,1	14,9
7.	5,2	37,6	36.	6,1	17,5
8.	5,3	23,6	37.	6,1	16,6
9.	5,3	28,9	38.	6,2	13,1
10.	5,4	20,1	39.	6,3	12,3
11.	5,4	34,1	40.	6,3	15,8
12.	5,5	42,0	41.	6,3	12,3
13.	5,5	20,1	42.	6,4	16,6
14.	5,5	31,5	43.	6,5	8,8
15.	5,5	35,9	44.	6,6	7,9
16.	5,5	23,6	45.	6,7	8,8
17.	5,7	14,0	46.	6,7	8,8
18.	5,7	27,1	47.	6,9	7,0
19.	5,7	19,3	48.	6,9	7,0
20.	5,8	13,1	49.	6,9	8,8
21.	5,8	14,0	50.	6,9	7,0
22.	5,8	23,4	51.	6,9	7,0
23.	5,8	21,9	52.	6,9	7,0
24.	5,9	16,6	53.	7,0	5,3
25.	5,9	16,6	54.	7,0	7,0
26.	5,9	16,6	55.	7,0	6,1
27.	5,9	14,0	56.	7,0	7,0
28.	5,9	15,8	57.	7,0	4,4
29.	6,0	20,1			

W glebach mineralnych, wybranych pól uprawnych południowo-zachodniej Polski, zawartość węgla organicznego była zróżnicowana i wahała się w przedziale od 4,56 do 32,3 g $C_{org} \cdot kg^{-1}$ gleby (tab. 11). Ponad 40% pobranych gleb charakteryzowało się bardzo niską zawartością węgla organicznego, poniżej 10 g $C_{org} \cdot kg^{-1}$ gleby. Nieco większą zawartość, od 10 do 20 g C_{org} , w kilogramie gleby stwierdzono w blisko połowie próbek glebowych. Natomiast tylko 5 spośród pobranych gleb wykazywało nieco wyższą zawartość substancji organicznej, przekraczającą 20 g $C_{org} \cdot kg^{-1}$.

Zawartość azotu ogólnego w badanych glebach wahała się od 0,45 do 2,65 g kg^{-1} , wynosząc średnio 1,13 g w kilogramie gleby. Małe ilości azotu ogólnego odnajdywano w glebach bardzo lekkich (średnio 0,84 g kg^{-1}), natomiast gleby zaliczane do kategorii ciężkich zawierały o ponad 50% więcej tego składnika (średnio 1,29 g $N \cdot kg^{-1}$).

Pomiędzy substancją organiczną a zawartością azotu w glebach istnieje zależność decydująca o przyswajalności azotu i szybkości rozkładu substancji organicznej opisywana bardzo często poprzez stosunek C:N. W warstwie ornej większości gleb uprawnych waha się on w granicach od 8:1 do 15:1, najczęściej przybierając wartości pomiędzy 10:1 a 12:1. Większość resztek organicznych dostających się do gleby zawiera duże ilości węgla, a małe azotu i dlatego stosunek węgla do azotu jest w nich szeroki.

Dane zawarte w tabeli 11 wskazują, że w badanych glebach stosunek C:N wahał się od 8,2:1 do 13,9:1. Gleby zaliczane do gleb bardzo lekkich przeważnie wykazywały szerszy stosunek C:N (średnio 11,4:1) niż gleby ciężkie (średnio 9:1), co świadczy najprawdopodobniej o stosowanym w warunkach gleb lekkich nawożeniu organicznym. Większość, 25 próbek glebowych, charakteryzowała się stosunkiem C:N powyżej 10:1.

Tabela 11
Table 11

Zawartość węgla organicznego i azotu ogólnego
Content of organic carbon and total nitrogen

Nr gleby Soil No.	C_{org}	N_{og}	C:N	Nr gleby Soil No.	C_{org}	N_{og}	C:N
	[g kg^{-1}]				[g kg^{-1}]		
1.	6,45	0,76	8,5	30.	9,48	0,99	9,6
2.	6,39	0,68	9,4	31.	12,60	1,23	10,2
3.	7,66	0,85	9,0	32.	7,22	0,75	9,6
4.	9,37	0,86	10,9	33.	14,38	1,52	9,5
5.	9,90	0,96	10,3	34.	15,26	1,40	10,9
6.	15,42	1,58	9,8	35.	10,28	1,23	8,4
7.	16,06	1,56	10,3	36.	14,18	1,35	10,5
8.	6,60	0,55	12,0	37.	16,88	1,70	9,9
9.	13,38	1,34	10,0	38.	8,66	0,97	8,9
10.	9,28	0,74	12,5	39.	7,99	0,83	9,6
11.	13,72	1,14	12,0	40.	9,22	0,81	11,4
12.	31,68	2,58	12,3	41.	13,64	1,52	9,0
13.	7,43	0,69	10,8	42.	14,06	1,47	9,6
14.	9,53	0,77	12,4	43.	5,55	0,45	12,3

Tabela 11 cd.
Table 11 cont.

15.	19,37	1,83	10,6	44.	10,84	1,14	9,5
16.	11,59	1,29	9,0	45.	8,88	0,96	9,3
17.	5,30	0,51	10,4	46.	15,42	1,11	13,9
18.	13,6	1,19	11,4	47.	10,36	1,26	8,2
19.	9,68	0,96	10,1	48.	10,82	1,10	9,8
20.	4,56	0,52	8,8	49.	17,99	1,71	10,5
21.	7,43	0,79	9,4	50.	16,19	1,40	11,6
22.	14,62	1,25	11,7	51.	32,30	2,60	12,4
23.	19,12	1,61	11,9	52.	31,91	2,65	12,0
24.	8,86	0,94	9,4	53.	11,00	1,20	9,2
25.	8,38	0,88	9,5	54.	18,04	1,79	10,1
26.	10,15	1,23	8,3	55.	20,92	2,09	10,0
27.	8,43	0,74	8,5	56.	23,74	1,99	11,9
28.	10,74	1,18	9,1	57.	16,75	1,54	10,9
29.	9,68	0,81	12,0				

Stan fosforowy

Testy pojemności (statyczne)

Ze względu na duże zróżnicowanie rozpuszczalności związków fosforu występujących w glebie do szacowania możliwości zaopatrzenia roślin w ten składnik nie jest przydatne określanie fosforu całkowitego w glebie. Jego ilość jest zależna od zawartości w skale macierzystej czy nagromadzenia substancji organicznej, jednak na glebach uprawnych o wielkości rezerw P decyduje przede wszystkim ich historia nawożenia [Pondel 1974, Czuba i Andruszczak 1990, Łabętowicz i in. 2002]. Ilości fosforu całkowitego oznaczonego w glebach badanych pól uprawnych położonych na terenie południowo-zachodniej Polski były bardzo zróżnicowane i wahały się od 282 do 2290 mg P·kg⁻¹ (tab. 12). Tak duże wahania w zawartości P całkowitego świadczą o znacznym zróżnicowaniu ilości fosforu wnoszonych do gleb z nawozami.

Tabela 12
Table 12

Zawartość fosforu całkowitego Total phosphorus content

Nr gleby Soil No.	P _{całkowity} Total P [mg·kg ⁻¹]	Nr gleby Soil No.	P _{całkowity} Total P [mg·kg ⁻¹]	Nr gleby Soil No.	P _{całkowity} Total P [mg·kg ⁻¹]
1.	722	20.	421	39.	842
2.	627	21.	545	40.	1380
3.	642	22.	1519	41.	1387
4.	713	23.	1554	42.	1906
5.	729	24.	822	43.	943

Tabela 12 cd.
Table 12 cont.

6.	671	25.	848	44.	1088
7.	1143	26.	1008	45.	1125
8.	829	27.	882	46.	1051
9.	815	28.	707	47.	1362
10.	863	29.	943	48.	1014
11.	1377	30.	1356	49.	1989
12.	1187	31.	1213	50.	1790
13.	855	32.	884	51.	1077
14.	1541	33.	1416	52.	1784
15.	1603	34.	1470	53.	1641
16.	840	35.	1284	54.	1443
17.	552	36.	1682	55.	930
18.	1037	37.	1064	56.	2290
19.	627	38.	876	57.	1425
Średnia zawartość P_{całkowitego} [mg·kg⁻¹] Average content of total phosphorus				1129	

W zależności od warunków klimatyczno-glebowych dostępne dla roślin związki fosforu oznaczane są zwykle poprzez analizę chemiczną gleb roztworami o zróżnicowanej zdolności ekstrakcyjnej i stanowią zwykle tylko kilka procent całkowitej zawartości tego składnika w glebach.

Obecnie znanych jest co najmniej kilkadziesiąt różnych sposobów ekstrakcji z gleby fosforu łatwo rozpuszczalnego, potencjalnie dostępnego dla roślin. Jako roztwory ekstrakcyjne używane są m.in. woda, słabe kwasy mineralne, kwasy organiczne, mocne kwasy, sole, zasady. W Polsce do oceny zasobności gleb w przyswajalny fosfor stosowana jest metoda Egnera-Riehma, a w licznych badaniach podkreśla się przydatność tej metody do określania fosforu przyswajalnego dla roślin [Fotyma i in. 1996, Gosek i Boreczek 1998].

Spośród glebowych testów fosforu wykorzystanych w badaniach gleb pól uprawnych południowo-zachodniej Polski najczęściej tego składnika (od 65 do 490 mg·kg⁻¹) przechodziło do roztworu stosowanego w teście Egnera-Riehma. Za pomocą tej metody, najlepiej rozpuszczającej fosfor znajdujący się w glebie w postaci fosforanów wapnia, a więc w takiej samej jak w większości stosowanych nawozów mineralnych, ekstrahowano od 9,2 do 31,8% całkowitej ilości P w glebie. Przeciętnie w badanych glebach fosfor oznaczony tą metodą stanowił około 16% fosforu całkowitego.

Metoda Egnera-Riehma stosowana jest w naszym kraju do oceny zasobności gleb w celu ustalenia zaleceń nawozowych. Na podstawie tego testu wyznacza się optymalne dawki nawozów fosforowych [Fotyma i in. 1976, 1989, Fotyma 1978].

Pomimo że w warunkach gleb Polski wskaźnik bonitacji negatywnej jest bardzo wysoki i przekracza 60%, żadna z analizowanych gleb nie należała do gleb o bardzo niskiej i niskiej zasobności, a tylko jedna próbka charakteryzowała się średnią zasobnością w fosfor oznaczony metodą Egnera-Riehma.

Wyniki zamieszczone w tabeli 13 wskazują, że większość próbek, bo aż 49 spośród 57 analizowanych, charakteryzowało się bardzo wysoką zasobnością w fosfor. Takie gleby uprawne, szczególnie jeśli są położone w pobliżu zbiorników wodnych lub na stokach, potencjalnie mogą stanowić zagrożenie dla środowiska wodnego.

W badaniach przeprowadzonych testami statycznymi, z ogólnej puli fosforu zawartego w glebie, ilości P oznaczane testem Mehlich-3 były mniejsze niż testem Egnera-Riehma (tab. 14). Średnio fosfor ekstrahowany tą metodą stanowił 11,3% P całkowitego. W wartościach bezwzględnych testem tym stwierdzano od niespełna 59,6 do 203,1 mg P·kg⁻¹.

Metoda ta w Polsce nie jest powszechnie stosowana, lecz coraz częściej testowana do oznaczeń wspólnych dla makro- i mikroskładników. Prowadzone w wielu krajach badania potwierdziły, że nadaje się do oznaczania fosforu, potasu, magnezu, sodu, siarki, żelaza, manganu, cynku i miedzi [Mehlich 1978].

Tabela 13

Table 13

Zawartość P rozpuszczalnego i jego udział w P całkowitym, test Egnera-Riehma
Content of soluble P and percentage of total P, the Egner-Riehm test

Nr gleby Soil No.	P _{Egnera-Riehma} [mg·kg ⁻¹] Egner-Riehm P	Udział P _{Egnera-Riehma} w P _{całkowitym} [%] Part of Egner- -Riehm P in total P	Nr gleby Soil No.	P _{Egnera-Riehma} [mg·kg ⁻¹] Egner-Riehm P	Udział P _{Egnera-Riehma} w P _{całkowitym} [%] Part of Egner- -Riehm P in total P
1.	98	13,6	30.	153	11,3
2.	74	11,8	31.	172	14,2
3.	71	11,1	32.	104	11,8
4.	109	15,3	33.	131	9,3
5.	76	10,4	34.	299	20,3
6.	140	20,9	35.	131	10,2
7.	164	14,3	36.	199	11,8
8.	147	17,7	37.	98	9,2
9.	140	17,2	38.	87	9,9
10.	181	21,0	39.	118	14,0
11.	276	20,0	40.	194	14,1
12.	238	20,0	41.	216	15,6
13.	136	15,9	42.	395	20,7
14.	490	31,8	43.	159	16,9
15.	447	27,9	44.	178	16,4
16.	136	16,2	45.	150	13,3
17.	76	13,8	46.	168	16,0
18.	221	21,3	47.	175	12,8
19.	121	19,3	48.	242	23,9
20.	65	15,4	49.	396	19,9

Tabela 13 cd.
Table 13 cont.

21.	76	14,0	50.	377	21,1
22.	337	22,2	51.	327	30,4
23.	242	15,6	52.	277	15,5
24.	76	9,2	53.	175	10,7
25.	98	11,6	54.	262	18,2
26.	104	10,3	55.	120	12,9
27.	164	18,6	56.	469	20,5
28.	134	19,0	57.	196	13,8
29.	233	24,7			
Średnia zawartość P_{Egnera-Riehma} [mg·kg⁻¹] Average content of Egner-Riehm P				190	
Średni udział P_{Egnera-Riehma} w P_{całkowitym} [%] Average part of Egner-Riehm P in total P				16,4	

Tabela 14
Table 14

Zawartość fosforu rozpuszczalnego i jego udział w P całkowitym, test Mehlich-3
Content of soluble P and percentage of total P, the Mehlich-3 test

Nr gleby Soil No.	P _{Mehlich-3} [mg·kg ⁻¹] Mehlich-3 P	Udział P _{Mehlich-3} w P _{całkowitym} [%] Part of Mehlich-3 P in total P	Nr gleby Soil No.	P _{Mehlich-3} [mg·kg ⁻¹] Mehlich-3 P	Udział P _{Mehlich-3} w P _{całkowitym} [%] Part of Mehlich-3 P in total P
1.	98,2	13,6	30.	86,5	6,4
2.	92,3	14,7	31.	75,9	6,3
3.	91,2	14,2	32.	74,5	8,4
4.	86,9	12,2	33.	74,5	5,3
5.	85,3	11,7	34.	70,9	4,8
6.	85,3	12,7	35.	74,8	5,8
7.	87,2	7,6	36.	72,2	4,3
8.	86,5	10,4	37.	71,8	6,7
9.	85,1	10,4	38.	79,2	9,0
10.	83,9	9,7	39.	59,6	7,1
11.	123,8	9,0	40.	96,2	7,0
12.	131,6	11,1	41.	99,2	7,2
13.	133,6	15,6	42.	98,9	5,2
14.	123,8	8,0	43.	103,8	11,0
15.	119,4	7,5	44.	116,9	10,7
16.	108,7	12,9	45.	111,1	9,9
17.	108,0	19,6	46.	109,2	10,4

Tabela 14 cd.
Table 14 cont.

18.	109,5	10,6	47.	107,6	7,9
19.	107,9	17,2	48.	101,7	10,0
20.	105,5	25,1	49.	93,9	4,7
21.	115,7	21,2	50.	114,1	6,4
22.	112,6	7,4	51.	104,8	9,7
23.	113,6	7,3	52.	95,2	5,3
24.	111,4	13,6	53.	149,8	9,1
25.	198,1	23,4	54.	157,8	10,9
26.	194,8	19,3	55.	156,2	16,8
27.	203,1	23,0	56.	155,6	6,8
28.	198,2	28,1	57.	156,2	11,0
29.	197,4	20,9			
Średnia zawartość P _{Mehlich-3} [mg·kg ⁻¹] Average content of Mehlich-3 P			111,7		
Średni udział P _{Mehlich-3} w P _{całkowitym} [%] Average part of Mehlich-3 P in total P			11,3		

Test intensywności (ruchliwości)

Oznaczanie ruchliwości fosforanów szybkim testem P aktywnego pozwala na określenie aktualnie dostępnych fosforanów występujących w formie szybko ustalającej się równowagi z roztworem glebowym [Fotyma i in. 1991]. Na podstawie uzyskanych wyników można modyfikować wyznaczoną z zaleceń dawkę fosforu stosowaną w nawozach. Zwiększenie dawki zalecane jest, gdy pomimo wysokiej zasobności w fosfor ruchomy gleby wykazują niskie stężenie P aktywnego. Wysokie stężenie formy aktywnej, pomimo niskiej zasobności gleby w fosfor ruchomy, jest wskazaniem do zmniejszenia dawek tego składnika.

Przeciętne stężenie P aktywnego w pobranych glebach pól uprawnych można uznać za wysokie, gdyż wynosiło 1,01 mg P·dm⁻³, mieszcząc się w przedziale od 0,18 do 4,93 mg P·dm⁻³ (tab. 15).

W roztworze glebowym znajduje się zwykle mniej fosforu, przeciętnie wartość ta szacowana jest na 0,04 do 0,2 mg P·dm⁻³, natomiast na glebach zasobnych w fosfor na 0,4–0,9 mg P·dm⁻³ [Moskal 1999]. Nowsze, kompleksowe badania Łabętowicza i Rutkowskiej [2001] nad wpływem różnych czynników na modyfikację stężenia składników pokarmowych w roztworach glebowych wykazały, że stężenie fosforanów glebowych warunkach gleb Polski może się mieścić w przedziale od 0,2 do 4,0 mg P·dm⁻³.

Testem P-aktywnego oznaczana jest ruchliwość fosforanów. Zwykle z całkowitej puli fosforu glebowego do roztworu CaCl₂ przechodzi tylko niewielka jego ilość. W badaniach własnych, po przeliczeniu stężenia P na masę gleby, stwierdzono, że przeciętnie 0,45% P całkowitego stanowił P aktywny. Najmniejszy udział P aktywnego stanowiący zaledwie 0,07% całkowitej zawartości badanego składnika stwierdzono w glebach o małej ruchliwości fosforanów (<0,3 mg P·dm⁻³) oraz niskich zawartościach fosforu całkowitego i małej

zasobności w formy rozpuszczalne tego składnika. Świadczyć to może o gospodarowaniu z wysokim, ujemnym bilansem tego składnika. Mniejszą rozpuszczalność i ruchliwość fosforanów w glebach charakteryzujących się niewielką zawartością tego składnika wykazali również inni autorzy.

Najwyższe stężenie P aktywnego $4,93 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$ stwierdzono w glebie zasobnej w ruchomy P Egnera-Riehma ($490 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) i zawierającej ponad $1,5 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ P całkowitego. Udział P aktywnego w tej glebie stanowił 1,6% P całkowitego i był zapewne efektem wniesienia dużych dawek nawozów zawierających fosfor.

Tabela 15
Table 15

Stężenie P aktywnego oraz jego udział w P całkowitym
Concentration of active phosphorus and percentage of total phosphorus

Nr gleby Soil No.	P aktywny [$\text{mg}\cdot\text{dm}^{-3}$] Active P	P aktywny P całkowitego [%] Part of active P in total P %	Nr gleby Soil No.	P aktywny [$\text{mg}\cdot\text{dm}^{-3}$] Active P	P aktywny P całkowitego [%] Part of active P in total P
1.	0,437	0,30	30.	0,758	0,28
2.	0,621	0,50	31.	1,266	0,52
3.	0,472	0,37	32.	0,770	0,44
4.	0,206	0,14	33.	0,398	0,14
5.	0,633	0,43	34.	1,892	0,64
6.	0,663	0,49	35.	0,660	0,26
7.	0,531	0,23	36.	0,536	0,16
8.	0,582	0,35	37.	0,371	0,17
9.	1,033	0,63	38.	0,347	0,20
10.	0,531	0,31	39.	0,566	0,34
11.	1,850	0,67	40.	0,989	0,36
12.	0,919	0,39	41.	0,696	0,25
13.	1,084	0,63	42.	1,733	0,45
14.	4,927	1,60	43.	0,707	0,38
15.	3,469	1,08	44.	0,771	0,35
16.	1,068	0,64	45.	0,723	0,32
17.	0,719	0,65	46.	0,653	0,31
18.	2,206	1,06	47.	0,867	0,32
19.	1,138	0,91	48.	0,300	0,15
20.	0,481	0,57	49.	2,510	0,63
21.	0,269	0,25	50.	0,720	0,20
22.	2,463	0,81	51.	1,025	0,48
23.	1,709	0,55	52.	0,891	0,25
24.	0,802	0,49	53.	0,687	0,21
25.	0,872	0,51	54.	0,270	0,09
26.	0,570	0,28	55.	0,182	0,10
27.	1,138	0,65	56.	1,526	0,33

Tabela 15 cd.
Table 15 cont.

28.	1,256	0,89	57.	0,203	0,07
29.	1,951	1,04			
Średnie stężenie P _{aktywnego} [mg·dm ⁻³] Average concentration of active P			1,01		
Średni udział P _{aktywnego} w P _{całkowitym} [%] Average part of active P in total P			0,45		

Właściwości sorpcyjne gleb względem fosforu

Możliwości wymywania fosforanów nie zależą wprost od ich zawartości w glebie, ale od stopnia wysycenia jej fosforanami, dlatego też podejmowane są liczne badania nad określeniem pojemności sorpcyjnej gleb oraz stopnia ich wysycenia fosforanami [Djodjic i Bergstrom 2005, Ulen i in. 2011, Andersson i in. 2013].

W badaniach własnych do oceny właściwości sorpcyjnych gleb względem fosforu stosowano metodę Van Huay'a, uproszczoną przez Pagela. Uzyskane wyniki zamieszczono w tabeli 16. Ilości fosforu, który w ciągu 2 godzin był uwalniany z gleb do roztworu CaCl₂, wahały się w bardzo szerokich granicach od 0,26 do 4,22 mg P·kg⁻¹.

Tabela 16
Table 16

Parametry sorpcji fosforu wyznaczone uproszczoną metodą Pagela
Phosphorus sorption parameters determined by a simplified Pagel method

Nr gleby Soil No.	Stężenie P w roztworze CaCl ₂ P concentration in CaCl ₂ solution	Stężenie P w roztworze CaCl ₂ + P P concentration in CaCl ₂ solution + P	Nr gleby Soil No.	Stężenie P w roztworze CaCl ₂ P concentration in CaCl ₂ solution	Stężenie P w roztworze CaCl ₂ + P P concentration in CaCl ₂ solution + P
	I _a	I _b		I _a	I _b
	[mg·dm ⁻³]			[mg·dm ⁻³]	
1.	0,43	2,66	30.	0,66	3,21
2.	0,58	3,47	31.	0,87	3,76
3.	0,47	3,31	32.	0,53	3,83
4.	0,24	2,31	33.	0,36	2,42
5.	0,64	3,72	34.	1,33	4,53
6.	0,86	3,76	35.	0,53	2,55
7.	0,53	2,55	36.	0,46	2,14
8.	0,55	3,86	37.	0,30	2,33
9.	0,93	3,83	38.	0,28	2,70
10.	0,44	3,51	39.	0,12	3,42
11.	1,63	4,55	40.	0,80	3,62
12.	0,80	2,45	41.	0,55	2,62

Tabela 16 cd.
Table 16 cont.

13.	0,91	4,37	42.	1,30	4,13
14.	4,22	7,76	43.	0,57	3,36
15.	2,88	6,26	44.	0,67	3,44
16.	0,86	3,77	45.	0,58	2,96
17.	0,45	3,98	46.	0,54	2,36
18.	1,82	5,23	47.	0,75	2,80
19.	0,84	4,10	48.	0,28	2,35
20.	0,46	1,69	49.	3,02	5,06
21.	0,26	2,87	50.	0,66	2,53
22.	1,85	4,53	51.	0,95	2,62
23.	1,21	4,03	52.	0,78	2,75
24.	0,59	2,88	53.	0,63	2,44
25.	0,71	3,99	54.	0,32	1,73
26.	0,52	2,71	55.	0,23	1,73
27.	0,84	4,02	56.	1,30	3,49
28.	0,82	4,12	57.	0,29	1,45
29.	1,47	4,81			
Średnie stężenie P w roztworze CaCl ₂ [mg·dm ⁻³] Average P concentration in CaCl ₂ solution				0,85	
Średnie stężenie P w roztworze CaCl ₂ + P [mg·dm ⁻³] Average P concentration in CaCl ₂ solution + P				3,39	

Podobnie jak w przypadku wyników uzyskanych testem P aktywnego duże ilości fosforu przechodzącego do roztworu Ia, czyli ulegającego desorpcji, stwierdzano w glebach 11., 14., 18., 22. i 49., gdyż stężenie desorbowanego fosforu przekraczało 1,5 mg P·dm⁻³. Gleby te wyróżniały się także bardzo wysokimi wartościami parametru *b* – wynoszącymi powyżej 40 mg P·kg⁻¹. Parametr ten wskazuje teoretyczną ilość fosforu, którą można desorbować z gleb, która w przypadku tych gleb mieściła się w przedziale od 41,01 do 130,3 mg P·kg⁻¹.

Silę wiązania fosforu przez gleby charakteryzuje parametr *n*, który w odniesieniu do badanych gleb wahał się od 11,12 do 60,79 (tab. 17). Najwyższymi wartościami tego parametru (powyżej 40) charakteryzowały się gleby 12., 20., 37., 50.–52., 54.–56.

Metoda wyznaczania parametrów sorpcji uwzględnia ekstrakcję gleb roztworem CaCl₂ z dodatkiem P. Stężenie fosforu w roztworze po tej ekstrakcji wskazuje na możliwości wiązania tego składnika przez gleby. Im stężenie fosforu w roztworze (*I_b*) jest niższe, tym siła wiązania fosforu przez gleby większa. Jeśli stężenie fosforu w roztworze (*I_b*) przekracza 5 mg P·kg⁻¹, świadczy to, że gleby nie sorbują już fosforu, tylko uwalniają go do roztworu. Miało to miejsce podczas analizy gleb nr 14., 15., 18. oraz 50. Gleby te zamiast sorbować, uwalniały fosfor do roztworu (tab. 16).

Proces ten zachodzi zwykle w glebach po nawożeniu lub pobieraniu składników pokarmowych przez rośliny i trwa aż do osiągnięcia stężenia równowagi pomiędzy procesami sorpcji i desorpcji (*I_{równ.}*). Najwyższe stężenie *I_{równ.}* stwierdzono w glebie nr 14., wynosiło

ono 17,4 mg P·dm⁻³ i świadczy o nieprawidłowym stosowaniu nawozów zawierających fosfor prowadzącym do nadmiernego nagromadzenia fosforu w tej glebie. Bezpieczne dla środowiska, a równocześnie zapewniające roślinom prawidłowe, dobre zaopatrzenie w fosfor ma miejsce, kiedy $I_{równ.}$ przybiera wartości pomiędzy 0,6 a 2,0 mg P·dm⁻³ (tab. 17).

W warunkach prowadzonych badań najniższą wartość $I_{równ.}$ 0,20 mg·dm⁻³ stwierdzono w glebie nr 40., która charakteryzowała się również małą siłą wiązania fosforu ($n \approx 11$) i małą ilością fosforu możliwego do desorpcji ($b \approx 5$ mg P·kg⁻¹), pomimo wykonanej bardzo wysokiej zasobności gleby w P-Egnera-Riehma i dużej zawartości 96,2 mg·kg⁻¹ P-Mehlich-3. Z kolei w glebie 20. zasobność P wg Egnera-Riehma była najniższa spośród badanych gleb, natomiast stężenie $I_{równ.}$ w tej glebie było prawie trzykrotnie wyższe niż w glebie 40., która zawierała dwukrotnie mniej P stwierdzonego testem Egnera-Riehma, w porównaniu z glebą 20.

Wydaje się więc, że stosowany powszechnie sposób oceny zasobności gleb w fosfor, polegający wyłącznie na ocenie zawartości fosforu za pomocą metody Egnera-Riehma, nie może być wskaźnikiem jednoznacznie określającym potencjalne zagrożenia środowiska fosforem z nawozów. Testem tym stwierdza się tylko ilość fosforu przechodzącego do roztworu, natomiast nie określamy losów P wniesionego do gleby.

Tabela 17
Table 17

Parametry sorpcji fosforu wyznaczone uproszczoną metodą Pagela
Phosphorus sorption parameters determined by a simplified Pagel method

Nr gleby Soil No.	Stężenie równowagi Concentration of equilibrium [mg P·dm ⁻³]	Siła wiązania fosforu Bonding strength of P <i>n</i>	Ilość P do desorpcji P quantity for desorption <i>b</i>	Nr gleby Soil No.	Stężenie równowagi Concentration of equilibrium [mg P·dm ⁻³]	Siła wiązania fosforu Bonding strength of P <i>n</i>	Ilość P do desorpcji P quantity for desorption <i>b</i>
		1.	0,65			28,36	-22,84
2.	1,12	19,12	-20,25	31.	1,16	25,14	-27,06
3.	0,87	19,13	-17,84	32.	1,82	21,07	-28,44
4.	0,33	28,33	-16,20	33.	1,23	13,84	-15,34
5.	1,38	17,00	-19,96	34.	0,52	30,77	-22,12
6.	1,80	20,88	-28,01	35.	3,51	18,47	-34,59
7.	0,78	34,37	-30,37	36.	0,78	34,47	-30,53
8.	1,29	13,72	-15,60	37.	0,61	42,19	-33,05
9.	1,97	21,01	-29,45	38.	0,42	30,48	-19,85
10.	0,89	15,94	-14,99	39.	0,43	23,16	-15,12
11.	3,79	24,15	-47,04	40.	0,2	11,25	-5,02
12.	1,11	49,66	-52,25	41.	1,61	21,62	-27,41
13.	2,65	13,49	-21,96	42.	0,82	33,63	-30,54
14.	17,40	19,95	-83,23	43.	2,79	24,32	-40,66
15.	9,76	20,20	-63,11	44.	1,07	20,56	-21,23
16.	1,80	20,54	-27,59	45.	1,28	21,62	-24,45

Tabela 17 cd.
Table 17 cont.

17.	1,17	11,12	-12,03	46.	0,95	27,28	-26,59
18.	5,88	16,91	-41,01	47.	0,75	39,65	-34,41
19.	2,11	15,80	-22,92	48.	1,14	36,38	-38,92
20.	0,57	60,79	-46,02	49.	0,4	29,42	-18,52
21.	0,41	20,17	-12,89	50.	5,11	57,67	-130,33
22.	3,89	30,20	-59,56	51.	0,95	40,05	-39,07
23.	2,58	23,96	-38,45	52.	1,34	52,05	-60,33
24.	0,95	29,26	-28,49	53.	1,17	39,13	-42,37
25.	1,74	14,94	-19,68	54.	0,89	41,71	-39,45
26.	0,80	30,50	-27,26	55.	0,39	47,4	-29,8
27.	2,01	16,75	-23,75	56.	0,29	42,1	-22,6
28.	2,10	15,18	-21,99	57.	2,18	38,47	-56,76
29.	0,65	28,36	-22,84				
Średnie stężenie I równowagi [mg P·dm⁻³] Average concentration of I equilibrium						1,94	
Średnia ilość P do desorpcji [mg P·kg⁻¹] Average P quantity for desorption						-32,4	

W celu wyznaczenia parametrów najbardziej wpływających na własności sorpcyjne gleb odnośnie fosforu przeprowadzono analizę zależności pomiędzy zawartością fosforu oznaczaną w glebach poszczególnymi testami a najważniejszymi ich właściwościami. Uzyskane zależności, opisywane przez równanie regresji o ogólnej postaci $Y = b + ax$ oraz współczynniki determinacji, zamieszczono w tabelach 18, 19, 20, jak również przedstawiono na wykresach z zaznaczonym 95% przedziałem ufności (rys.1–12).

Jak wynika z danych zamieszczonych w tabeli 18, stosowany do ekstrakcji roztwór Egnera-Riehma w największym stopniu zależał od całkowitej zawartości fosforu w glebie, a współczynnik determinacji wynosił $R^2 = 0,647$.

Ponad 50% uzyskanych wyników było opisywanych przez równanie regresji ($R \cdot 100 > 50$); otrzymane dla ilości fosforu możliwej do desorpcji (parametr b), ilości desorbowanego P do CaCl_2 (I_a) oraz P-aktywnego.

Nie stwierdzono zależności pomiędzy ilością fosforu ekstrahowanego metodą Egnera-Riehma i metodą Mehlicha-3 (tab. 18), podobnie jak i takimi właściwościami gleb jak procentowy udział poszczególnych frakcji czy kwasowość gleby. Uzyskane współczynniki determinacji były bardzo niskie i nie zamieszczono ich w tabelach.

Obliczone współczynniki determinacji przekraczały wartość 50; jedynie w przypadku wyników uzyskanych przy analizie parametrów sorpcji fosforu P-Egnera-Riehma, współczynników b , I_a oraz zawartości w glebie P-aktywnego.

W warunkach prowadzonych badań obliczano również współczynniki determinacji P-Egnera-Riehma z właściwościami gleb takimi jak: procentowy udział poszczególnych frakcji czy kwasowość gleby. Uzyskane współczynniki były jednak bardzo niskie i świadczyły o braku korelacji między zawartością fosforu oznaczonego tym testem a właściwościami gleby i nie zamieszczono ich w tabelach.

Tabela 18
Table 18

Zależność pomiędzy wskaźnikami stanu fosforowego gleb (Y) a ilością P-Egnera-Riehma (X)
The relationship between phosphorus levels in soils (Y)
and amount of P-Egner-Riehm (X)

Parametr gleby Soil parameter	Równanie regresji Regression equation	Współczynnik determinacji R ² :100 Coefficient of determination R ² :100
P całkowity Total P	$Y = 540,04 + 3,095 x$	64,7
Mehlich-3	$Y = 104,74 + 1,037 x$	1,2
P aktywny Active P	$Y = -0,073 + 0,006 x$	52,2
Parametr I rów. I equilibrium parameter	$Y = -1,042 + 0,016 x$	39,6
Parametr Ia Ia parameter	$Y = -0,105 + 0,050 x$	54,2
Parametr Ib Ib parameter	$Y = 2,460 + 0,005 x$	21,2
Parametr b b parameter	$Y = -6,149 - 0,133 x$	56,2

Zawartość fosforu w stanie równowagi okazała się skorelowana z parametrami sorpcji fosforu, takimi jak parametr *Ia* oraz w mniejszym stopniu parametr *Ib* (tab. 18). Wartość współczynnika determinacji (R²·100) wynosiła odpowiednio dla *Ia* 88,4, natomiast dla *Ib* 73,2. Największą jednak zależność fosfor w stanie równowagi wykazywał z ilością fosforu aktywnego. Współczynnik determinacji wynosił tu 90,2, co oznacza, że ponad 90% uzyskanych wyników jest opisywanych przez to równanie regresji. Może to świadczyć, że zamiast stosowania wyznaczania parametrów sorpcji fosforu w glebie można by wykorzystać bardzo prosty test P-aktywnego.

Istotnych korelacji pomiędzy zawartością fosforu w stanie równowagi a właściwościami gleby, jakimi były: procentowy udział frakcji, zawartość węgla organicznego oraz wskaźniki zakwaszenia gleby, nie stwierdzono.

Zawartość fosforu aktywnego okazała się w warunkach prowadzonych badań ściśle powiązana z wynikami uzyskanymi przy analizie parametrów sorpcji fosforu, takimi jak współczynnik *Ia* oraz *I* równowagi (R² > 90) (tab. 19).

Dla parametru *Ib* oraz dla zawartości w glebie fosforu mierzonego testem Egnera-Riehma, wartość współczynnika determinacji wynosiła odpowiednio 77,9 i 52,2, co oznacza, że również ponad połowa wartości uzyskana dla badanych próbek była opisywana przez równanie regresji.

Zależność pomiędzy zawartością fosforu aktywnego a właściwościami gleby, takimi jak: procentowy udział frakcji czy kwasowość gleby, była bardzo niska, o czym świadczyły współczynniki determinacji rzadko przekraczające wartość 10 (tab. 20).

Tabela 19
Table 19

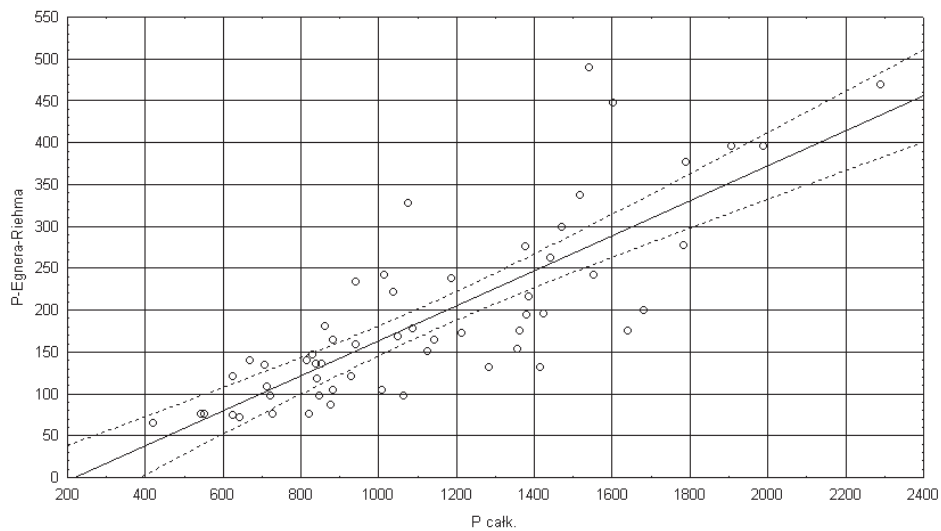
Zależność pomiędzy wskaźnikami stanu fosforowego gleb (Y) a stężeniem równowagi P (X)
The relationship between phosphorus levels in soils (Y) and P-equilibrium (X)

Parametr gleby Soil parameter	Równanie regresji Regression equation	Współczynnik determinacji R ² :100 Coefficient of determination R ² :100
P całkowity Total P	$Y = 1042,42 + 44,632 x$	8,3
P Mehlich-3	$Y = 108,48 + 1,658 x$	1,5
P Egnera-Riehma Egner-Riehm P	$Y = 141,19 + 25,294 x$	39,6
P aktywny Active P	$Y = 0,428 + 0,301 x$	90,2
Parametr Ia Ia parameter	$Y = 0,352 + 0,258 x$	88,4
Parametr Ib Ib parameter	$Y = 2,684 + 0,367 x$	73,2
Parametr b b parameter	$Y = -23,88 - 4,421 x$	35,6

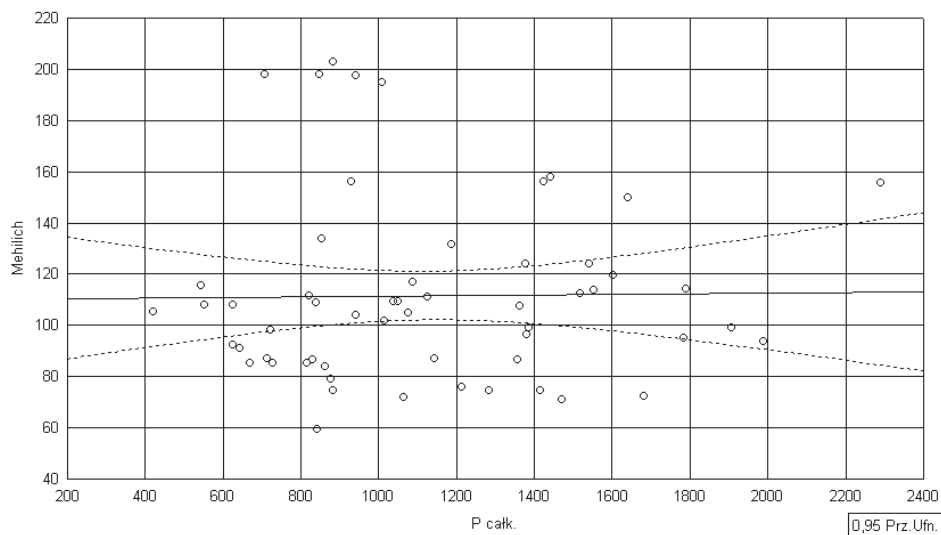
Tabela 20
Table 20

Zależność pomiędzy wskaźnikami stanu fosforowego gleb (Y) a P aktywnym (X)
The relationship between phosphorus levels in soils (Y) and P-active (X)

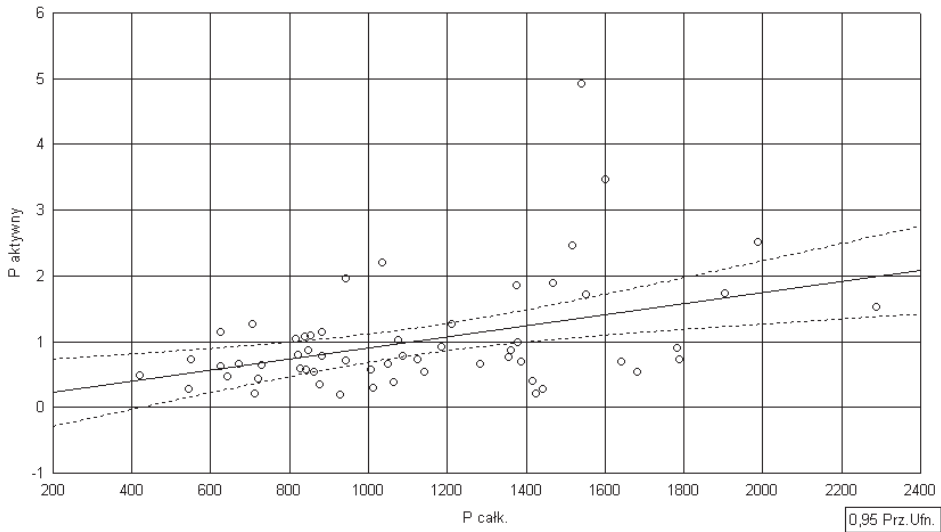
Parametr gleby Soil parameter	Równanie regresji Regression equation	Współczynnik determinacji R ² :100 Coefficient of determination R ² :100
P całkowity Total P	$Y = 924,58 + 201,84 x$	17,1
P Mehlich-3	$Y = 106,4 + 5,589 x$	1,8
P Egnera-Riehma Egner-Riehm P	$Y = 97,557 + 91,592 x$	52,2
I równowagi equilibrium I	$Y = -1,093 + 2,996 x$	90,2
Parametr Ia Ia parameter	$Y = -0,0005 + 0,482 x$	94,8
Parametr Ib Ib parameter	$Y = 2,188 + 1,193 x$	77,9
Parametr b b parameter	$Y = -16,11 - 16,15 x$	47,8



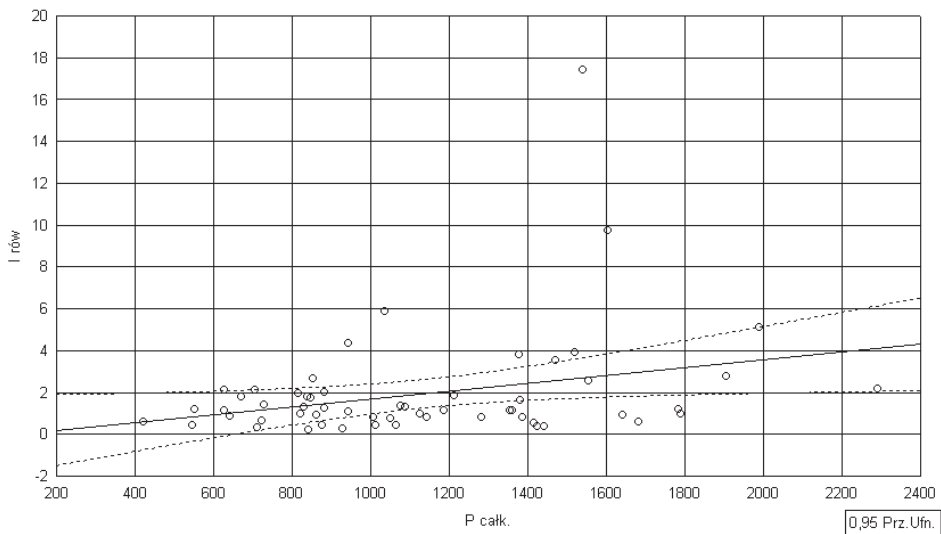
Rys. 1. Zależność pomiędzy P całkowym a P Egnera-Riehma [$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$]
 Fig. 1. The relationship between P total and P Egner-Riehm



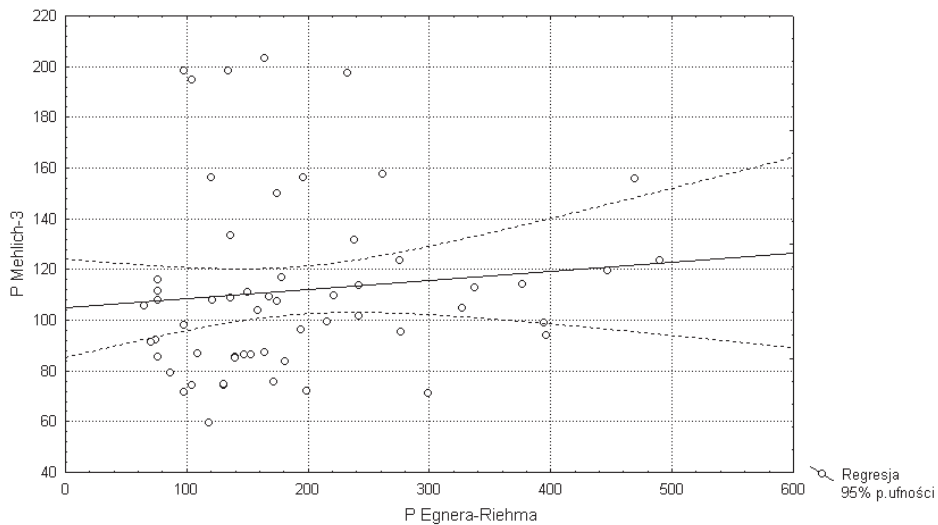
Rys. 2. Zależność pomiędzy P całkowym a P Mehlicha [$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$]
 Fig. 2. The relationship between P total and P Mehlich



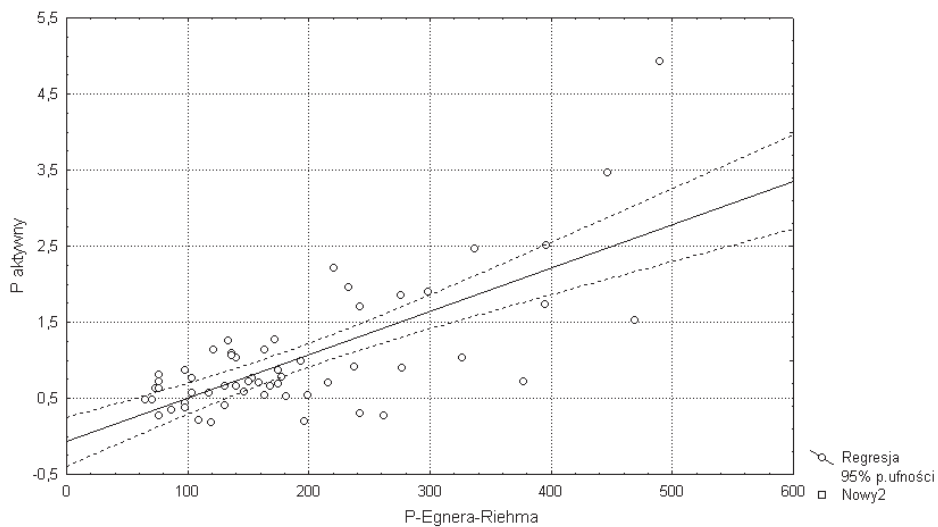
Rys. 3. Zależność pomiędzy P całkowitym [$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$] a P aktywnym [$\text{mg}\cdot\text{dm}^{-3}$]
 Fig. 3. The relationship between P total and P active



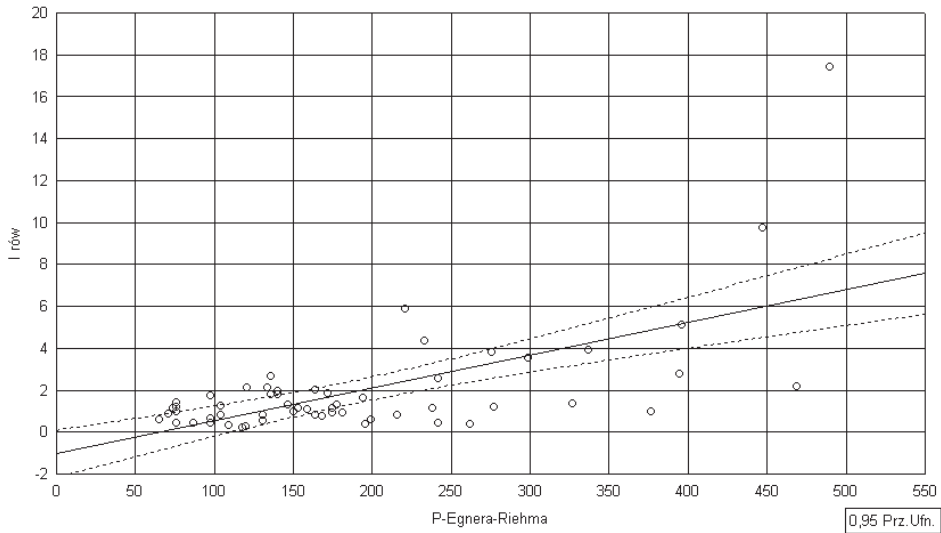
Rys. 4. Zależność pomiędzy P całkowitym [$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$] a I równowagi [$\text{mg}\cdot\text{dm}^{-3}$]
 Fig. 4. The relationship between P total and I equilibrium



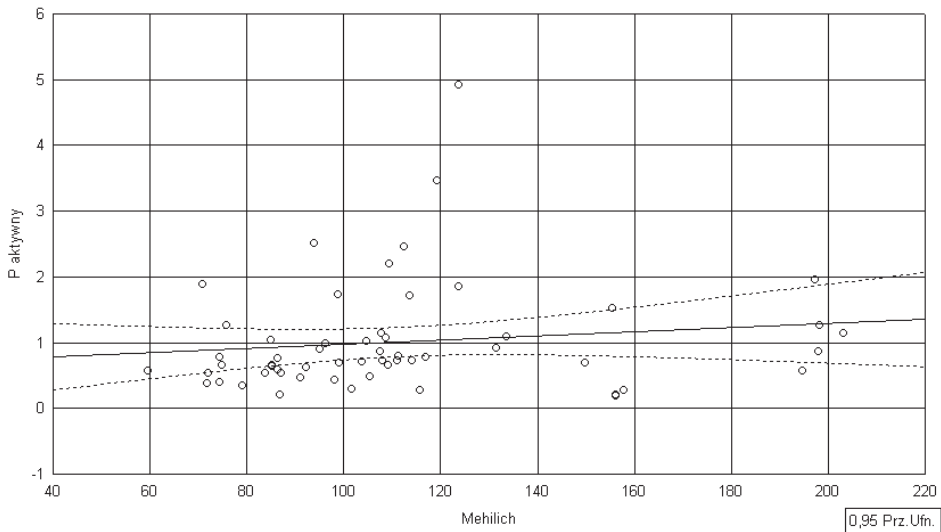
Rys. 5. Zależność pomiędzy P Egnera-Riehma a P Mehlicha [$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$]
 Fig. 5. The relationship between P Egner-Riehm and P Melich



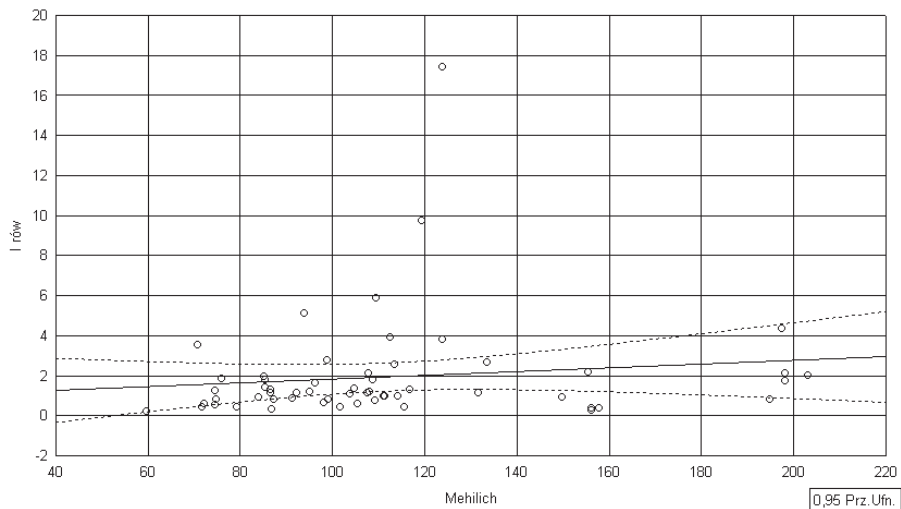
Rys. 6. Zależność pomiędzy P Egnera-Riehma [$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$] a P aktywnym [$\text{mg}\cdot\text{dm}^{-3}$]
 Fig. 6. The relationship between P Egner-Riehm and P active



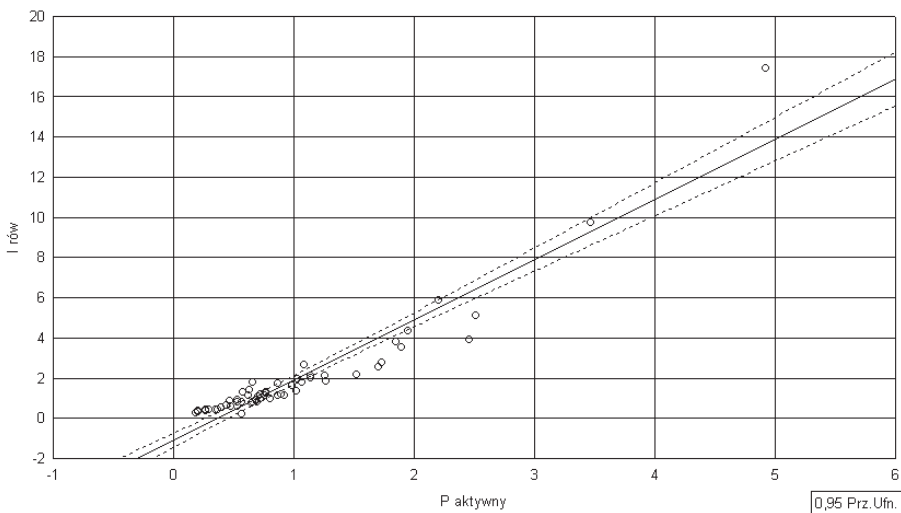
Rys. 7. Zależność pomiędzy P Egnera-Riehma [$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$] a I równowagi [$\text{mg}\cdot\text{dm}^{-3}$]
 Fig. 7. The relationship between P Egner-Riehm [$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$] and I equilibrium



Rys. 8. Zależność pomiędzy P Mehlicha [$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$] a P aktywnym [$\text{mg}\cdot\text{dm}^{-3}$]
 Fig. 8. The relationship between P Mehlich and P active



Rys. 9. Zależność pomiędzy P Mehlicha [$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$] a I równowagi [$\text{mg}\cdot\text{dm}^{-3}$]
 Fig. 9. The relationship between P Mehlich and I equilibrium



Rys. 10. Zależność pomiędzy P aktywnym a I równowagi [$\text{mg}\cdot\text{dm}^{-3}$]
 Fig. 10. The relationship between P active and I equilibrium

4.1.2. Gleby pól uprawnych okolic Wrocławia

Właściwości fizyczno-chemiczne

Gleby pobrane w okolicach miasta Wrocławia wykazywały silnie zróżnicowany skład granulometryczny. Średnio zawartość frakcji $<0,02$ dla tych gleb wynosiła 26%. Najmniej, 9%

części spławalnych wykazywała gleba W8., która również zawierała najmniej części koloidalnych, bo tylko 3% (tab. 21). W zgromadzonej kolekcji prawie połowę gleb stanowiły gleby lekkie, około jedną trzecią stanowiły gleby ciężkie i tylko kilka gleb można było sklasyfikować jako średnie.

Tabela 21
Table 21

Skład granulometryczny gleb
Granulometric composition of soils

Nr gleby Soil No.	Zawartość frakcji Fraction content		Skład granulometryczny Granulometric composition	Nr gleby Soil No.	Zawartość frakcji Fraction content		Skład granulometryczny Granulometric composition
	<0,02	<0,002			<0,02	<0,002	
W 1.	18	6	pgm	W 18.	49	16	gśp
W 2.	19	5	pgm	W 19.	40	11	gśp
W 3.	13	3	pglp	W 20.	18	6	pgm
W 4.	48	14	gśp	W 21.	12	4	pgl
W 5.	15	7	pgl	W 22.	18	5	pgm
W 6.	25	8	gl	W 23.	12	4	pgl
W 7.	9	3	gs	W 24.	13	5	pgl
W 8.	12	4	pgl	W 25.	22	10	gl
W 9.	16	4	pgl	W 26.	25	12	gl
W 10.	13	7	pgl	W 27.	40	10	gśp
W 11.	11	3	pgl	W 28.	12	3	pgl
W 12.	43	9	gśp	W 29.	47	14	gśp
W 13.	44	16	gśp	W 30.	48	13	gśp
W 14.	47	11	gśp/pi	W 31.	23	11	gl
W 15.	17	7	pgm	W 32.	47	19	gśp
W 16.	25	9	gl	W 33.	32	10	gl
W 17.	26	11	gl				

Jak wynika z danych przedstawionych w tabeli 22, stan zakwaszenia gleb mierzony za pomocą kwasowości wymiennej, jak i hydrolitycznej wykazywał znaczne zróżnicowanie. Odczyn gleb pobranych w okolicach Wrocławia mieścił się w przedziale od pH 3,7 do pH 6,9, a kwasowość hydrolityczna od 2,9 do 43 mmol·kg⁻¹. Zawartość węgla organicznego charakteryzowała się znaczną zmiennością i wahała się od 4,3 do 17,7 g C_{org}·kg⁻¹ (tab. 22).

Tabela 22
Table 22

Stan zakwaszenia i zawartość C_{org} w glebach
Acidification level and content of C_{org} in soils

Nr gleby Soil No.	pH _(KCl)	Hh	C _{org}	Nr gleby Soil No.	pH _(KCl)	Hh	C _{org}
		[mmol·kg ⁻¹]	[g·kg ⁻¹]			[mmol·kg ⁻¹]	[g·kg ⁻¹]
W 1.	4,2	16,4	5,90	W 18.	4,3	43,0	15,76
W 2.	5,3	13,6	7,44	W 19.	5,4	20,6	12,33

Tabela 22 cd.
Table 22 cont.

W 3.	4,9	16,7	5,71	W 20.	6,1	10,5	8,11
W 4.	5,1	17,0	9,86	W 21.	3,7	42,0	10,58
W 5.	4,0	42,7	16,86	W 22.	4,7	23,7	9,72
W 6.	5,4	12,2	6,28	W 23.	6,8	4,2	6,79
W 7.	5,2	14,5	7,62	W 24.	5,3	15,2	7,40
W 8.	5,6	11,9	7,23	W 25.	5,9	15,3	13,20
W 9.	3,8	27,5	5,40	W 26.	5,2	18,0	8,79
W 10.	4,7	26,6	9,76	W 27.	5,0	20,1	9,21
W 11.	3,7	38,5	10,93	W 28.	4,3	20,3	4,29
W 12.	5,8	12,0	10,20	W 29.	6,0	14,1	15,51
W 13.	5,1	24,5	16,00	W 30.	5,1	19,2	9,86
W 14.	6,3	8,5	10,22	W 31.	6,8	3,2	15,65
W 15.	4,5	31,1	12,96	W 32.	6,9	3,0	17,58
W 16.	6,3	7,2	9,15	W 33.	7,0	2,9	17,65
W 17.	5,7	12,7	10,20				

Stan fosforowy

Testy pojemności (statyczne)

Całkowita zawartość fosforu w glebach wykazywała stosunkowo małe zróżnicowanie (współczynnik zmienności = 23,6%), jednak gleby zawierały mniejsze ilości fosforu całkowitego, niż pobrane z pól południowo-zachodniej Polski, gdyż uzyskane wartości dla tego parametru wahały się od 282 do 863 mg P·kg⁻¹ (tab. 23).

Zawartość form rozpuszczalnych fosforu oznaczanego metodą Egnera-Riehma wahała się w szerokim przedziale od 22 do 277 mg·kg⁻¹ gleby, jednak większość badanych gleb wykazywała bardzo wysoką zasobność w fosfor. Trzy gleby charakteryzowały się wysoką zawartością i cztery średnią, a tylko trzy z nich zakwalifikowano do grupy gleb o niskiej zasobności w fosfor (tab. 24).

Rozpuszczalne formy fosforu oznaczane metodą Egnera-Riehma stanowiły od 6,1 do 45,1% całkowitej zawartości fosforu, co świadczy o znacznym zróżnicowaniu rozpuszczalności form P tworzących w tych glebach pulę fosforu całkowitego.

Tabela 23
Table 23

Zawartość P całkowitego w glebach
Total P content in soils

Nr gleby Soil No.	P _{całkowity} [mg·kg ⁻¹] Total P	Nr gleby Soil No.	P _{całkowity} [mg·kg ⁻¹] Total P	Nr gleby Soil No.	P _{całkowity} [mg·kg ⁻¹] Total P
W 1.	863	W 12.	358	W 23.	614
W 2.	506	W 13.	471	W 24.	614

Tabela 23 cd.
Table 23 cont.

W 3.	571	W 14.	576	W 25.	351
W 4.	698	W 15.	574	W 26.	282
W 5.	654	W 16.	462	W 27.	452
W 6.	523	W 17.	523	W 28.	595
W 7.	536	W 18.	658	W 29.	525
W 8.	358	W 19.	619	W 30.	394
W 9.	528	W 20.	434	W 31.	624
W 10.	621	W 21.	497	W 32.	410
W 11.	654	W 22.	619	W 33.	328
Średnia zawartość P całkowitego [mg·kg⁻¹] Average content of total P			530,1		

Udział fosforu oznaczonego metodą według Egnera-Riehma w P całkowitym w dwóch glebach wynosił poniżej 10%, natomiast w ośmiu glebach ponad 30% fosforu całkowitego przechodziło do wyciągu wg Egnera-Riehma. Najwięcej, bo aż 45% całkowitego P stanowił fosfor oznaczony metodą Egnera-Riehma w piasku gliniastym lekkim (gleba W23.). Gleba ta przy niewielkiej ilości węgla organicznego (67,9 g C_{org}·kg⁻¹) zawierała 619 mg P całkowitego i aż 277 mg·kg⁻¹ gleby P rozpuszczalnego wg Egnera-Riehma i była najbardziej zasobna w tę formę badanego składnika (tab. 24).

Tabela 24
Table 24

Zawartość oraz udział P-Egnera-Riehma w P całkowitym
Value and percentage of Egner-Riehm P in total P

Nr gleby Soil No.	P P Egner-Riehm P [mg·kg⁻¹]	Udział P w P całkowitym [%] Egner-Riehm P in total P	Nr gleby Soil No.	P P Egner-Riehm P [mg·kg⁻¹]	Udział P w P całkowitym [%] Egner-Riehm P in total P
W 1.	33	11,7	W 18.	50	9,3
W 2.	95	29,0	W 19.	110	19,3
W 3.	37	10,5	W 20.	182	31,7
W 4.	22	6,1	W 21.	110	19,1
W 5.	57	15,9	W 22.	130	21,8
W 6.	74	18,8	W 23.	277	45,1
W 7.	127	31,0	W 24.	168	27,4
W 8.	150	34,6	W 25.	202	32,6
W 9.	78	17,3	W 26.	88	14,2
W 10.	58	12,6	W 27.	129	20,8
W 11.	89	18,9	W 28.	151	24,2
W 12.	143	28,8	W 29.	136	20,8
W 13.	58	11,5	W 30.	168	25,7

Tabela 24 cd.
Table 24 cont.

W 14.	126	24,1	W 31.	231	35,1
W 15.	89	17,0	W 32.	193	27,7
W 16.	184	35,0	W 33.	254	29,4
W 17.	132	25,0			
Średnia zawartość P_{Egnera-Riehma} i % udział w P_{całk.}				125,2	22,8
Average content of Egner-Riehm P and % part in total P					

Testy pojemności sorpcyjnej względem fosforu

Zarówno z punktu widzenia ochrony środowiska, jak i praktyki rolniczej ważniejszym parametrem niż ilość fosforu występującego w glebie jest zdolność gleby do zatrzymania tego składnika, którą stanowią siła i pojemność buforowa gleb względem tego pierwiastka [Ehlert i in. 2002]. Ocenę zachowania P obecnego w glebie lub wprowadzonego do niej z zewnątrz, a także możliwości związania w fazie stałej gleby lub uwalniania fosforanów do fazy ciekłej umożliwiają tzw. testy kinetyki, a wśród nich oznaczanie pojemności sorpcyjnych czy indeksów sorpcji fosforu. Do takich testów zaliczyć można wyznaczanie izoterm sorpcji Pagela oraz indeksu sorpcji według Bache.

Indeks sorpcji fosforu według Bache

Ilość fosforu zatrzymanego przez fazę stałą gleby oraz indeks sorpcji fosforu wg Bache dla badanych prób gleb wyliczono z różnicy początkowego i końcowego stężenia P w roztworze po równoważeniu gleb z roztworem KCl zawierającym 2,5 $\mu\text{mol P}$ w 1 cm^3 .

Indeks sorpcji Bache stanowi iloraz ilości P zasorbowanej przez 1 g gleby oraz logarytmu ze stężenia fosforu po ekstrakcji. Obliczano go ze wzoru:

$$\text{Indeks sorpcji (B)} = \frac{X}{\log Cr}$$

gdzie:

X = Co – Cr w $\mu\text{mol P}\cdot\text{g}^{-1}$ gleby,

Co – stężenie roztworu ekstrakcyjnego,

Cr – stężenie roztworu po ekstrakcji.

Wysokie wartości indeksu sorpcji Bache świadczą o dużych możliwościach stałej fazy gleby do silnego wiązania fosforu. Autor w swoich badaniach uzyskiwał wartości indeksu od 5 do 64 [Fotyma i in. 1987].

Wartości indeksu Bache uzyskane dla gleb położonych w okolicach Wrocławia były bardzo zróżnicowane i wahały się od 0,18 do 19,3, średnio przyjmując wartość ok. 8,35. Przeciętnie jeden kilogram gleby wiązał więc ok. 3 mmol P , czyli 94 mg P . Spośród dodanego w 1 cm^3 roztworu 2,5 $\mu\text{mol P}$ gleby sorbowały przeciętnie 0,15 $\mu\text{mol P}$, stanowiło to zaledwie 6% dodatku, przy wahaniach od 0,1 do 13%. Wydaje się, że do pomiaru możliwości sorpcyjnych polskich gleb należałoby stosować mniejsze ilości fosforu.

Stosunkowo wysokie wartości indeksu (powyżej 10), wskazujące na silne zatrzymanie P przez stałą fazę gleby, uzyskano dla ośmiu próbek gleb. Prawie wszystkie gleby charakteryzowały się małą desorpcją i wysoką adsorpcją fosforu. Tylko gleba W4. wykazywała duże możliwości desorpcji i małe adsorpcji fosforu przy równoczesnej wysokiej zawartości fosforu (tab. 25).

Bardzo niskie wartości indeksu (poniżej 1), świadczące o znikomej sorpcji P i wysyceniu tego składnika, stwierdzono dla dwóch gleb oznaczonych numerami W23. i W33. Były to gleby płowe, o zawartości części spławialnych poniżej 20% i około 7 g·kg⁻¹ węgla organicznego, charakteryzujące się bardzo wysoką zasobnością w fosfor rozpuszczalny.

Tabela 25
Table 25

Wartości indeksu sorpcji P według Bache
Values of P sorption index by Bache

Nr gleby Soil No.	Stężenie P po ekstrakcji P concentration after extraction		X [μmol P·g ⁻¹]	log Cr	Indeks Index
	[μg P·cm ⁻³]	[μmol P·cm ⁻³]			
W 1.	68,499	2,209	5,811	0,344	16,88
W 2.	69,484	2,241	5,175	0,350	14,76
W 3.	71,052	2,292	4,163	0,360	11,56
W 4.	67,413	2,174	6,512	0,337	19,30
W 5.	73,160	2,360	2,802	0,373	7,51
W 6.	73,213	2,362	2,767	0,373	7,42
W 7.	67,929	2,191	6,179	0,341	18,14
W 8.	69,849	2,253	4,939	0,353	14,00
W 9.	74,063	2,389	2,219	0,378	5,87
W 10.	74,009	2,387	2,253	0,378	5,96
W 11.	72,367	2,334	3,314	0,368	9,00
W 12.	71,472	2,305	3,892	0,363	10,73
W 13.	71,945	2,321	3,586	0,366	9,81
W 14.	70,528	2,275	4,501	0,357	12,61
W 15.	72,208	2,329	3,416	0,367	9,30
W 16.	74,116	2,391	2,185	0,379	5,77
W 17.	72,948	2,353	2,939	0,372	7,91
W 18.	72,156	2,328	3,450	0,367	9,40
W 19.	75,667	2,441	1,184	0,388	3,05
W 20.	73,107	2,358	2,836	0,373	7,61
W 21.	74,916	2,417	1,668	0,383	4,35
W 22.	72,261	2,331	3,382	0,368	9,20
W 23.	76,959	2,483	0,349	0,395	0,88
W 24.	75,237	2,427	1,461	0,385	3,79
W 25.	74,063	2,389	2,219	0,378	5,87
W 26.	74,703	2,410	1,806	0,382	4,73

Tabela 25 cd.
Table 25 cont.

W 27.	72,315	2,333	3,348	0,368	9,10
W 28.	74,756	2,411	1,771	0,382	4,63
W 29.	74,169	2,392	2,150	0,379	5,68
W 30.	72,948	2,353	2,939	0,372	7,91
W 31.	74,276	2,396	2,081	0,379	5,48
W 32.	73,425	2,368	2,631	0,374	7,02
W 33.	77,391	2,496	0,071	0,397	0,18
Średnio Average	72,806	2,348	3,030	0,371	8,35

Przeprowadzona analiza korelacji pomiędzy zawartością fosforu całkowitego i rozpuszczalnego oraz ich wzajemnym udziałem a wartościami indeksu Bache nie wskazała na istnienie zależności pomiędzy tymi wskaźnikami stanu fosforowego gleby. Uzyskany najwyższy współczynnik korelacji dla udziału P rozpuszczalnego w P całkowitym wyniósł zaledwie 0,377.

Parametry sorpcji fosforu według Van Huay'a, wyznaczone uproszczoną metodą Pagela

Wyniki uzyskane po zastosowaniu uproszczonej metody Pagela do analizy właściwości sorpcyjnych gleb okolic Wrocławia wskazują, że analizowane gleby mogły desorbować do roztworu chlorku wapnia od 0,9 do 15,6 mg P·kg⁻¹ (tab. 26). Niewielką desorpcję stwierdzono w większości gleb charakteryzujących się niską zasobnością w fosfor oznaczany testem Egnera-Riehma, choć część próbek, bardzo zasobnych w P rozpuszczalny, wykazała niską jego desorpcję (tab. 24). Najmniej fosforu sorbowały gleby nr W31., W28., W24. i W9., natomiast najwięcej gleby W8., W7., W4., W18., W1. i W22. należące do ciężkich i średnich, o zróżnicowanym odczynie, od bardzo kwaśnego do zasadowego.

Tabela 26
Table 26

Parametry sorpcji fosforu wyznaczone uproszczoną metodą Pagela
Phosphorus sorption parameters determined by a simplified Pagel method

Nr gleby Soil No.	Desorpcja [mg P·kg⁻¹] Desorption	Adsorpcja [mg P·kg⁻¹] Adsorption	n	b	I równ. I equilibrium
W 1.	5,2	27,6	42,1	35,5	0,71
W 2.	4,0	23,8	28,1	21,7	0,60
W 3.	12,7	9,6	25,3	41,3	2,66
W 4.	5,3	29,6	49,9	41,7	0,70
W 5.	8,5	17,4	29,1	35,3	1,46
W 6.	8,6	17,8	30,7	37,2	1,47
W 7.	3,4	31,3	43,9	28,9	0,43
W 8.	0,9	32,0	31,6	10,4	0,11

Tabela 26 cd.
Table 26 cont.

W 9.	15,6	3,5	21,0	41,8	3,96
W 10.	11,2	10,5	23,3	35,9	2,37
W 11.	8,2	19,3	32,7	38,0	1,35
W 12.	6,1	21,2	29,7	29,3	0,97
W 13.	5,6	21,2	28,2	26,7	0,90
W 14.	5,2	25,9	37,5	32,8	0,74
W 15.	8,6	13,7	23,0	30,0	1,70
W 16.	6,6	15,6	21,9	23,8	1,25
W 17.	9,8	12,7	23,9	33,5	1,96
W 18.	3,7	29,2	39,6	27,9	0,49
W 19.	13,4	6,5	21,4	38,2	3,19
W 20.	3,0	21,6	21,8	15,0	0,47
W 21.	9,4	11,4	21,0	29,8	2,02
W 22.	3,8	27,6	35,7	25,9	0,53
W 23.	12,0	6,5	18,7	32,6	3,04
W 24.	13,2	2,9	15,8	31,4	3,95
W 25.	2,4	20,3	18,5	11,5	0,39
W 26.	3,8	14,4	14,3	12,7	0,79
W 27.	7,4	12,6	18,7	23,5	1,58
W 28.	13,5	2,7	16,0	32,1	4,02
W 29.	7,1	12,9	18,3	22,5	1,51
W 30.	3,2	18,4	17,8	13,3	0,56
W 31.	15,1	1,0	16,4	35,3	4,62
W 32.	5,2	16,2	19,1	19,0	0,98
W 33.	9,2	5,3	12,6	21,3	2,86

Przykładem mogą być gleby W20. i W25., desorbujące zaledwie około 3 mg P·kg⁻¹, a zawierające ponad 180 mg P·kg⁻¹ fosforu rozpuszczalnego. Świadczy to o dużej sile wiązania fosforu przez fazę stałą tych gleb i przypuszczalnie wskazuje na silne uwstecznianie tego pierwiastka.

Ilości fosforu sorbowanego z roztworu, w którym dostarczano 50 mg P na kilogram gleby, wahały się od 1,0 do 32 mg P·kg⁻¹. Najmniej fosforu sorbowały gleby W31., W28. i W24., zawierające stosunkowo duże ilości P całkowitego – około 600 mg P·kg⁻¹ gleby (tab. 26) i wykazujące bardzo wysokie stężenie równowagowe fosforu około 4 mg P·dm⁻³.

Największe możliwości sorpcyjne – o czym świadczą duże wartości uzyskane dla współczynników adsorpcji – wynoszące ok. do 30 mg P·kg⁻¹ – miały gleby W7., W8., W4., W18. i W1. Wykazywały one również wysokie wartości parametru n (pomiędzy 30 a 40), charakteryzującego intensywność wiązania fosforu i zdolność buforową gleby w stosunku do tego pierwiastka. Przeważnie były to bogate w próchnicę gleby o większej zawartości części spławialnych. Niewielką intensywność wiązania i jednocześnie małe zdolności buforowe odnośnie fosforu wykazywały gleby płowe, zaliczane w większości do gleb lekkich (gleby W23.–W33.).

Z wyjątkiem gleby W8. we wszystkich pozostałych próbkach stężenie równowagi fosforu było większe niż 0,2–0,3 mg P·dm⁻³, podawane w literaturze jako dolna granica dla optymalnego zaopatrzenia roślin z fosfor [Fotyma i in. 1991]. W zaledwie kilku badanych glebach (W7., W8., W18., W20., W22., W25., W30.) stężenie fosforu w stanie równowagi nie przekroczyło 0,60 mg P·dm⁻³, natomiast wśród analizowanych gleb znalazły się próbki, w których stężenie to wynosiło powyżej 3 mg P·dm⁻³. Tak duże stężenie równowagi fosforu zapewnia dobre warunki odżywiania się roślin, a w powiązaniu z dużymi zdolnościami buforowymi warunkuje utrzymanie się takiego stanu przez dłuższy okres.

Przeprowadzona analiza statystyczna zależności korelacyjnej wielkości adsorpcji fosforu od takich właściwości gleb jak: zawartość C_{org}, zawartość części spławialnych, stężenie jonów wodorowych w roztworze 1 mol·dm⁻³ KCl, wielkość desorpcji fosforu do roztworu CaCl₂, zawartość fosforu rozpuszczalnego wg Egnera-Riehma i jego udział w fosforze całkowitym oraz zawartość fosforu całkowitego wskazuje, że najściślej wielkość sorpcji była skorelowana z ilością fosforu desorbowanego z gleby ($r = -0,866$), zatem im mniej fosforu desorbowała gleba, tym większe ilości fosforu dodanego do gleby były przez nią związane (tab. 27). Duży współczynnik determinacji ($r^2 = 0,75$) pozwala wnioskować, że 75% zmienności sorpcji fosforu uwarunkowane było zmiennością desorpcji tego składnika (tab. 27).

Nie stwierdzono istotnego powiązania wielkości sorpcji z zawartością rozpuszczalnych form fosforu według Egnera-Riehma ($r = -0,164$), natomiast wykazano istnienie wyraźnej zależności pomiędzy ilością fosforu związanego przez glebę a udziałem form rozpuszczalnych w mleczanie wapnia, w całkowitej puli tego składnika w glebie ($r = -0,540$). Pozwala to na wnioskowanie, że im większa część całkowitego fosforu rozpuszcza się w mleczanie wapnia, tym mniej połączeń fosforu wprowadzonych do gleby zostanie związanych przez fazę stałą. Dla analizowanej grupy gleb nie stwierdzono udowodnionej zależności pomiędzy wielkością sorpcji i zawartością fosforu całkowitego, jak również stężeniem jonów (H⁺) w roztworze 1 mol·dm⁻³ KCl (r wynosiło odpowiednio 0,063 i 0,070).

Wykazano, że w tej grupie były zarówno gleby silnie sorbujące fosfor o odczynie kwaśnym, a nawet bardzo kwaśnym (W8., W9., W15. czy W23.), jak i gleby o odczynie obojętnym (W1., W15., W19.). Przeprowadzona analiza statystyczna wykazała natomiast, że znajomość składu granulometrycznego, a zwłaszcza zawartości węgla organicznego w glebie, może być podstawą do wnioskowania o własnościach sorpcyjnych gleb i losach fosforu wprowadzonego do gleby (tab. 27).

Tabela 27
Table 27

Korelacja między adsorpcją fosforu (Ib) a właściwościami gleby
Correlation between phosphorus adsorption (Ib) and soil properties

Właściwości gleb Soil properties	Współczynnik korelacji r Coefficient of correlation r	R (n = 34)
Zawartość C _{org.} Content of C _{org.}	0,512 ^{xx}	r _{0,001} = 0,540(xxx) r _{0,01} = 0,436(xx) r _{0,05} = 0,339 (x)
Części spławialne gleby Fine fractions of soil	0,343 ^x	
pH KCl (H ⁺)	0,070	
Desorpcja fosforu do 0,01 M CaCl ₂ Phosphorus desorption to 0,01 M CaCl ₂	-0,866 ^{xxx}	
Zawartość P _{rozp.} wg Egnera-Riehma Soluble P content by Egner-Riehm	-0,164	
Udział P wg Egnera-Riehma w P _{całk.} Soluble P percentage by Egner-Riehm in total P	-0,540 ^{xxx}	
Zawartość P _{całk.} Content of total P	0,063	

Gleby o dużych możliwościach sorpcyjnych – oznaczonych metodą Pagela charakteryzowały się również jednymi z najwyższych wartości parametrów indeksu sorpcji fosforu według Bache. Były one wyższe od średniej i dla tych gleb wahały się od 14 (W8.) do 19,3 (W4.).

Nie zaobserwowano jednak zależności przeciwnej – gleby o najniższych wartościach indeksu sorpcji (W23. i W33.) nie adsorbowały najmniejszych ilości fosforu, jednakże ilość wiążanego przez nie P była trzykrotnie mniejsza od uzyskanej wartości średniej.

Wyniki przeprowadzonej analizy korelacji pomiędzy wartościami indeksu Bache a właściwościami sorpcyjnymi gleb wskazują, że z indeksem sorpcji P zaproponowanym przez Bache, spośród parametrów sorpcji fosforu wyznaczanych uproszczoną metodą Pagela, najbardziej związane są wartości parametru n, który opisuje siłę wiązania przez glebę fosforu oraz wielkość adsorpcji tego składnika (tab. 28). Uzyskane współczynniki korelacji tych cech są bliskie 0,8, współczynniki determinacji świadczą, że wartości indeksu Bache opisuje w ok. 70% współczynnik n i w ok. 60% ilość adsorbowanego fosforu.

Tabela 28
Table 28

Korelacja pomiędzy indeksem Bache i parametrami sorpcji Pagela
Correlation between Bache index and sorption parameters by Pagel

Wartości współczynnika Coefficient values	Desorpcja Desorption	Adsorpcja Adsorption	n	b	I równ. I equilibrium
Korelacji Correlation	-0,516	0,787	0,841	0,105	-0,590
Determinacji Determination	0,266	0,619	0,708	0,011	0,348

4.2. Doświadczenie polowe

4.2.1. Gleby pola doświadczalnego

Właściwości fizyczno-chemiczne gleb

Stacyjne doświadczenie polowe założono na glebie płowej typowej, wytworzonej z gliny lekkiej, zalegającej na glinie średniej (Haplic Luvisols). Warstwy orna i podorna tej gleby do głębokości 40 cm miały zbliżone właściwości i skład granulometryczny (tab. 29). Udział frakcji spławialnych w wierzchniej warstwie gleby wynosił 24%, co kwalifikowało ją do przedziału gleb średnich.

Tabela 29

Table 29

Skład granulometryczny gleby pola (doświadczenie wieloletnie)
Granulometric composition of field soil (long term experiment)

Poziom gleby Soil horizon	Głębokość [cm] Depth	Zawartość frakcji [mm, %] Fraction content		
		1,0–0,1	0,1–0,02	<0,02
A	0–40	55	21	24
Eet	40–50	45	23	32
II Bt C	>50	36	24	40

Za czynnik decydujący w największym stopniu o rozpuszczalności związków fosforu glebowego (a więc o dostępności tego składnika dla roślin) uważany jest stan zakwaszenia środowiska glebowego.

Zakres oddziaływania nawożenia na zakwaszenie gleby wiąże się z jej właściwościami. Uzyskane w doświadczeniu wyniki są zgodne z podawanymi w literaturze o istotnym oddziaływaniu obornika na poprawę i utrzymanie odpowiedniego odczynu gleb. Wieloletnie zróżnicowane nawożenie obornikiem oraz azotem mineralnym stosowane w doświadczeniu znacznie modyfikowało zakwaszenie gleby (tab. 30–33). Zarówno kwasowość wymienna gleb, oznaczana w 1 mol dm⁻³ KCl oraz stosowany coraz częściej do oznaczeń pH 0,1 mol·dm⁻³ CaCl₂, jak i kwasowość hydrolityczna różniły się znacznie pomiędzy obiektami doświadczenia. Różnice takie wykazano w poszczególnych warstwach gleby.

Obiekty, na których stosowano nawożenie wyłącznie mineralne, były bardziej zakwaszone w porównaniu z obiektami nawożonymi obornikiem. W warstwie 0–20 cm na podbloku a – nienawożonym obornikiem pH_(KCl) wynosiło 5,0 – natomiast na podbloku d – nawożonym co 4 lata dawką 60 t obornika pH_(KCl) wynosiło 5,8, a więc stężenie jonów wodorowych było siedmiokrotnie mniejsze (tab. 30).

Wraz ze zwiększaniem się głębokości zakwaszenie gleby oraz różnice w zakwaszeniu pomiędzy obiektami nawożenia organicznego były coraz mniejsze. Największe zróżnicowanie w zakwaszeniu gleby wykazano, badając kwasowość hydrolityczną. Istotne różnice stwierdzono we wszystkich warstwach aż do głębokości 60–80 cm (tab. 33).

W przypadku pomiaru odczynu w roztworze KCl oddziaływanie nawożenia organicznego utrzymywało się aż do głębokości 40–60 cm, natomiast przeprowadzając pomiar pH w roztworze CaCl₂, istotne różnice w zakwaszeniu gleby odnotowano jedynie w warstwie ornej i podornej.

Otrzymane w doświadczeniu wyniki wskazują, że obornik istotnie wpływa na poprawę i utrzymanie odpowiedniego odczynu gleb. W licznych publikacjach opisywany jest korzystny wpływ obornika na odczyn gleby [Dechnik i in. 1993, Sądej 2000, Stępień i in. 2002]. W stacji badawczej Brody koło Poznania, w statycznym doświadczeniu polowym, zaobserwowano, po nawożeniu obornikiem stabilizację odczynu gleby w porównaniu z nawożeniem mineralnym. Korzystny wpływ obornika na hamowanie zakwaszania się gleb uwidaczniał się również w głębszych warstwach [Piechota i in. 2000]. W tej samej stacji badawczej, porównując skutki nawożenia mineralnego i organicznego, stwierdzono spadek wartości pH z 6,0 do 5,6 na obiektach nienawożonych oraz do pH 5,4 na obiektach nawożonych wyłącznie nawozami mineralnymi. W glebach nawożonych obornikiem wartości te nadal utrzymywały się na poziomie pH = 6,0 [Blecharczyk 1999]. W licznych publikacjach opisywane jest zakwaszające działanie stosowanych nawozów azotowych tym większe, im wyższa była dawka.

W swoich badaniach Stępień i in. [2002] stwierdzili, że stosowanie obornika łagodziło ujemny wpływ silnego zakwaszenia. Na glebach silnie kwaśnych oraz nienawożonych fosforem obserwowano istotny wpływ obornika na plony roślin i pobranie przez nie fosforu.

Na rozpuszczalność składników pokarmowych duży wpływ ma odczyn gleby, jednak w przypadku fosforanów nie jest to zależność liniowa [Tyler i Olsson 2001].

W badaniach [Łabętowicz i in. 1998, Łabętowicz i Rutkowska 2001, Rutkowska i in. 2002] nawożenie obornikiem i wapnowanie zwiększało, a stosowanie azotu i potasu zmniejszało stężenie fosforu w roztworze glebowym.

W badaniach własnych stosowanie coraz większych dawek azotu w postaci nawozów mineralnych powodowało wzrost zakwaszenia gleby. Jednak istotny wzrost zakwaszenia (mierzony wszystkimi metodami) pod wpływem stosowania azotu mineralnego stwierdzono tylko w warstwie 0–20 cm i 20–40 cm. Większe zakwaszenie głębszej warstwy gleby 40–60 cm nawożonej wysokimi dawkami azotu mineralnego wykazano, jedynie mierząc kwasowość hydrolityczną. Każdorazowo zwiększenie dawki azotu mineralnego powodowało wzrost kwasowości hydrolitycznej w warstwach 0–20 cm i 20–40 cm, natomiast przy pomiarze kwasowości wymiennej odnotowano, że najwyższa dawka azotu istotnie zwiększała zakwaszenie gleby.

W literaturze spotyka się wiele doświadczeń ukazujących wpływ nawożenia azotowego na odczyn gleby. Zakwaszanie gleb pod wpływem nawożenia, zwiększające się silnie wraz ze zwiększeniem dawek azotu, stwierdzili w swych badaniach Bednarek i in. [1999] oraz Koper i in. [2004]. Dodatkowo w badaniach Dechnika i in. [1993] wykazano istotne zwiększanie się zawartości łatwo rozpuszczalnych fosforanów pod wpływem nawożenia obornikiem oraz obniżanie się ich zawartości w warunkach intensywnego nawożenia azotem.

Tabela 30
Table 30

Zakwaszenie gleby, warstwa 0–20 cm
Soil acidification, layer 0–20 cm

Obiekty doświadczenia Experiment sites		pH (KCl)	pH (CaCl ₂)	Hh cmol(+).kg ⁻¹
Bez obornika Without FYM	N ₀	5,4	5,5	13,4
	N ₁	5,3	5,2	15,0
	N ₂	4,9	5,0	17,1
	N ₃	4,7	4,7	19,5
Średnio – Average		5,0^B	5,0^B	16,2^A
Obornik FYM	N ₀	6,3	6,1	12,0
	N ₁	6,1	5,9	13,5
	N ₂	5,8	5,6	16,1
	N ₃	5,5	5,4	16,8
Średnio – Average		5,8^A	5,7^A	14,6^B
Średnio Average	N ₀	5,8 ^b	5,7 ^c	12,7 ^d
	N ₁	5,5 ^b	5,4 ^{b,c}	14,3 ^c
	N ₂	5,2 ^b	5,2 ^b	16,6 ^b
	N ₃	4,9 ^a	4,9 ^a	18,2 ^a
Średnio w doświadczeniu Average for the experiment		5,2	5,2	15,4
NIR _{0.05}	I cz.	Istotność różnic obliczono ze stężenia jonów [H ⁺] Significance of differences in ion [H ⁺] concentration		1,27
	II cz.			1,33
	I-II			r.n.

Tabela 31
Table 31

Zakwaszenie gleby, warstwa 20–40 cm
Soil acidification, layer 20–40 cm

Obiekty doświadczenia Experiment sites		pH (KCl)	pH (CaCl ₂)	Hh cmol(+).kg ⁻¹
Bez obornika Without FYM	N ₀	5,7	5,9	11,6
	N ₁	5,5	5,7	13,1
	N ₂	5,3	5,5	14,0
	N ₃	4,9	5,2	16,5
Średnio – Average		5,3^B	5,6^B	13,8^A
Obornik FYM	N ₀	6,4	6,2	10,2
	N ₁	6,2	6,1	11,3
	N ₂	6,0	6,0	13,2
	N ₃	5,6	5,6	16,2
Średnio – Average		6,0^A	6,0^A	12,7^B

Tabela 31 cd.
Table 31 cont.

Średnio Average	N ₀	6,0 ^b	6,2 ^b	10,9 ^d
	N ₁	5,7 ^b	6,1 ^b	12,2 ^c
	N ₂	5,5 ^b	6,1 ^b	13,6 ^b
	N ₃	5,2 ^a	6,0 ^a	16,3 ^a
Średnio w doświadczeniu Average for the experiment		5,5	6,0	13,3
NIR _{0.05}	I cz.	Istotność różnic obliczono ze stężenia jonów [H ⁺] Significance of differences in ion [H ⁺] concentration		1,19
	II cz.			1,14
	I-II			r.n.

Tabela 32
Table 32

Zakwaszenie gleby, warstwa 40–60 cm
Soil acidification, layer 40–60 cm

Obiekty doświadczenia Experiment sites		pH (KCl)	pH (CaCl ₂)	Hh cmol(+)-kg ⁻¹
Bez obornika Without FYM	N ₀	5,2	6,1	10,3
	N ₁	5,3	6,0	11,4
	N ₂	5,4	6,1	11,6
	N ₃	5,3	6,0	11,6
Średnio – Average		5,3^B	6,1	11,2^A
Obornik FYM	N ₀	5,7	6,2	10,5
	N ₁	5,7	6,2	10,5
	N ₂	5,6	6,1	10,8
	N ₃	5,5	6,0	11,3
Średnio – Average		5,6^A	6,1	10,8^B
Średnio Average	N ₀	5,4	6,1	10,4 ^b
	N ₁	5,5	6,1	11,0 ^{ab}
	N ₂	5,5	6,1	11,2 ^a
	N ₃	5,4	6,0	11,4 ^a
Średnio w doświadczeniu Average for the experiment		5,4	6,1	11,0
NIR _{0.05}	I cz.	Istotność różnic obliczono ze stężenia jonów [H ⁺] Significance of differences in ion [H ⁺] concentration		r.n.
	II cz.			0,68
	I-II			r.n.

Tabela 33
Table 33

Zakwaszenie gleby, warstwa 60–80 cm
Soil acidification, layer 60–80 cm

Obiekty doświadczenia Experiment sites		pH (KCl)	pH (CaCl ₂)	Hh cmol(+).kg ⁻¹
Bez obornika Without FYM	N ₀	5,7	6,3	8,8
	N ₁	5,7	6,3	9,8
	N ₂	5,8	6,4	9,5
	N ₃	5,7	6,3	10,0
Średnio – Average		5,7	6,3	9,5^A
Obornik FYM	N ₀	5,8	6,3	9,5
	N ₁	5,9	6,4	9,2
	N ₂	5,9	6,4	8,6
	N ₃	5,9	6,2	7,6
Średnio – Average		5,9	6,3	8,7^B
Średnio Average	N ₀	5,7	6,3 ^b	9,1
	N ₁	5,8	6,3 ^b	9,5
	N ₂	5,8	6,4 ^b	9,0
	N ₃	5,8	6,3 ^a	8,8
Średnio w doświadczeniu Average for the experiment		5,8	6,3	9,1
NIR _{0.05}	I cz.	Istotność różnic obliczono ze stężenia jonów [H ⁺]		r.n.
	II cz.	Significance of differences in ion [H ⁺] concentration		r.n.
	I-II			r.n.

Tabela 34
Table 34

Zawartość węgla organicznego i azotu ogólnego, warstwa 0–20 cm
Content of organic carbon and total nitrogen, layer 0–20 cm

Obiekty doświadczenia Experiment sites		C _{org.}	N _{og.} Total N	C:N N = 1	K _{rozp.} Soluble K	Mg _{rozp.} Soluble Mg
		[g.kg ⁻¹]			[mg.kg ⁻¹]	
Bez obornika Without FYM	N ₀	4,56	0,54	8,4	154	42,2
	N ₁	5,00	0,60	8,3	137	41,9
	N ₂	5,20	0,62	8,4	138	42,4
	N ₃	4,98	0,62	8,0	131	41,0
Średnio – Average		4,93^B	0,60^B	8,3	140^B	41,9^B
Obornik FYM	N ₀	7,11	0,81	8,8	231	70,3
	N ₁	7,42	0,81	9,2	207	66,1
	N ₂	7,68	0,88	8,7	215	66,1
	N ₃	7,42	0,85	8,9	200	61,4
Średnio – Average		7,41^A	0,83^A	8,9	213^A	66,0^A

Tabela 34 cd.
Table 34 cont.

Średnio Average	N ₀	5,84 ^c	0,67 ^b	8,6	192 ^a	56,3
	N ₁	6,21 ^{a,b}	0,70 ^b	8,2	172 ^b	54,0
	N ₂	6,44 ^a	0,74 ^a	8,6	176 ^b	54,3
	N ₃	6,20 ^b	0,73 ^a	8,4	165 ^c	51,2
Średnio w doświadczeniu Average in experiment		6,17	0,71	8,4	177	53,9
NIR _{0.05}	I cz.	0,61	0,06	–	18,4	11,5
	II cz.	0,22	0,03	–	10,6	r.n.
	I-II	r.n.	r.n.	–	r.n.	r.n.

Tabela 35
Table 35

Zawartość węgla organicznego i azotu ogólnego, warstwa 20–40 cm
Content of organic carbon and total nitrogen, layer 20–40 cm

Obiekty doświadczenia Experiment sites		C _{org}	N _{og.}	C:N N = 1	K _{rozp.}	Mg _{rozp.}
		[g·kg ⁻¹]	Total N		Soluble K	Soluble Mg
		[mg·kg ⁻¹]				
Bez obornika Without FYM	N ₀	3,35	0,50	7,30	141	52,6
	N ₁	3,80	0,50	7,54	123	52,3
	N ₂	3,95	0,50	7,95	111	57,5
	N ₃	3,80	0,50	7,71	108	53,4
Średnio Average		3,72^B	0,50^B	7,62	121^B	53,9^B
Obornik FYM	N ₀	6,00	0,70	8,53	215	72,7
	N ₁	5,80	0,70	8,32	187	67,6
	N ₂	6,22	0,74	8,40	201	68,4
	N ₃	6,83	0,80	8,90	187	63,5
Średnio Average		6,20^A	0,72^A	8,53	197^A	66,4^A
Średnio Average	N ₀	4,70 ^c	0,58	7,92	178 ^a	59,6
	N ₁	4,80 ^{ab}	0,60	7,93	155 ^b	59,7
	N ₂	5,08 ^{ab}	0,62	8,18	156 ^b	62,9
	N ₃	5,31 ^a	0,63	8,30	148 ^c	58,4
Średnio w doświadczeniu Average in experiment		4,96	0,61	8,07	159	60,1
NIR _{0.05}	I cz.	0,32	0,05	–	21,1	9,39
	II cz.	0,37	r.n.	–	15,1	r.n.
	I-II	0,55	r.n.	–	r.n.	r.n.

Tabela 36
Table 36

Zawartość węgla organicznego i azotu ogólnego, warstwa 40–60 cm
Content of organic carbon and total nitrogen, layer 40–60 cm

Obiekty doświadczenia Experiment sites		C _{org.}	N _{og.} Total N	C:N N=1	K _{rozp.} Soluble K	Mg _{rozp.} Soluble Mg
		[g·kg ⁻¹]			[mg·kg ⁻¹]	
Bez obornika Without FYM	N ₀	1,57	0,33	4,8	122	82,7
	N ₁	1,66	0,35	4,8	120	78,8
	N ₂	1,76	0,35	5,1	98	74,5
	N ₃	1,66	0,35	4,7	103	76,6
Średnio Average		1,66	0,35	4,8	111^B	78,2
Obornik FYM	N ₀	1,85	0,35	5,3	217	80,7
	N ₁	1,78	0,35	5,1	200	87,1
	N ₂	1,84	0,35	5,3	182	89,0
	N ₃	1,70	0,35	4,9	191	91,8
Średnio Average		1,79	0,35	5,2	197^A	87,1
Średnio Average	N ₀	1,71	0,34	5,0	170	81,7
	N ₁	1,72	0,35	5,0	160	83,0
	N ₂	1,80	0,35	5,2	140	81,8
	N ₃	1,68	0,35	4,8	147	84,2
Średnio w doświadczeniu Average in experiment		1,73	0,35	5,0	154	82,6
NIR _{0,05}	I cz.	r.n.	r.n.	–	2,43	r.n.
	II cz.	r.n.	r.n.	–	r.n.	r.n.
	I-II	r.n.	r.n.	–	r.n.	r.n.

Tabela 37
Table 37

Zawartość węgla organicznego i azotu ogólnego, warstwa 60–80 cm
Content of organic carbon and total nitrogen, layer 60–80 cm

Obiekty doświadczenia Experiment sites		C _{org.}	N _{og.} Total N	C:N N = 1	K _{rozp.} Soluble K	Mg _{rozp.} Soluble Mg
		[g·kg ⁻¹]			[mg·kg ⁻¹]	
Bez obornika Without FYM	N ₀	1,11	0,27	4,1	101	98,2
	N ₁	1,15	0,27	4,2	95	102,7
	N ₂	1,07	0,29	3,7	79	99,5
	N ₃	1,11	0,29	3,8	76	96,8
Średnio Average		1,11	0,28^B	3,9	88^B	99,3^A

Tabela 37 cd.
Table 37 cont.

Obornik FYM	N ₀	1,19	0,30	4,0	132	97,1
	N ₁	1,28	0,29	4,4	112	94,3
	N ₂	1,17	0,29	4,0	104	95,3
	N ₃	1,06	0,28	3,9	101	94,7
Średnio Average		1,18	0,29^A	4,1	112^A	95,3^B
Średnio Average	N ₀	1,15	0,28	4,0	116 ^a	97,7
	N ₁	1,22	0,28	4,3	104 ^{ab}	98,5
	N ₂	1,12	0,29	3,8	92 ^b	97,4
	N ₃	1,09	0,28	3,8	89 ^b	95,8
Średnio w doświadczeniu Average in experiment		1,15	0,28	4,0	100	97,3
NIR _{0,05}	I cz.	r.n.	r.n.	–	23,1	r.n.
	II cz.	r.n.	r.n.	–	9,84	r.n.
	I-II	r.n.	0,04	–	r.n.	r.n.

Oprócz zakwaszenia na możliwość utrzymania dużej puli zasobów fosforu glebowego w formie ruchomej – dostępnej dla roślin – wpływ mają także zawartość substancji organicznej oraz przemiany związków węgla w glebie. Imobilizacja jest włączaniem składnika, np. azotu lub fosforu, w biomasę mikroorganizmów, a następnie w związki próchniczne. Procesem prowadzącym do uwalniania składników w postaci mineralnej ze związków organicznych jest mineralizacja. Oba te procesy zachodzą w glebach równolegle, a w glebach nieużytkowanych rolniczo efekt tych procesów jest zerowy.

Powszechnie znany jest fakt, że stosowanie nawozów organicznych jest niezbędnym czynnikiem pozwalającym na utrzymanie lub podwyższenie zawartości węgla organicznego w glebie [Mercik i in. 1998, Mazur 1999, Blecharczyk 1999].

W warunkach prowadzonych badań zawartość węgla organicznego w wierzchniej warstwie gleby wahała się od niespełna 4,6 do 7,7 g·kg⁻¹ i zmniejszała wraz z głębokością. W warstwie 20–40 cm mieściła się w przedziale 3,3–6,8 g·kg⁻¹. Jeszcze mniejsze ilości węgla organicznego stwierdzono w warstwie 40–60 cm średnio 1,73 g·kg⁻¹, natomiast poniżej tej głębokości wartości te nie przekraczały 1,3 g C_{org}·kg⁻¹. Nawożenie organiczne, podobnie jak i nawożenie azotem mineralnym, powodowało istotny wzrost zawartości węgla organicznego w warstwie gleby 0–20 i 20–40 cm. Zawartość azotu ogólnego w glebie pola doświadczalnego w warstwie 0–20 i 20–40 cm była wyrównana i wynosiła od 0,50 do 0,80 g·kg⁻¹. Mniejsze ilości azotu ogólnego 0,33–0,35 g·kg⁻¹ obserwowano w warstwie 40–60 cm, poniżej tej głębokości nie przekraczały 0,3 g·kg⁻¹. W warstwie ornej i podornej na obiektach na których nie stosowano obornika, zawartość azotu ogólnego była istotnie niższa w porównaniu z obiektami, gdzie był on wykorzystywany. Poniżej 40 cm różnice w zawartości azotu ogólnego między obiektami były nieistotne.

Niezależnie od nawożenia obornikiem najmniejszą zawartością węgla organicznego charakteryzowały się objekty, na których nie stosowano azotu w nawozach mineralnych (N₀). Po użyciu azotu w dawkach pojedynczej (N₁) i podwójnej (N₂) ilość węgla organicznego

w glebie istotnie się zwiększyła (tab. 34–37). Obniżenie zawartości węgla organicznego oraz azotu ogólnego na obiektach, na których stosowano duże dawki azotu, można tłumaczyć tzw. efektem bodźcowym dodanego azotu. Polega on na przyspieszeniu tempa mineralizacji związków organicznych w glebie i uwolnieniu dodatkowo z substancji organicznej pewnej ilości azotu szacowanej na 10–20% ilości dodanych w nawozach i powodujących ten efekt [Kundler 1970].

Dalsze zwiększenie dawki nawozów azotowych powodowało istotny spadek zawartości węgla organicznego w glebie. W badaniach Cwojdzńskiego i in. [1993] w wieloletnim ścisłym doświadczeniu polowym, w warunkach stosowania wysokich dawek N – średniorocznie 140 kg N ha^{-1} – po 16 latach pomimo wykorzystywania 40 t obornika na hektar w rotacji obserwowano spadek zawartości C organicznego aż o 34%. Zawartość azotu ogólnego w glebach doświadczenia była najniższa ($0,54 \text{ g N}\cdot\text{kg}^{-1}$) na obiekcie, na którym nie stosowano tego składnika, ani w nawozach organicznych, ani w mineralnych, natomiast najwyższa była na obiektach nawożonych obornikiem oraz podwojoną dawką azotu ($0,88 \text{ g N}\cdot\text{kg}^{-1}$).

Nawożenie obornikiem powodowało istotny, ponad 40% wzrost zawartości azotu ogólnego w glebie. Dane zamieszczone w tabeli dowodzą, że stosowanie azotu w małych dawkach na obiekt (N_1) nie powodowało istotnego wzrostu zawartości tego pierwiastka w glebach. Najprawdopodobniej było to spowodowane większym pobraniem tego składnika przez wyższe plony roślin, uzyskiwane na obiektach (N_1) w porównaniu plonów z obiektu (N_0).

Stosowanie wyższych dawek N powodowało wzbogacanie gleby w ten składnik, gdyż zawartość azotu w glebach obiektów N_2 i N_3 była istotnie większa niż na obiektach N_0 i N_1 . Brak różnicy pomiędzy najwyższą dawką N_3 oraz dawką N_2 może wynikać z równoczesnego dodatniego wpływu używanego w nawozach azotu na produkcję biomasy oraz koncentrację tego pierwiastka w roślinie, co w efekcie powodowało znacznie większe wynoszenie tego składnika przez rośliny na obiektach N_3 niż N_2 [Rabikowska 1999, 2002].

Czynnikiem decydującym o udostępnianiu roślinom wyższym azotu wchodzącego w skład resztek poźniwnych czy obornika jest stosunek C:N w rozkładającej się materii organicznej. Im jest on węższy, tym w większym stopniu rośliny mogą korzystać z azotu zawartego w materii organicznej. Szeroki stosunek C:N sprzyja zbiłczaniu azotu glebowego. W glebach stosunek C:N wskazuje na trwałość połączeń próchnicznych. Obliczone wartości stosunku węgla organicznego do azotu ogólnego w warstwie 0–20 cm przedstawiono w tabeli 34. Na obiektach nawożonych obornikiem stosunek C:N był szerszy i wynosił 8,9:1, natomiast na obiektach nienawożonych obornikiem wynosił średnio 8,3:1.

Przy stosowaniu najwyższej dawki azotu w doświadczeniu w warunkach gospodarki bezobornikowej zaznaczyła się tendencja do zawężania się stosunku C:N do wartości 8,0:1. Świadczyć to może o tym, że w wyniku używania wysokich dawek azotu, przy równocześnie ograniczonej podaży węgla organicznego (tylko z resztek poźniwnych), może następować intensywniejszy rozkład związków organicznych.

Na obiektach nawożonych obornikiem najszerszy stosunek C:N stwierdzono na obiekcie, na którym stosowano tylko pojedyncze dawki nawozów azotowych, tempo przyrostu ilości związków węgla organicznego w glebie było większe niż ilość dostarczanych związków azotu.

W badaniach Moskal i in. [1999] prowadzonych na polu doświadczalnym w SGGW nad zawartością oraz dynamiką rozkładu organicznych związków węgla i azotu w zależności od wieloletniego nawożenia mineralnego i organicznego stwierdzono, że zawartość C organicznego i N ogólnego w glebie wzrastała nieznacznie tylko po systematycznym stosowaniu azotu mineralnego, natomiast znaczny wzrost obserwowano po użyciu obornika. W miarę zwiększania dawek obornika notowano systematyczny wzrost C organicznego w glebie. Po pewnym czasie niezmiennego nawożenia organicznego w doświadczeniach trwających kilkadziesiąt lat osiąga się pewne „nasylenie” próchnicą gleby i od tego czasu utrzymuje się stan równowagi pomiędzy mineralizacją i akumulacją substancji organicznej w glebie. W doświadczeniach SGGW stan równowagi, mineralizacji i akumulacji C organicznego utrzymywał się na kombinacjach nienawożonych oraz nawożonych wyłącznie nawozami mineralnymi. Natomiast na poletkach co roku nawożonych obornikiem w dawce $20 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ – nawet po 70 latach wzrastała zawartość substancji organicznej w glebie. Czas do osiągnięcia stanu równowagi jest uzależniony od warunków glebowych, głównie zawartości próchnicy i składu granulometrycznego gleby [Moskal i in. 1999].

Stan fosforowy

Testy pojemności (statyczne) i test intensywności (ruchliwości)

Całkowita zawartość fosforu i jego rozpuszczalność oraz stężenie fosforu aktywnego

Nawożenie jest jednym z dominujących czynników wpływających na stan fosforowy gleb. Znaczącą rolę w kształtowaniu zawartości fosforu jak i kierunku jego przemian w glebie odgrywa ilość i rodzaj stosowanych nawozów [Sądej 2000]. Wieloletnie nawożenie fosforem, nawet w małych dawkach, zabezpiecza potrzeby pokarmowe roślin uprawnych, może również przeciwdziałać obniżaniu się rezerw tego składnika w glebie [Czuba 1995, Sądej 2000].

Wyniki dotyczące zawartości P zebrane w tabelach 38–41 wskazują, że wnoszone z obornikiem dodatkowe ilości fosforu wraz ze związkami organicznymi korzystnie oddziaływały na stan fosforowy gleby. We wszystkich czterech warstwach na obiektach nawożonych obornikiem stwierdzono istotnie wyższą zawartość fosforu całkowitego oraz rozpuszczalnego w porównaniu z obiektami bez obornika. Wraz z głębokością zawartość fosforu całkowitego oraz jego form rozpuszczalnych malała zarówno na obiektach nawożonych obornikiem, jak i jeszcze silniej na obiektach nawożonych wyłącznie mineralnie.

Stosowane w zróżnicowanych dawkach nawożenie azotem mineralnym nie oddziaływało istotnie na całkowitą zawartość fosforu w glebie. Takiej zależności nie stwierdzono w żadnej z czterech warstw. Jednakże, szczególnie w warunkach gospodarki bezobornikowej, na obiektach, na których stosowano podwojone i potrojone dawki azotu mineralnego zawartość fosforu całkowitego była wyraźnie niższa. Tendencji do obniżania się ilości fosforu całkowitego w glebie po użyciu dużych dawek azotu mineralnego nie obserwowano na podbloku nawożonym obornikiem w żadnej z badanych warstw (tab. 38–41).

Znacznie silniej niż zawartość fosforu całkowitego czynniki doświadczenia modyfikowały ilości fosforu rozpuszczalnego, oznaczanego testem Egnera-Riehma. We wszystkich

warstwach gleby nawożone organicznie charakteryzowały się istotnie wyższą zasobnością w fosfor przyswajalny niż gleby nienawożone obornikiem. Warstwa orna zawierała o ponad 60% więcej fosforu a podorna aż o 15% więcej. Największe różnice stwierdzono w warstwie położonej na głębokości 60–80 cm. Gleba nawożona obornikiem zawierała 2,7-krotnie więcej fosforu niż nawożona wyłącznie mineralnie. Równie silne (3,5-krotne) było wzbogacenie tej warstwy w fosfor aktywny w porównaniu z około 2-krotnym wzrostem zawartości P-aktywnego pod wpływem nawożenia obornikiem stwierdzonego w warstwie ornej i podornej. Świadczy to o bardzo silnym oddziaływaniu obornika na wzbogacenie w fosfor oraz utrzymaniu go w formie dostępnej dla roślin szczególnie głębszych warstw gleby.

Drugi czynnik doświadczenia – nawożenie azotem mineralnym istotnie oddziaływało na zawartość fosforu oznaczanego testem Egnera-Riehma do głębokości 60 cm. Średnio w doświadczeniu najwyższe zawartości fosforu przyswajalnego stwierdzono na obiektach nienawożonych azotem mineralnym i nawożonych obornikiem.

W miarę wzrostu dawek azotu obserwowano stopniowe zmniejszenie się zawartości fosforu zarówno na obiektach bez obornika, jak i nawożonych organicznie. Wiąże się to ze zwiększonym pobraniem i odprowadzaniem z plonami fosforu przez rośliny nawożone większymi dawkami azotu.

W warstwie ornej i podornej zawartość fosforu przyswajalnego zmniejszała się w miarę wzrostu dawek azotu zarówno na obiekcie z obornikiem, jak i bez, co należy wiązać ze wzrastającym pobraniem tego pierwiastka przez rośliny. W głębszej warstwie 40–60 cm zawartość fosforu przyswajalnego była jednak wyższa na obiektach bez obornika, ale nawożonych wysokimi dawkami azotu (N_2 i N_3), w porównaniu z obiektem kontrolnym (N_0) i obiektem z dawką (N_1).

Związki organiczne wprowadzane do gleby wraz z nawozami nie tylko zwiększały ilość fosforu nagromadzonego w glebie, ale poprawiały również jego dostępność dla roślin. Udział fosforu rozpuszczalnego w całkowitej zawartości tego składnika w glebie na obiektach nawożonych wyłącznie nawozami mineralnymi średnio dla poszczególnych warstw malał wraz z głębokością i wynosił: 0–20 cm 14,3%, 20–40 cm 12,5%, 40–60 cm 7,4%, 60–80 cm 4,7% (tab. 38–41). Na obiektach nawożonych obornikiem udział ten był większy i sięgał blisko 20% w warstwie wierzchniej i ponad 18% w warstwie podornej. Różnice pomiędzy obiektami nawożenia mineralnego i organiczno-mineralnego w głębiej położonych warstwach 40–80 cm były prawie dwukrotne.

Średnio w doświadczeniu udział fosforu rozpuszczalnego w fosforze całkowitym był najwyższy na obiektach, na których nie stosowano nawożenia azotem mineralnym. Zwiększanie dawek azotu mineralnego powodowało zmniejszenie się ilości fosforu rozpuszczalnego w ogólnej puli fosforu w badanych warstwach, z wyjątkiem obiektu, gdzie nie używano obornika w warstwie 40–60 cm.

W tabelach 38–41 zamieszczono także dane dotyczące zawartości najbardziej labilnej formy fosforu mianowicie fosforu aktywnego. Forma ta stanowi niewielką część fosforu całkowitego (przeważnie nie przekracza 1%), jednak składa się na nią grupa związków fosforu o największym znaczeniu w żywieniu roślin tym pierwiastkiem.

Średnio na obiektach, na których nie stosowano obornika, stężenie fosforu aktywnego w 0,01 mol $\text{CaCl}_2 \cdot \text{dm}^{-3}$ wynosiło w warstwie 0–20 cm 0,40 mg P·dm⁻³, a w warstwie

20–40 cm 0,32 mg P·dm⁻³. W warstwach położonych poniżej 40 cm obserwowano znaczny spadek ruchliwości fosforanów – obniżenie stężenia fosforu aktywnego. W warstwie 60–80 cm sorpcja fosforu była tak silna, że wyniki uzyskane podczas analizy były niższe niż wartości dla próby zerowej.

Na obiektach nawożonych obornikiem w warstwie ornej i podornej stwierdzono blisko dwukrotnie większe stężenia fosforu aktywnego, co świadczy o korzystnym oddziaływaniu nawożenia organicznego na ruchliwość fosforu i przechodzenie go do roztworu gleb. Nawożenie azotem powodowało istotne obniżenie stężenia P aktywnego, lecz tylko w warstwie ornej.

Łabętowicz i Rutkowska [2001] w swoich badaniach stwierdzili korzystne oddziaływanie stosowanych nawozów organicznych na ilość fosforu znajdującą się w roztworze glebowym. Nawożenie obornikiem w ich badaniach przyczyniało się do zwiększenia stężenia fosforanów w roztworze glebowym, natomiast nawożenie azotowe obniżało je.

Tabela 38
Table 38

Stan fosforowy gleb, warstwa 0–20 cm
Phosphorus status of soils, layer 0–20 cm

Obiekty doświadczenia Experiment sites		P _{całkowity} Total P	P _{rozpuszczalny} Soluble P	% udział P _{rozp.} w P _{całkowitym} % part of soluble P in total P	P _{aktywny} Active P
		[mg P·kg ⁻¹]		[%]	[mg P·dm ⁻³]
Bez obornika Without FYM	N ₀	441	74,7	16,9	0,42
	N ₁	438	64,0	14,6	0,45
	N ₂	425	58,3	13,7	0,38
	N ₃	429	51,3	12,0	0,33
Średnio Average		433^B	62,1^B	14,3^B	0,40^B
Obornik FYM	N ₀	517	121,8	23,5	0,80
	N ₁	512	105,7	20,6	0,82
	N ₂	514	92,2	18,0	0,81
	N ₃	515	81,7	15,8	0,69
Średnio Average		510^A	100,3^A	19,6^A	0,78^A
Średnio Average	N ₀	479	98,2 ^a	20,2 ^a	0,61 ^a
	N ₁	475	84,8 ^b	17,6 ^b	0,63 ^a
	N ₂	469	75,2 ^c	15,8 ^c	0,59 ^b
	N ₃	464	66,5 ^d	14,2 ^d	0,51 ^c
Średnio w doświadczeniu Average for the experiment		471	81,2	17,0	0,59
NIR _{0,05}	I cz.	29,2	8,87	1,67	0,05
	II cz.	r.n.	6,75	1,00	0,07
	I · II	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.

Tabela 39
Table 39

Stan fosforowy gleb, warstwa 20–40 cm
Phosphorus status of soils, layer 20–40 cm

Obiekty doświadczenia Experiment sites		P _{całkowity} Total P	P _{rozpuszczalny} Soluble P	% udział P _{rozp.} w P _{całkowitym} % part of soluble P in total P	P _{aktywny} Active P
		[mg P·kg ⁻¹]		[%]	[mg P·dm ⁻³]
Bez obornika without FYM	N ₀	373	53,6	14,3	0,35
	N ₁	390	52,0	13,2	0,36
	N ₂	356	43,0	12,0	0,30
	N ₃	362	38,2	10,6	0,25
Średnio – Average		370^B	46,5^B	12,5^B	0,32^B
Obornik FYM	N ₀	509	106	20,9	0,77
	N ₁	472	91,5	19,4	0,63
	N ₂	475	87,7	18,5	0,84
	N ₃	484	77,0	15,9	0,73
Średnio – Average		485^A	90,6^A	18,7^A	0,74^A
Średnio Average	N ₀	441	80,0 ^a	17,7 ^a	0,56
	N ₁	431	72,0 ^b	16,3 ^b	0,49
	N ₂	416	65,1 ^b	15,1 ^c	0,57
	N ₃	423	58,0 ^b	13,3 ^d	0,49
Średnio w doświadczeniu Average for the experiment		428	68,6	15,6	0,53
NIR _{0,05}	I cz.	47,6	4,47	1,00	0,14
	II cz.	r.n.	7,26	1,17	r.n.
	I-II	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.

Tabela 40
Table 40

Stan fosforowy gleb, warstwa 40–60 cm
Phosphorus status of soils, layer 40–60 cm

Obiekty doświadczenia Experiment sites		P _{całkowity} Total P	P _{rozpuszczalny} Soluble P	% udział P _{rozp.} w P _{całkowitym} % part of soluble P in total P	P _{aktywny} Active P
		[mg P·kg ⁻¹]		[%]	[mg P·dm ⁻³]
Bez obornika Without FYM	N ₀	201	9,0	4,4	0,01
	N ₁	216	10,4	4,7	0,02
	N ₂	192	16,4	8,7	0,02
	N ₃	189	21,8	11,8	0,01
Średnio – Average		199^B	14,4^B	7,4^B	0,02

Tabela 40 cd.
Table 40 cont.

Obornik FYM	N ₀	250	61,2	24,6	0,10
	N ₁	237	49,0	20,7	0,10
	N ₂	223	24,4	11,0	0,07
	N ₃	223	21,1	9,2	0,02
Średnio – Average		233^A	39,0^A	16,3^A	0,07
Średnio Average	N ₀	225	35,1 ^a	14,5 ^a	0,05
	N ₁	226	29,7 ^b	12,7 ^{ab}	0,06
	N ₂	207	20,4 ^d	9,9 ^b	0,04
	N ₃	206	21,5 ^c	10,5 ^b	0,02
Średnio w doświadczeniu Average for the experiment		217	26,7	12,0	0,04
NIR _{0,05}	I cz.	25,1	0,61	1,72	r.n.
	II cz.	r.n.	0,83	3,43	r.n.
	I-II	r.n.	1,18	4,52	r.n.

Tabela 41
Table 41

Stan fosforowy gleb, warstwa 60–80 cm
Phosphorus status of soils, layer 60–80 cm

Obiekty doświadczenia Experiment sites		P całkowity Total P	P rozpuszczalny Soluble P	% udział P _{rozp.} w P całkowitym % part of soluble P in total P	P aktywny Active P
		[mg P·kg ⁻¹]		[%]	[mg P·dm ⁻³]
Bez obornika Without FYM	N ₀	142	9,3	6,2	wartości poniżej granicy wykrywalności values below the detection limit
	N ₁	146	7,8	5,3	
	N ₂	137	4,8	3,4	
	N ₃	127	5,1	4,0	
Średnio – Average		138^B	6,7^B	4,7	
Obornik FYM	N ₀	163	13,2	8,1	
	N ₁	154	12,0	7,7	
	N ₂	169	9,9	5,8	
	N ₃	165	11,7	6,9	
Średnio – Average		163^A	11,7^A	7,1	
Średnio Average	N ₀	152	11,2	7,1	
	N ₁	150	9,9	6,5	
	N ₂	153	7,3	4,6	
	N ₃	146	8,4	5,5	

Tabela 41 cd.
Table 41 cont.

Średnio w doświadczeniu Average for the experiment		150	9,2	5,9	wartości poniżej granicy wykrywalności values below the detection limit
NIR _{0,05}	I cz.	9,5	r.n.	r.n.	
	II cz.	r.n.	r.n.	r.n.	
	I-II	r.n.	r.n.	r.n.	

Testy kinetyki (uwalniania):

Wielokrotna ekstrakcja 0,01 mol·dm⁻³ CaCl₂

Uwalnianie fosforu – poprzez wielokrotną ekstrakcję tej samej próbki gleby 0,01 mol·dm³ CaCl₂ nie jest wykorzystywane w badaniach zasobności gleb na szerszą skalę ze względu na dużą pracochłonność analiz. Jednak najbardziej odzwierciedlają wielokrotne odnawianie się stężenia fosforu w glebach w czasie wegetacji podczas pobierania fosforu przez rośliny.

W badaniach własnych taką wielokrotną ekstrakcję przeprowadzono w glebach pobranych z poszczególnych warstw, do głębokości 60 cm. Pominięto warstwę 60–80 cm, ponieważ wyniki wykonanych wcześniej testów analizujących jej stan fosforowy wskazały na niską zasobność w fosfor warstwy położonej najniżej i przewidywano brak możliwości uwalniania tego pierwiastka przez roztwory ekstrakcyjne o niewielkiej sile roztwarzającej.

Glebę pochodzącą z warstwy ornej (0–20 cm) obiektów podbloku nienawożonego obornikiem w wieloleciu – analizowano podczas siedmiokrotnej ekstrakcji próbek, a warstwę położoną głębiej (20–40 cm) – podczas ekstrakcji dziewięciokrotnej.

Warstwa orna gleby nienawożonej obornikiem uwolniła od 15 do 18 mg P·kg⁻¹, co stanowiło poniżej 5% całkowitej zawartości P oznaczonej w tej warstwie (tab. 42, 38). Największe ilości fosforu, bo ponad 25% uwolnionego P, przechodziło do roztworu podczas pierwszej ekstrakcji. W kolejnych ekstrakcjach ilość usuniętego z gleby fosforu była coraz mniejsza, a podczas siódmej uwolniono z gleby jedynie od 4,5 do 8,0% łącznej ilości P przechodzącego do 0,01 mol·dm⁻³ CaCl₂. Najwięcej fosforu uwolniono z gleby obiektu nienawożonego azotem, na którym pobranie tego składnika przez nisko plonujące rośliny było najmniejsze. Najmniej fosforu udało się przeprowadzić do tego roztworu z gleb intensywnie nawożonych azotem obiektów N₂ i N₃.

Ilości uwolnionego fosforu z kolejnej warstwy 20–40 cm były mniejsze pomimo zastosowania dziewięciu następujących po sobie ekstrakcji. Łącznie z tej warstwy udało się pozyskać od 12,4 do 16,6 mg P·kg⁻¹. W tej warstwie obserwowano wyraźną tendencję do zmniejszania się ilości uwolnionego fosforu w miarę zwiększania dawek nawozów

azotowych, a różnice pomiędzy skrajnymi obiektami wyniosły przeciętnie około 4 mg P·kg⁻¹ (tab. 42).

Kolejna, głębiej położona warstwa gleby (40–60 cm) podczas sześciu kolejnych ekstrakcji w sumie uwolniła poniżej 4 mg P·kg⁻¹. Przeciwnie niż w warstwach 0–20 i 20–40 cm z gleb nawożonych wyższymi dawkami azotu uzyskano znacznie więcej fosforu niż z gleb nienawożonych azotem lub nawożonych małymi dawkami tego składnika.

Próbki gleby pobrane z warstw ornej i podornej obiektów nawożonych systematycznie obornikiem ekstrahowano dziewięciokrotnie, natomiast sześciokrotnie warstwę 40–60 cm.

Z wierzchniej warstwy gleby nawożonej obornikiem uzyskano ponad 50% więcej fosforu niż z gleb obiektów doświadczenia nawożonych wyłącznie mineralnie (tab. 42 i 43). Najwięcej fosforu, od 24,4 do 28,8% P, uwalniały już podczas pierwszej ekstrakcji gleb. Warstwa 20–40 cm uwalniała większe ilości P niż warstwa położona wyżej. W miarę wzrostu dawek azotu malała suma uwolnionego fosforu z warstw 0–40 cm. Przeciwnie, ilość uwolnionego fosforu z warstwy 40–60 cm rosła wraz ze wzrostem dawek azotu mineralnego, a stosowanie obornika znacznie zwiększało ilości uwolnionego fosforu z tej warstwy.

Tabela 42

Table 42

Uwalnianie fosforu z gleby, podbłok bez obornika
Release of phosphorus, plot without FYM

Warstwa 0–20 cm – Layer 0–20 cm								
Ekstrakcja Extraction	N ₀		N ₁		N ₂		N ₃	
	[mg P·kg ⁻¹]	[%]	[mg P·kg ⁻¹]	[%]	[mg P·kg ⁻¹]	[%]	[mg P·kg ⁻¹]	[%]
I	4,86	27,0	4,20	25,6	4,00	26,4	4,57	29,0
II	3,20	17,8	2,74	16,7	2,83	18,7	2,91	18,5
III	2,59	14,4	2,19	15,4	2,12	14,0	2,65	16,8
IV	1,99	11,0	1,90	11,6	1,82	12,0	1,93	12,3
V	1,80	10,0	2,37	14,5	1,77	11,7	1,64	10,4
VI	2,08	11,5	1,69	10,3	1,38	9,1	1,35	8,6
VII	1,49	8,3	1,30	7,9	1,21	8,0	1,21	4,4
Suma Sum	18,01	–	16,39	–	15,13	–	15,74	–
Warstwa 20–40 cm – Layer 20–40 cm								
Ekstrakcja Extraction	N ₀		N ₁		N ₂		N ₃	
	[mg P·kg ⁻¹]	[%]	[mg P·kg ⁻¹]	[%]	[mg P·kg ⁻¹]	[%]	[mg P·kg ⁻¹]	[%]
I	3,69	22,3	3,06	21,5	3,00	22,1	2,65	21,4
II	2,60	15,7	2,23	15,6	2,36	17,4	1,97	15,9
III	2,12	12,8	1,85	13,0	1,77	13,1	1,54	12,4
IV	1,77	10,7	1,56	10,9	1,32	9,7	1,20	9,7
V	1,57	9,5	1,34	9,4	1,16	8,6	1,16	9,4
VI	1,32	8,0	1,20	8,4	1,12	8,3	1,07	8,6
VII	1,30	7,9	1,09	7,6	1,01	7,4	1,04	8,4

Tabela 42 cd.
Table 42 cont.

VIII	1,14	6,9	1,00	7,0	0,92	6,8	0,90	7,4
IX	1,04	6,2	0,92	6,6	0,89	6,6	0,84	6,8
Suma Sum	16,55	-	14,25	-	13,55	-	12,37	-
Warstwa 40–60 cm – Layer 40–60 cm								
Ekstrakcja Extraction	N ₀		N ₁		N ₂		N ₃	
	[mg P·kg ⁻¹]	[%]	[mg P·kg ⁻¹]	[%]	[mg P·kg ⁻¹]	[%]	[mg P·kg ⁻¹]	[%]
I	0,38	21,3	0,26	18,2	0,67	20,2	0,88	23,5
II	0,30	16,9	0,21	14,7	0,74	22,3	0,6	17,6
III	0,32	18,0	0,29	20,3	0,50	15,1	0,62	16,5
IV	0,28	15,7	0,28	19,6	0,48	14,4	0,54	14,4
V	0,27	15,2	0,20	14,0	0,48	14,4	0,51	13,6
VI	0,23	12,9	0,19	13,2	0,45	13,6	0,54	14,4
Suma Sum	1,78	-	1,43	-	3,32	-	3,75	-

Tabela 43
Table 43

Uwalnianie fosforu z gleby, podbłok nawożony obornikiem
Release of phosphorus, plot with FYM treatment

Warstwa 0–20 cm – Layer 0–20 cm								
Ekstrakcja Extraction	N ₀		N ₁		N ₂		N ₃	
	[mg P·kg ⁻¹]	[%]	[mg P·kg ⁻¹]	[%]	[mg P·kg ⁻¹]	[%]	[mg P·kg ⁻¹]	[%]
I	6,9	24,4	6,6	26,0	7,1	28,2	6,9	28,8
II	4,5	15,9	4,1	16,1	4,3	17,1	4,3	17,9
III	3,7	13,1	3,2	12,6	3,1	12,4	2,9	12,1
IV	2,9	10,2	2,5	9,8	2,4	9,5	2,3	9,6
V	2,5	8,8	2,1	8,3	2,0	8,0	1,8	7,5
VI	2,2	7,7	1,9	7,5	1,7	6,8	1,6	6,7
VII	2,0	7,1	1,8	7,1	1,6	6,4	1,5	6,2
VIII	1,8	6,4	1,7	6,7	1,5	6,0	1,4	5,8
IX	1,8	6,4	1,5	5,9	1,4	5,6	1,3	5,4
Suma – Sum	28,3	-	25,4	-	25,1	-	24,0	-
Warstwa 20–40 cm – Layer 20–40 cm								
Ekstrakcja Extraction	N ₀		N ₁		N ₂		N ₃	
	[mg P·kg ⁻¹]	[%]	[mg P·kg ⁻¹]	[%]	[mg P·kg ⁻¹]	[%]	[mg P·kg ⁻¹]	[%]
I	7,4	24,3	6,5	24,8	6,5	26,7	6,7	27,9
II	4,8	15,7	4,2	16,0	4,0	16,5	3,8	15,8
III	3,8	12,5	3,4	13,0	3,0	12,3	2,9	12,1
IV	3,3	10,8	2,8	10,7	2,5	10,3	2,4	10,0
V	2,8	9,2	2,5	9,5	2,1	8,6	2,0	8,3

Tabela 43 cd.
Table 43 cont.

VI	2,5	8,2	1,6	6,1	1,9	7,8	1,8	7,5
VII	2,2	7,2	1,9	7,3	1,6	6,6	1,6	6,7
VIII	1,9	6,2	1,7	6,5	1,4	5,8	1,5	6,3
IX	1,8	5,9	1,6	6,1	1,3	5,4	1,3	5,4
Suma – Sum	30,5	–	26,2	–	24,3	–	24,0	–
Warstwa 40–60 cm – Layer 40–60 cm								
Ekstrakcja Extraction	N ₀		N ₁		N ₂		N ₃	
	[mg P·kg ⁻¹]	[%]	[mg P·kg ⁻¹]	[%]	[mg P·kg ⁻¹]	[%]	[mg P·kg ⁻¹]	[%]
I	0,49	17,7	1,15	19,6	2,11	24,0	2,29	24,9
II	0,42	15,2	1,02	17,4	1,60	18,2	1,4	19,0
III	0,45	16,2	0,94	16,0	1,33	15,8	1,50	16,4
IV	0,45	16,2	0,92	15,7	1,55	17,6	1,47	16,0
V	0,56	20,2	0,94	16,0	1,18	13,4	1,16	12,6
VI	0,40	14,2	0,90	15,3	0,97	11,0	1,02	11,1
Suma – Sum	2,77	–	5,87	–	8,80	–	9,18	–

Wyniki uzyskane podczas wielokrotnej ekstrakcji gleb z podbloku nienawożonego obornikiem wskazują, że najłatwiej rozpuszczalny fosfor glebowy znajduje się w dwóch górnych warstwach, natomiast poniżej tego poziomu ilość pozyskanego fosforu była dziesięciokrotnie mniejsza. Udział wyekstrahowanego fosforu z warstwy 40–60 cm w łącznej ilości P uwolnionego z warstw 0–60 cm nie przekraczał 12%. Wyraźna jest tendencja do zmniejszania się sumy wyekstrahowanego fosforu ze wszystkich warstw w miarę wzrostu dawek nawożenia azotem, przy jednoczesnym zwiększaniu się udziału uwolnionego fosforu z warstwy położonej najniżej w ogólnej ilości uwalnianego fosforu z warstw 0–60 cm (tab. 44). W warstwie 0–20 cm nawożenie obornikiem, przy takich samych dawkach nawożenia azotowego, pozwalało na usunięcie ponad 50% większych ilości fosforu niż w warunkach gleb nienawożonych organicznie. W miarę wzrostu poziomu nawożenia azotem malała łączna ilość uwolnionego fosforu. Sumaryczne zestawienie ilości fosforu uwolnionego z warstw 0–60 cm wskazuje, że w warunkach prowadzonych badań polowych warstwa orna i podorna były równie cenne pod względem możliwości zaopatrywania roślin w fosfor. Na ilość uwolnionego z gleb fosforu wyraźnie wpłynęło nawożenie azotem. Obiekty nienawożone azotem w wieloleciu uwalniały więcej fosforu niż gleby nawożone tym składnikiem. Wraz ze wzrostem dawek nawożenia azotem, przy nieco mniejszej ilości uwolnionego łącznie P, rośnie udział warstwy 40–60 cm w sumie usuniętego fosforu. Mimo bardzo dużej różnicy w ilości fosforu uwolnionego z obiektu nienawożonego i nawożonego obornikiem względne zróżnicowanie rozpuszczalności fosforu w badanych warstwach było zbliżone.

Tabela 44
Table 44

Udział uwolnionego P z warstw w stosunku do sumy warstw 0–60 cm [%]
Released P in particular layers as a sum of these layers 0-60 cm (%)

Warstwa [cm] Layer	Obiekty wieloletniego doświadczenia polowego Long term field experiment sites							
	Bez obornika Without FYM				Nawożenie obornikiem Manure fertilization			
	N ₀	N ₁	N ₂	N ₃	N ₀	N ₁	N ₂	N ₃
0–20	49,6	51,1	47,3	49,4	46,0	44,2	43,1	42,0
20–40	45,5	44,4	42,3	38,8	49,5	45,6	41,8	42,0
40–60	4,9	4,5	10,4	11,8	4,5	10,2	15,1	16,0
Suma [mg P·kg ⁻¹] Sum	36,34	32,07	32,00	31,6	61,57	57,47	58,20	57,18

Testy pojemności sorpcyjnej względem fosforu

Indeks sorpcji fosforu według Bache

Wyniki uzyskane podczas analizy sorpcji fosforu wg Bache próbek glebowych pobranych ze wszystkich czterech warstw gleby doświadczenia 0–80 cm wskazały, że wartości indeksu sorpcji fosforu były głównie zależne od zmiany właściwości fizycznych gleby, wybierając wyższe wartości wraz ze zwiększaniem głębokości. Przeciętnie w doświadczeniu uzyskano następujące indeksy sorpcji według Bache: dla warstwy gleby 0–20 cm – 5,7; dla warstwy podornej 20–40 cm – 9,4; dla warstwy 40–60 cm – 16,4 oraz dla warstwy 60–80 cm – 26,3. Wskazuje to na sorbowanie przez warstwę orną niespełna 4% dodanego P. Głębiej położone warstwy zatrzymywały 7% (20–40 cm) i 11% (40–60 cm). Najgłębsza spośród badanych warstw 60–80 cm wiązała niespełna 17% ilości dodanego fosforu. Może to świadczyć o niewielkich możliwościach sorpcyjnych względem P badanej gleby. Jednak tak duże dodatki P do gleb nie mają zastosowania w praktyce rolniczej. Dodanie do 5 g gleby 100 cm⁻³ roztworu o stężeniu 77,5 µg P·cm⁻³ stanowi dodatek 1,55 g P·kg⁻¹ gleby, co w przeliczeniu na hektar wynosi 4650 kg P, a więc ponad 350 razy więcej niż ilości tego składnika zalecane do nawożenia gleb w naszym kraju (~13 kg P·ha⁻¹).

Tabela 45
Table 45

Indeks sorpcji według Bache, warstwa 0–20 cm
Sorption index by Bache, layer 0–20 cm

Obiekty doświadczenia Experiment sites		Stężenie P po ekstrakcji P concentration after extraction		X [$\mu\text{mol P}\cdot\text{g}^{-1}$]	$\log_{10} \text{Cr}$	Indeks Index
		[$\mu\text{g P}\cdot\text{cm}^{-3}$]	[$\mu\text{mol P}\cdot\text{cm}^{-3}$]			
Bez obornika Without FYM	N ₀	73,7	2,38	2,42	0,378	6,43
	N ₁	74,4	2,40	2,00	0,380	5,25
	N ₂	74,5	2,41	1,89	0,382	4,96
	N ₃	73,4	2,37	2,59	0,376	6,92
Średnio – Average		74,0	2,39	2,22	0,379	5,89
Obornik FYM	N ₀	74,7	2,41	1,80	0,378	4,72
	N ₁	74,8	2,41	1,74	0,380	4,54
	N ₂	74,2	2,40	2,06	0,382	5,44
	N ₃	73,2	2,36	2,74	0,376	7,36
Średnio – Average		74,2	2,40	2,08	0,380	5,51
Średnio Average	N ₀	74,2 ^a	2,39	2,11 ^b	0,381	5,57 ^b
	N ₁	74,6 ^a	2,41	1,87 ^b	0,382	4,90 ^b
	N ₂	74,4 ^a	2,40	1,98 ^b	0,380	5,20 ^b
	N ₃	73,3 ^b	2,37	2,67 ^a	0,376	7,14 ^a
Średnio w doświadczeniu Average for the experiment		74,1	2,39	2,15	0,380	5,70
NIR _{0,05}	I cz.	r.n.	–	r.n.	–	r.n.
	II cz.	0,49	–	0,315	–	0,880
	I-II	0,83	–	r.n.	–	r.n.

Stosowanie w doświadczeniu przez wiele lat nawożenia organicznego w postaci obornika nie powodowało istotnych zmian w wartościach indeksu sorpcji fosforu w żadnej z analizowanych warstw gleby (tab. 45–48). Ilości fosforu wiązanego (parametr X) przez glebę nawożoną obornikiem były nieznacznie mniejsze niż zatrzymywane przez bardziej zakwaszoną, mniej zasobną w substancję organiczną i labilne formy fosforu glebę nawożoną wyłącznie nawozami mineralnymi.

Istotne zwiększenie indeksu sorpcji fosforu według Bache obserwowano w przypadku stosowania wzrastających dawek nawozów azotowych. Efekt ten był obserwowany w glebach pobranych z warstwy ornej 0–20 cm i podornej 20–40 cm. Na obiektach, na których stosowano najwyższe, potrójone dawki azotu mineralnego, stwierdzono istotne zwiększenie ilości zasorbowanego fosforu przez gleby. Wyższe wartości indeksu sorpcji P według Bache na obiektach N₃ można tłumaczyć prawdopodobnie wyczerpaniem fosforu z gleb intensywnie nawożonych azotem. W warunkach intensywnego odżywiania roślin N – płony roślin i pobranie z nimi składników pokarmowych, w tym fosforu, było w doświadczeniu największe. Intensywne nawożenie azotem wywierało również pośredni wpływ na właściwości sorpcyjne gleby, np. poprzez zmianę odczynu czy zawartości substancji organicznej.

Tabela 46
Table 46

Indeks sorpcji według Bache, warstwa 20–40 cm
Sorption index by Bache, layer 20–40 cm

Obiekty doświadczenia Experiment sites		Stężenie P po ekstrakcji P concentration after extraction		X [$\mu\text{mol P}\cdot\text{g}^{-3}$]	\log_{10} Cr	Indeks Index
		[$\mu\text{g P}\cdot\text{cm}^{-3}$]	[$\mu\text{mol P}\cdot\text{cm}^{-3}$]			
Bez obornika Without FYM	N ₀	72,1	2,33	3,46	0,366	9,45
	N ₁	71,9	2,32	3,57	0,366	9,82
	N ₂	71,3	2,30	3,94	0,364	10,91
	N ₃	70,3	2,27	4,59	0,358	12,96
Średnio – Average		71,4	2,31	3,89	0,364	10,79
Obornik FYM	N ₀	73,4	2,37	2,61	0,374	7,02
	N ₁	72,6	2,34	3,11	0,372	8,40
	N ₂	73,5	2,37	2,56	0,374	6,84
	N ₃	71,7	2,31	3,71	0,362	10,18
Średnio – Average		72,8	2,35	3,00	0,371	8,11
Średnio Average	N ₀	72,7 ^a	2,35	3,04 ^b	0,370	8,24 ^b
	N ₁	72,3 ^a	2,33	3,34 ^b	0,369	9,11 ^b
	N ₂	72,4 ^a	2,34	3,25 ^b	0,369	8,88 ^b
	N ₃	71,0 ^b	2,29	4,15 ^a	0,360	11,57 ^a
Średnio w doświadczeniu Average for the experiment		72,1	2,33	3,44	0,367	9,45
NIR _{0,05}	I cz.	r.n.	–	r.n.	–	r.n.
	II cz.	0,81	–	0,521	–	1,524
	I-II	r.n.	–	r.n.	–	r.n.

Tabela 47
Table 47

Indeks sorpcji według Bache, warstwa 40–60 cm
Sorption index by Bache, layer 40–60 cm

Obiekty doświadczenia Experiment sites		Stężenie P po ekstrakcji P concentration after extraction		X [$\mu\text{mol P}\cdot\text{g}^{-3}$]	\log_{10} Cr	Indeks Index
		[$\mu\text{g P}\cdot\text{cm}^{-3}$]	[$\mu\text{mol P}\cdot\text{cm}^{-3}$]			
Bez obornika Without FYM	N ₀	67,6	2,18	6,39	0,338	19,0
	N ₁	68,7	2,22	5,66	0,346	16,4
	N ₂	68,7	2,22	5,67	0,346	16,4
	N ₃	68,0	2,20	6,09	0,342	17,9
Średnio – Average		68,2	2,20	5,95	0,343	17,4

Tabela 47 cd.
Table 47 cont.

Obornik FYM	N ₀	69,9	2,26	4,86	0,356	14,6
	N ₁	68,3	2,20	5,90	0,344	17,2
	N ₂	69,4	2,24	5,20	0,350	14,9
	N ₃	69,6	2,25	5,04	0,352	14,4
Średnio – Average		69,3	2,24	5,25	0,350	15,3
Średnio Average	N ₀	68,7	2,22	5,63	0,347	16,8
	N ₁	68,5	2,21	5,77	0,345	16,8
	N ₂	69,0	2,23	5,43	0,348	15,7
	N ₃	68,8	2,22	5,57	0,347	16,1
Średnio w doświadczeniu Average for the experiment		68,8	2,22	5,60	0,347	16,4
NIR _{0,05}	I cz.	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.
	II cz.	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.
	I-II	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.

Jak wynika z przedstawionych danych dotyczących sorpcji mierzonej za pomocą indeksu według Bache, pod wpływem wielokrotnego nawożenia wysokimi dawkami nawozów azotowych wartości indeksu zwiększały się istotnie w warstwie ornej i podornej gleb. Istotnie mniejsze, na najwyższej dawce azotu, były natomiast ilości fosforu desorbowanego przez glebę, zwłaszcza na najwyższej dawce azotu.

W porównaniu z warstwą orną położone niżej warstwy gleby sorbowały większe ilości fosforu. Średnio w doświadczeniu względne wartości indeksu sorpcji wynosiły odpowiednio: dla warstwy 20–40 cm – 166%, dla warstwy 40–60 cm – 288% oraz dla warstwy 0–20 cm – 460% wartości indeksu, wyznaczonego dla warstwy 0–20 cm.

Tabela 48
Table 48

Indeks sorpcji według Bache, warstwa 60–80 cm
Sorptions index by Bache, layer 60–80 cm

Obiekty doświadczenia Experiment sites		Stężenie P po ekstrakcji P concentration after extraction		X [μmol P·g ⁻³]	log ₁₀ Cr	Indeks Index
		[μg P·cm ⁻³]	[μmol P·cm ⁻³]			
Bez obornika Without FYM	N ₀	64,9	2,10	8,10	0,324	25,2
	N ₁	64,9	2,09	8,11	0,322	25,3
	N ₂	64,7	2,09	8,24	0,320	25,8
	N ₃	64,8	2,09	8,19	0,322	25,6
Średnio – Average		64,8	2,09	8,16	0,322	25,5

Tabela 48 cd.
Table 48 cont.

Obornik FYM	N ₀	65,2	2,10	7,94	0,322	24,6
	N ₁	63,9	2,06	8,72	0,312	27,8
	N ₂	63,8	2,06	8,83	0,312	28,2
	N ₃	63,9	2,06	8,72	0,316	27,7
Średnio – Average		64,2	2,07	8,55	0,316	27,1
Średnio Average	N ₀	65,0	2,10	8,02	0,323	24,9
	N ₁	64,4	2,08	8,41	0,317	26,5
	N ₂	64,2	2,07	8,54	0,316	27,0
	N ₃	64,3	2,08	8,46	0,319	26,7
Średnio w doświadczeniu Average for the experiment		64,5	2,08	8,36	0,319	26,3
NIR _{0,05}	I cz.	r.n.	r.n.	r.n.	0,005	r.n.
	II cz.	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.
	I-II	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.

Parametry sorpcji fosforu według Pagela

W tabelach 49–52 zamieszczono wyniki dotyczące właściwości sorpcyjnych gleb względem fosforu, wyznaczone uproszczoną metodą Pagela. Przedstawiają one zależności pomiędzy przyrostem lub ubytkiem zawartości fosforu ruchomego w stałej fazie gleby a zmianą stężenia fosforu w roztworze glebowym. I_a jest stężeniem P w roztworze chloru wapnia, określającym ilość fosforu, którą gleba może desorbować. I_b jest stężeniem P w roztworze, do którego przed ekstrakcją dodano fosfor, określa ilość fosforu, którą gleba może zasorbować.

Dane uzyskane w wyniku ekstrakcji gleby roztworem 0,1 mol·dm⁻³ CaCl₂ wskazują, że warstwy 0–20 cm i 20–40 cm gleby nawożonej wyłącznie mineralnie charakteryzowały się około dwukrotnie mniejszą desorpcją fosforu do roztworu w porównaniu z glebami nawożonymi obornikiem (tab. 49–52).

Stężenie desorbowanego P (I_a) z warstw gleby położonych poniżej 40 cm było bardzo niskie, podobnie jak stężenie fosforu aktywnego. Świadczy to o bardzo małych możliwościach występujących w glebie związków P do przechodzenia do roztworu glebowego czy przemieszczania się w głębszych warstwach profilu gleby.

Ilości fosforu, które pozostały w roztworze (po równoważeniu gleby z roztworem CaCl₂ z dodatkiem P), wahały się w doświadczeniu średnio od 2,99 do 4,36 mg P·dm⁻³ w warstwie 0–20 cm, natomiast w warstwie 20–40 cm były podobne i mieściły się w przedziale 2,79 do 4,0 mg P·dm⁻³. Świadczy to o bardzo zbliżonych możliwościach sorpcyjnych względem fosforu obu warstw gleby ornej i podornej.

W warstwach gleby położonych poniżej 40 cm głębokości fosfor był silnie sorbowany. Wskazują na to bardzo niskie wartości parametru I_b . W roztworze po ekstrakcji gleb z dodatkiem 5 mg P·dm⁻³ pozostawało średnio zaledwie 0,93 mg P·dm⁻³ (warstwa 40–60 cm)

i $0,18 \text{ mg P}\cdot\text{dm}^{-3}$ (warstwa 60–80 cm). Świadczy to o bardzo skutecznym wiązaniu dostarczonego fosforu przez głębsze warstwy gleby płowej. Podobne wyniki uzyskiwano wcześniej w badaniach na tej samej glebie [Rabikowska i Piszcz 2002].

W warunkach doświadczenia nie stwierdzono istotnego wpływu nawożenia azotem mineralnym na wielkość I_b , w warstwie ornej, natomiast w warstwie położonej niżej – 20–40 cm okazało się ono istotne. W obu wierzchnich warstwach istotny okazał się wpływ stosowania nawożenia organicznego na możliwości sorbowania fosforu przez glebę. Silne wiązanie fosforu w glebie obiektu (a N_3) – bez obornika nawożonym wysokimi dawkami azotu – najprawdopodobniej mogło być związane ze wzrostem zakwaszenia gleby, a co się z tym wiąże, z silniejszą sorpcją fosforu.

Na obiektach, gdzie stosowany był obornik, gleby wykazywały również wyższe stężenie fosforu po ekstrakcji z $5 \text{ mg P}\cdot\text{dm}^{-3}$. Mogło to być spowodowane wnoszeniem na tych obiektach znacznych ilości P z obornikiem. W warstwach położonych niżej parametr I_b nie różnił się między tymi obiektami.

W doświadczeniu nie stwierdzono zależności wartości parametru n opisującego intensywność wiązania fosforu przez gleby od stosowania nawożenia organicznego. Różnice między obiektami pierwszego czynnika badań okazały się nieistotne statystycznie, we wszystkich czterech warstwach, pomimo że wartości na obiektach nawożonych obornikiem były niższe. Zwraca uwagę bardzo duży wzrost wartości parametru n wraz ze wzrostem głębokości w glebie. Warstwy orna i podorna ($n = 15,4$) wiązały średnio fosfor czterokrotnie słabiej niż warstwa 40–60 cm ($n = 60,6$) i prawie 10-krotnie słabiej niż warstwa 60–80 cm ($n = 152$).

W tabelach 49–52 zamieszczono również obliczone z równania Pagela wartości parametru b , charakteryzującego ilość fosforu, jaka teoretycznie może ulec desorpcji z gleby. Nawożenie obornikiem istotnie zwiększało możliwości gleb do uwalniania tego pierwiastka z warstwy ornej i podornej gleby 40–60 cm. Poniżej tej głębokości różnice okazały się nieistotne. We wszystkich warstwach, na obiektach które były nawożone wyłącznie mineralnie, mniejsze ilości fosforu ulegały desorpcji niż na obiektach, gdzie stosowano obornik.

Stężenie fosforu, przy którym procesy desorpcji zachodzą z taką samą intensywnością jak procesy sorpcji, określane jest jako stężenie równowagowe. Wartości stężenia równowagi ($I_{\text{równ.}}$) powyżej $0,6 \text{ mg P}\cdot\text{dm}^{-3}$ wskazują na wystarczające zaopatrzenie roślin w ten pierwiastek. W doświadczalnej warstwie gleby ornej i podornej stężenia równowagowe fosforu były bardzo zbliżone i na obiektach nawożonych obornikiem były istotnie, ponad dwukrotnie wyższe niż na obiektach, gdzie od lat nie używano nawozów organicznych. Tylko na obiektach nawożonych wyłącznie mineralnie, na których stosowano duże dawki azotu (a N_2 i a N_3), stwierdzono niskie $I_{\text{równ.}}$ oscylujące poniżej wartości optymalnej dla żywienia roślin. W warstwach gleby położonych poniżej 40 cm uzyskane stężenia równowagi fosforu były bardzo niskie. Nawet na obiektach nawożonych organicznie w warstwie 40–60 cm nie przekroczyły wartości $0,1 \text{ mg P}\cdot\text{dm}^{-3}$, natomiast w warstwie 60–80 cm $0,02 \text{ mg P}\cdot\text{dm}^{-3}$. Świadczy to o małej zdolności głębszych warstw gleby do zaspokajania potrzeb pokarmowych roślin względem fosforu.

Tabela 49
Table 49

Parametry sorpcji według Pagela, warstwa 0–20 cm
Sorption parameters by Pagel, layer 0–20 cm

Obiekty doświadczenia Experiment sites		Stężenie Concentration		n	b	I równ. I equilibrium
		I _a	I _b			
		[mg P·dm ⁻³]		[mg P·dm ⁻³ kg ⁻²]	[mg P·kg ⁻¹]	[mg P·dm ⁻³]
Bez obornika Without FYM	N ₀	0,34	3,30	16,40	12,8	0,62
	N ₁	0,37	3,52	14,54	12,4	0,75
	N ₂	0,31	3,25	16,60	12,4	0,57
	N ₃	0,29	2,99	19,46	13,2	0,49
Średnio – Average		0,32^B	3,27^B	16,75	12,7^B	0,60^B
Obornik FYM	N ₀	0,68	3,75	17,36	21,2	1,48
	N ₁	0,71	3,86	16,52	21,0	1,62
	N ₂	0,68	4,06	14,01	18,4	1,86
	N ₃	0,57	4,36	9,07	12,5	1,94
Średnio – Average		0,66^a	4,0 a	14,24	18,3^a	1,72^a
Średnio Average	N ₀	0,50 ^{a,b}	3,52	16,9 ^a	17,0 ^a	1,05
	N ₁	0,54 ^a	3,70	15,5 ^{a,b}	16,7 ^a	1,19
	N ₂	0,50 ^{a,b}	3,65	15,3 ^{a,b}	15,4 ^a	1,21
	N ₃	0,43 ^b	3,70	14,3 ^b	12,8 ^b	1,21
Średnio w doświadczeniu Average for the experiment		0,49	3,6	15,5	15,5	1,17
NIR _{0,05}	I cz.	0,05	0,34	r.n.	1,32	0,23
	II cz.	0,07	r.n.	1,80	1,99	r.n.
	I-II	r.n.	0,40	3,90	2,76	0,38

Uzyskane wyniki potwierdzają, że straty fosforu z gleb uprawnych, przyczyniające się do eutrofizacji wód, mają miejsce głównie na drodze zmywu powierzchniowego, gdyż ilość fosforanów wmywanych w głąb nie jest duża [Smith i in. 2001b, Djodjic i in. 2004]. W przypadku stosowania dużych dawek nawozów naturalnych straty te mogą oprócz fosforu dotyczyć także azotu [Smith i in. 2001a].

Tabela 50
Table 50

Parametry sorpcji według Pagela, warstwa 20–40 cm
Sorption parameters by Pagel, layer 20–40 cm

Obiekty doświadczenia Experiment sites		Stężenie Concentration		n	b	I równ. I equilibrium
		I _a	I _b			
		[mg P·dm ⁻³]		[mg P·dm ⁻³ ·kg ⁻²]	[mg P·kg ⁻¹]	[mg P·dm ⁻³]
Bez obornika Without FYM	N ₀	0,30	3,79	10,9	8,7	0,80
	N ₁	0,29	3,72	11,7	8,6	0,81
	N ₂	0,26	3,04	18,0	11,4	0,45
	N ₃	0,22	2,79	20,7	11,3	0,37
Średnio Average		0,27^B	3,34	15,3	10,0^B	0,61^A
Obornik FYM	N ₀	0,65	3,74	16,9	20,1	1,43
	N ₁	0,65	3,96	14,2	17,7	1,63
	N ₂	0,65	4,00	13,8	17,7	1,65
	N ₃	0,59	3,80	15,1	17,4	1,34
Średnio Average		0,63^A	3,87	15,0	18,2^A	1,51^B
Średnio Average	N ₀	0,48	3,76 ^{ab}	13,9 ^b	14,4	1,12
	N ₁	0,47	3,84 ^a	12,9 ^c	13,2	1,22
	N ₂	0,45	3,52 ^b	15,9 ^a	14,5	1,05
	N ₃	0,40	3,29 ^c	17,9 ^a	14,4	0,85
Średnio w doświadczeniu Average for the experiment		0,45	3,61	15,2	14,1	1,06
NIR _{0,05}	I cz.	0,15	r.n.	r.n.	1,33	0,53
	II cz.	r.n.	0,29	2,28	r.n.	r.n.
	I-II	r.n.	0,77	6,21	1,99	r.n.

Tabela 51
Table 51

Parametry sorpcji według Pagela, warstwa 40–60 cm
Sorption parameters by Pagel, layer 40–60 cm

Obiekty doświadczenia Experiment sites		Stężenie Concentration		n	b	I równ. I equilibrium
		I _a	I _b			
		[mg P·dm ⁻³]		[mg P·dm ⁻³ ·kg ⁻²]	[mg P·kg ⁻¹]	[mg P·dm ⁻³]
Bez obornika Without FYM	N ₀	0,02	0,62	76,8	11,0	0,02
	N ₁	0,02	0,75	64,0	9,4	0,02
	N ₂	0,02	0,80	62,8	8,5	0,02
	N ₃	0,02	0,82	59,3	9,1	0,02
Średnio Average		0,02	0,75	65,7	9,5^B	0,02

Tabela 51 cd.
Table 51 cont.

Obornik FYM	N ₀	0,09	1,28	53,40	15,4	0,10
	N ₁	0,07	1,10	54,30	11,1	0,09
	N ₂	0,04	1,03	54,60	9,2	0,05
	N ₃	0,06	1,07	58,54	11,2	0,07
Średnio Average		0,06	1,12	55,21	11,7^A	0,08
Średnio Average	N ₀	0,05	0,95	65,10	13,2 ^a	0,06
	N ₁	0,04	0,93	59,15	10,3 ^b	0,05
	N ₂	0,03	0,92	58,70	8,8 ^b	0,03
	N ₃	0,04	0,94	58,92	10,2 ^b	0,05
Średnio w doświadczeniu Average for the experiment		0,04	0,93	60,46	10,6	0,05
NIR _{0,05}	I cz.	r.n.	r.n.	r.n.	2,18	r.n.
	II cz.	r.n.	r.n.	r.n.	2,38	r.n.
	I-II	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.

Tabela 52
Table 52

Parametry sorpcji według Pagela, warstwa 60–80 cm
Sorption parameters by Pagel, layer 60–80 cm

Obiekty doświadczenia Experiment sites		Stężenie Concentration		n	b	I równ. I equilibrium
		I _a	I _b			
		[mg P·dm ⁻³]		[mg P·dm ⁻³ ·kg ⁻²]	[mg P·kg ⁻¹]	[mg P·dm ⁻³]
Bez obornika Without FYM	N ₀	0,02	0,20	179,8	23,4	0,02
	N ₁	0,01	0,14	161,0	11,9	0,01
	N ₂	0,00	0,14	148,5	7,4	0,00
	N ₃	0,00	0,18	135,0	8,5	0,00
Średnio Average		0,01	0,16	156,1	12,8	0,01
Obornik FYM	N ₀	0,01	0,23	122,0	9,9	0,01
	N ₁	0,01	0,20	130,7	8,7	0,01
	N ₂	0,01	0,17	143,6	11,0	0,01
	N ₃	0,02	0,18	193,4	30,8	0,02
Średnio Average		0,01	0,20	147,4	15,1	0,01
Średnio Average	N ₀	0,01	0,20	150,9	16,6	0,01
	N ₁	0,01	0,17	145,8	10,3	0,01
	N ₂	0,01	0,15	146,0	9,2	0,00
	N ₃	0,01	0,18	164,2	19,7	0,01

Tabela 52 cd.
Table 52 cont.

Średnio w doświadczeniu Average for the experiment		0,01	0,18	151,7	13,9	0,01
NIR _{0,05}	I cz.	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.
	II cz.	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.
	I-II	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.

4.2.2. Roślina pola doświadczalnego

Plonowanie pszenicy ozimej

Znaczne ilości składników pokarmowych wprowadzanych do gleby, z przypadającą na zmianowanie dawką obornika, w dużym stopniu modyfikują gromadzenie biomasy i jej skład chemiczny, a tym samym pobranie składników z plonami. Oddziaływanie na plony roślin oraz ich skład chemiczny zwykle zmniejsza się w kolejnych latach po zastosowaniu tego nawozu. Jest to związane nie tylko z efektem współdziałania między składnikami pokarmowymi, ale również oddziaływaniem wielu czynników środowiskowych takich jak intensywność transpiracji, zagęszczenie gleby, jej odczyn, temperatura czy wilgotność [Faber 1988].

W warunkach prowadzonego doświadczenia plony ziarna pszenicy wahały się od 2,04 do 5,97 t·ha⁻¹ i były modyfikowane zarówno wieloletnim nawożeniem obornikiem, jak również dawkami azotu (tab. 53).

Średnie plony ziarna na podbloku z corocznie stosowanymi niewielkimi dawkami obornika (obiekt b) okazały się istotnie większe niż plony przy nawożeniu tradycyjnym (obiekt d) i stosowaniu obornika co 2 lata (obiekt c). Każdorazowy przyrost dawek nawozów azotowych pociągał za sobą udowodnioną statystycznie wyżkę plonów, a różnice między średnimi plonami uzyskanymi na obiekcie kontrolnym i nawożeniu N₃ sięgały 75%. Na uwagę zasługuje udowodniona statystycznie interakcja między nawożeniem obornikiem i azotem. Przy braku nawożenia azotem największy plon ziarna uzyskano na obiekcie, na którym 15 t obornika wnoszono bezpośrednio pod pszenicę (obiekt b). Podwojona dawka obornika zastosowana rok wcześniej (obiekt c) powodowała mniejszy przyrost plonu ziarna. Zdecydowanie najmniejszy wpływ na plony pszenicy miał obornik używany pod pierwszą roślinę rotacji – kukurydzę, w dawce równej 60 t·ha⁻¹. Sposób wykorzystywania obornika w rotacji miał wpływ na plony ziarna również na najniższym poziomie azotu (N₁), a częściowo również na poziomie N₂, nie różnicował natomiast plonu ziarna pszenicy w warunkach stosowania najwyższego nawożenia azotem – N₃ (tab. 53).

Długoletnie, zróżnicowane nawożenie obornikiem i azotem bardzo wyraźnie modyfikowało wielkość plonów słomy, które w doświadczeniu wahały się od 2,02 t·ha⁻¹ (obiekt a–N₀) do 6,76 t·ha⁻¹ (b–N₃). Największy plon słomy zebrano z pszenicy uprawianej na podbloku corocznie nawożonym obornikiem. Każdorazowy wzrost poziomu nawożenia azotem wiązał się z istotnym wzrostem plonów słomy – średnio od 2,96 t (N₀) do 6,15 t·ha⁻¹ (N₃) (tab. 53).

W warunkach wieloletniego gospodarowania bez obornika i bez azotu pszenica ozima wytworzyła jedynie 3,55 t s.m.·ha⁻¹. Coroczne stosowanie obornika w ilości odpowiadającej ¼ dawki przewidzianej na rotację umożliwiło pszenicy ozimej wytworzenie 7,12 t s.m., a więc dwukrotnie więcej niż na obiekcie a-N₀. Oddziaływanie najniższego nawożenia azotem mineralnym (bez obornika) w warunkach prowadzonego doświadczenia miało słabszy efekt plonotwórczy niż wpływ corocznej dawki obornika w wysokości 15 t·ha⁻¹.

Wyniki badań wskazują, że nawożenie w rotacji obornikiem co dwa (c) lub co cztery lata, lecz w dawce dwukrotnie większej (d), wywołuje u pszenicy uprawianej w czwartym roku rotacji zbliżony efekt plonotwórczy. Obornik stosowany corocznie, w odpowiednio mniejszej dawce, działał na produkcję suchej masy przez pszenicę najlepiej, zwłaszcza wówczas gdy był on wyłącznym źródłem azotu (na N₀) lub głównym źródłem tego składnika (na N₁) dla rośliny (tab. 53).

Tabela 53

Table 53

Plon pszenicy ozimej [t·ha⁻¹]
Winter wheat crop

Nawożenie obornikiem FYM treatment	Nawożenie azotem Nitrogen fertilization				X _{sr}
	N ₀	N ₁	N ₂	N ₃	
Ziarno Grain					
a	2,04	3,73	4,73	5,18	3,92 ^C
b	4,37	5,28	5,92	5,97	5,39 ^A
c	3,55	4,35	5,56	5,88	4,84 ^B
d	3,03	4,70	5,43	5,63	4,70 ^B
X _{sr}	3,24 ^d	4,52 ^c	5,41 ^b	5,67 ^a	4,71
NIR _{0,05} I – 0,225 II – 0,246 I / II – 0,492 II / I – 0,482					
Słoma Straw					
a	2,02	3,64	5,11	5,84	4,15 ^C
b	3,78	5,29	6,31	6,76	5,54 ^A
c	3,00	4,27	5,64	6,03	4,74 ^B
d	3,05	4,38	5,64	5,97	4,76 ^B
X _{sr}	2,96 ^d	4,40 ^c	5,68 ^b	6,15 ^a	4,80
NIR _{0,05} I – 0,213 II – 0,182 I / II – 0,364 II / I – 0,380					
Ziarno + słoma (sucha masa) Grain + straw (dry matter)					
a	3,55	6,45	8,62	9,66	7,07 ^C
b	7,12	9,25	10,72	11,16	9,56 ^A
c	5,72	7,55	9,80	10,43	8,37 ^B
d	5,32	7,94	9,69	10,16	8,28 ^B
X _{sr}	5,42 ^d	7,80 ^c	9,71 ^b	10,35 ^a	8,32
NIR _{0,05} I – 0,259 II – 0,338 I / II – 0,676 II / I – 0,640					

Tabela 54
Table 54

Plon pszenicy w jednostkach zbożowych [j.z.·ha⁻¹]
Wheat crop in cereal units [c.j. ha⁻¹]

Nawożenie obornikiem FYM treatment	Nawożenie azotem Nitrogen fertilization				X _{śr}
	N ₀	N ₁	N ₂	N ₃	
Ziarno + słoma Grain + straw					
a	22,4	40,9	52,4	57,6	43,4 ^C
b	47,5	58,1	65,5	66,5	59,4 ^A
c	38,5	47,8	62,0	64,8	53,1 ^B
d	33,4	51,4	59,9	62,3	51,7 ^B
X_{śr}	35,4 ^d	49,6 ^c	59,9 ^b	62,8 ^a	51,9
NIR _{0,05} I – 2,24 I – 2,58 I / II – 5,16 II / I – 4,99					

Produkcyjność siedliska nienawożonego obornikiem i azotem była bardzo niska, nie przekroczyła 22,4 jednostek zbożowych z hektara. Prawie dwukrotnie większy plon, na poziomie 40,9 j.z.·ha⁻¹ pszenicy, uzyskano na obiekcie nawożonym najniższą dawką azotu N₁, a kolejny wzrost dawek azotu wywołał wzrost plonów odpowiednio do 52,4 i 57,6 j.z.·ha⁻¹. Średnio efektem wzrastających dawek azotu były plony większe od kontroli (N₀) o 40% (na N₁), 69% (na N₂) i 77% (na N₃).

W długoletnim gospodarowaniu bezobornikowym działanie azotu na plony przeliczeniowe pszenicy ozimej (jednak przy niższym ich poziomie) było znacznie silniejsze niż przy stosowaniu obornika. Plon przeliczeniowy na najwyższych dawkach azotu stanowił na obiekcie bez obornika 257% plonu z obiektu N₀. Na obiektach nawożonych obornikiem odpowiednie różnice między produkcją jednostek zbożowych na N₃ i N₀ wynosiły 140% (obiekt b), 168% (obiekt c) i 187% (obiekt d) (tab. 54).

Zawartość azotu i fosforu w ziarnie oraz słomie pszenicy ozimej

Azot, ze względu na jego znaczenie plonotwórcze, jest składnikiem stosowanym często w dużych ilościach, a intensywne nawożenie nim silnie oddziałuje na koncentrację innych składników w roślinie. Długoletnie nawożenie obornikiem i azotem spowodowało duże zróżnicowanie w zawartości azotu ogólnego w pszenicy od 15,7 do 22,4 g N·kg⁻¹, przy średniej zawartości w ziarnie 18 g N·kg⁻¹s.m. (tab. 55). Nie wykazano istotnego współdziałania nawożenia obornikiem i azotem na zawartość N w ziarnie, natomiast oba te czynniki, niezależnie od siebie, w sposób udowodniony wpływały na koncentracje azotu w ziarniakach. Ziarno z obiektów nawożonych obornikiem w roku siewu pszenicy (obiekt b) lub pod jej przedplon (obiekt c) zawierało istotnie więcej N niż ziarno z obiektu bez obornika (obiekt a), a także obiektu na którym obornik stosowano w pierwszym roku rotacji – 3 lata przed siewem pszenicy (obiekt d).

Jak wskazują dane, duży wpływ na koncentrację N w ziarnie miało wzrastające nawożenie tym składnikiem – gdyż ziarno z obiektów N₃ zawierało około 40% więcej azotu niż ziarno pochodzące z obiektu kontrolnego (N₀) i nawożonego azotem w najmniejszej ilości.

Wahania zawartości N w słomie zebranej z poszczególnych obiektów doświadczenia były większe niż zmienność tej cechy w ziarnie, bowiem wahały się od 2,9 do 6,0 g·kg⁻¹ N w s.m. (tab. 55). Przy pomijaniu azotu w nawożeniu mineralnym oraz przy stosowaniu tego składnika w niewielkich ilościach zawartość związków azotu w słomie była zbliżona (2,9–3,5 g·kg⁻¹ s.m.), natomiast w warunkach stosowania dawek N₂ i N₃ ilość azotu w słomie była uwarunkowana również nawożeniem obornikiem.

Oba badane czynniki różnicowały wyraźnie proporcje między koncentracją N w ziarnie i w słomie. W warunkach ograniczonej podaży N, np. na obiekcie bez obornika czy bez azotu mineralnego (N₀), stwierdzono ponad 5 razy więcej azotu w ziarnie niż w słomie. Wraz ze wzrostem dawek azotu stosunek N w ziarnie do N w słomie zawężał się z powodu większego przyrostu zawartości tego składnika w słomie niż w ziarnie.

Tabela 55

Table 55

Zawartość N w plonach pszenicy [g N·kg⁻¹ s.m.]
Nitrogen content in wheat crop

Nawożenie obornikiem FYM treatment	Nawożenie azotem Nitrogen fertilization				X _{sr}			
	N ₀	N ₁	N ₂	N ₃				
Ziarno Grain								
a	15,7	14,7	17,4	22,0	17,4 ^B			
b	15,9	16,5	19,8	22,3	18,6 ^A			
c	15,6	16,2	19,0	22,4	18,3 ^A			
d	15,3	15,5	18,0	21,3	17,5 ^B			
X _{sr}	15,6 ^c	15,8 ^c	18,5 ^b	22,0 ^a	18,0			
NIR _{0,05} I – 0,38 II – 0,55 I / II – r.n. II / I – r.n.								
Słoma Straw								
a	3,1	2,9	3,5	3,9	3,3 ^C			
b	2,9	3,5	5,0	6,0	4,3 ^A			
c	3,2	3,3	4,5	5,5	4,1 ^{A,B}			
d	3,0	3,2	3,8	5,6	3,9 ^B			
X _{sr}	3,0 ^c	3,2 ^c	4,2 ^b	5,2 ^a	3,9			
NIR _{0,05} I – 0,36 II – 0,43 I / II – 0,85 II / I – 0,82								
N w ziarnie: N w słomie – wartości średnie N in grain: N in straw – average values								
a	b	c	d	N ₀	N ₁	N ₂	N ₃	X _{og.}
5,3	4,3	4,5	4,6	5,2	4,9	4,4	4,2	4,6

Zwiększenie dawki azotu zacieśniało stosunek N zawartego w ziarnie do N zawartego w słomie. Wskazuje to na mniej efektywne wykorzystanie tego składnika w wytwarzaniu materiałów zapasowych ziarna.

W warunkach stosowania dużych dawek azotu pobierane przez rośliny zbożowe ilości N są większe niż możliwości do akumulacji N w ziarniakach i składnik ten pozostaje w organach wegetatywnych. W roślinach niedostatecznie zaopatrzonych w ten składnik akumulacja azotu w ziarnie przebiega kosztem zwiększonej jego reutilizacji z organów wegetatywnych.

W warunkach prowadzenia doświadczenia koncentracja fosforu w plonach pszenicy była istotnie uwarunkowana nawożeniem obornikiem i azotem, jednak oddziaływanie tych czynników na zawartość P tak w ziarnie, jak i w słomie nie było ze sobą powiązane (tab. 56). Plony główne i uboczne pszenicy nawożonej obornikiem zawierały istotnie więcej fosforu niż uzyskiwane w warunkach gospodarki bezobornikowej. Z badań Koterka i Krawczyk [1977] oraz Wolskiej i Wojcieszkiej [1986] wynika, że reakcja roślin na zwiększanie dawki azotu, przejawiająca się wzrostem zawartości składników mineralnych (K i P) w suchej masie, ma miejsce tylko w przypadku dużej zasobności środowiska w te składniki. W warunkach niskiej zasobności gleby zwiększone dawki azotu powodujące znaczne przyrosty plonów mogą przyczynić się do obniżenia koncentracji tych składników w roślinach.

W warunkach prowadzonych badań ziarno i słoma roślin nienawożonych azotem zawierały istotnie więcej fosforu niż po zastosowaniu tego składnika. Większe zawartości fosforu w plonach uzyskanych w warunkach kontroli (bez N) wynikały z wyjątkowo niskiej masy roślin w wieloleciu nienawożonych azotem (tab. 53).

Tabela 56

Table 56

Zawartość P w plonach pszenicy [g P·kg⁻¹ s.m.]
P content in wheat crop

Nawożenie obornikiem FYM treatment	Nawożenie azotem Nitrogen fertilization				X _{sr}
	N ₀	N ₁	N ₂	N ₃	
Ziarno Grain					
a	3,8	3,5	3,3	3,0	3,4 ^D
b	3,9	3,8	3,7	3,7	3,8 ^A
c	3,9	3,7	3,5	3,6	3,7 ^B
d	3,8	3,5	3,5	3,5	3,6 ^C
X _{sr}	3,8 ^a	3,6 ^b	3,5 ^b	3,5 ^b	3,6
NIR _{0,05} I – 0,09 II – 0,11 I / II – r.n. II / I – r.n.					
Słoma Straw					
a	0,87	0,55	0,42	0,36	0,55 ^C
b	0,77	0,74	0,84	0,76	0,82 ^A
c	1,01	0,69	0,69	0,66	0,76 ^B
d	1,12	0,79	0,74	0,68	0,83 ^A
X _{sr}	0,99 ^a	0,69 ^b	0,67 ^b	0,62 ^b	0,74
NIR _{0,05} I – 0,32 II – 0,71 I / II – r.n. II / I – r.n.					

Tabela 56 cd.
Table 56 cont.

P w ziarnie: P w słomie – wartości średnie P in grain: P in straw – average values								
a	b	c	d	N ₀	N ₁	N ₂	N ₃	X _{og.}
6,2	4,6	4,9	4,3	3,8	5,2	5,2	5,6	4,9

Stosunek zawartości fosforu w ziarnie do zawartości P w słomie rozszerzał się wraz ze wzrostem dawek azotu. Przyczyną tego było wyraźne obniżanie zawartości fosforu w słomie, przy prawie stałym poziomie tego składnika w ziarnie. Największe różnice między koncentracją fosforu w ziarnie i w słomie stwierdzono na obiekcie nienawożonym obornikiem (obiekt a).

W warunkach stosowania fosforu wyłącznie w postaci superfosfatu słoma zawierała mniej tego składnika. Znacznie mniejszy był też wpływ pomijania obornika w nawożeniu na zawartość fosforu w ziarnie niż w słomie. Świadczy to jednoznacznie o większej podatności słomy niż ziarna na modyfikację w nim zawartości fosforu czynnikami środowiskowymi. Podobne zjawisko, większe zmiany w słomie niż w ziarnie, obserwowano dla omówionego wcześniej azotu. Z badań Wolskiej i Wojcieszkiej [1986] wynika, że pod wpływem zwiększania dawki azotu wzrastają zawartość i pobranie nie tylko azotu ale i fosforu, przy czym wzrost ten dotyczył bardziej części wegetatywnych niż ziarna. Wcześniej również Chojnacki i Boguszewski [1971] stwierdzili, że stosowanie nawozów w znacznie większym stopniu zmienia skład chemiczny słomy niż ziarna.

Pobranie azotu i fosforu przez pszenicę ozimą

W warunkach doświadczenia różnica między nagromadzeniem N w ziarnie pszenicy pomiędzy skrajnymi obiektami była bardzo duża i wynosiła około 86 kg·ha⁻¹. Pobranie azotu wraz z ziarnem na obiekcie b–N₃ stanowiło około 400% pobrania N przez plon ziarna pszenicy na a–N₀ (tab. 57). Nawożenie obornikiem pozwalało pszenicy na większe nagromadzenie azotu od 11,5 do 26,4 kg N·ha⁻¹ więcej niż w ziarnie pszenicy uprawianej na podbloku bez obornika.

Każdorazowy wzrost poziomu nawożenia azotem wiązał się z istotnym wzrostem pobrania N wraz z ziarnem – średnio od około 17 do 25 kg N·ha⁻¹. Zróżnicowane nawożenie obornikiem silniej modyfikowało pobranie azotu wraz ze słomą niż z ziarnem, a przeciętne pobranie N wraz ze słomą, przy corocznym nawożeniu obornikiem, wyniosło prawie 180% ilości azotu pobranego przez pszenicę uprawianą na podbloku bez obornika.

Zwiększanie dawek azotu mineralnego również silniej wpływało na pobranie N wraz ze słomą niż z ziarnem, bowiem z obiektu N₃ odprowadzono wraz ze słomą 3,6 razy więcej N niż z obiektu N₀ (tab. 57). Należy podkreślić, że zarówno dla ziarna, jak i dla słomy działanie nawożenia obornikiem i azotem było niezależne od siebie.

Całkowite pobranie azotu przez pszenicę wahało się od 32,7 do 149,8 kg·ha⁻¹. Na wszystkich poziomach nawożenia tym składnikiem nagromadzały go najwięcej rośliny uprawiane na obiektach corocznie nawożonych małą dawką obornika (b), natomiast najmniej na obiekcie przez wiele lat pozbawionym nawożenia organicznego (a).

Z ziarnem odprowadzane było od 76 do 86% łącznej ilości azotu pobranego przez rośliny. Udział pobrania azotu z ziarnem w całkowitym pobraniu tego składnika z plonami nie

był modyfikowany nawożeniem obornikiem, natomiast wyraźnie malał wraz ze wzrostem dawek azotu. Oznacza to, że w miarę wzrostu podaży azotu rośliny w większym stopniu gromadziły ten składnik w plonie ubocznym.

W zależności od wieloletniego nawożenia obornikiem i azotem w ziarnie pszenicy ozimej nagromadzone zostało od 6,6 do 18,9 kg P·ha⁻¹, natomiast w słomie zaledwie od 1,6 do 4,6 kg P·ha⁻¹ (tab. 58). Przeciętna proporcja między pobraniem P wraz z ziarnem i słomą wynosiła 4,6:1. Na podbloku nienawożonym obornikiem średnie pobranie fosforu wraz z ziarnem było niższe od ilości P nagromadzonego w ziarnie obiektów nawożonych obornikiem, stanowiąc od 64 do 77%.

Tabela 57
Table 57

Pobranie N przez pszenicę ozimą [kg N·ha⁻¹]
Nitrogen uptake by winter wheat

Nawożenie obornikiem FYM treatment	Nawożenie azotem Nitrogen fertilization				X _{sr}
	N ₀	N ₁	N ₂	N ₃	
Ziarno Grain					
a	27,2	46,6	70,0	97,0	60,2 ^D
b	59,1	74,3	99,7	113,3	86,6 ^A
c	47,2	60,1	89,8	111,8	77,2 ^B
d	39,5	62,3	83,2	102,0	71,7 ^C
X _{sr}	43,2 ^d	60,8 ^c	85,6 ^b	106,0 ^a	73,9
NIR _{0,05} I – 3,93 II – 4,74 I / II – r.n. II / I – r.n.					
Słoma Straw					
a	5,5	9,6	15,9	20,6	12,9 ^C
b	9,9	16,6	28,4	36,4	22,8 ^A
c	8,7	12,6	22,8	30,0	18,5 ^B
d	8,2	12,5	19,3	30,0	17,5 ^B
X _{sr}	8,1 ^d	12,8 ^c	21,6 ^b	29,2 ^a	17,9
NIR _{0,05} I – 2,22 II – 2,59 I / II – r.n. II / I – r.n.					
Ziarno + słoma Grain + straw					
a	32,7	56,3	85,8	117,6	73,1 ^D
b	69,0	90,9	128,1	149,8	109,4 ^A
c	55,8	72,7	112,6	141,8	95,7 ^B
d	47,6	74,9	102,5	132,0	89,2 ^C
X _{sr}	51,3 ^d	73,7 ^c	107,2 ^b	135,3 ^a	91,8
NIR _{0,05} I – 3,74 II – 6,00 I / II – r.n. II / I – r.n.					
Współczynniki zbioru azotu Coefficients of nitrogen harvest					
a	0,83	0,83	0,82	0,82	0,82

Tabela 57 cd.
Table 57 cont.

b	0,86	0,82	0,78	0,76	0,79
c	0,85	0,83	0,80	0,79	0,81
d	0,83	0,83	0,81	0,77	0,80
X_{sr}	0,84	0,82	0,80	0,78	0,80

Nawożenie organiczne silniej modyfikowało pobranie P wraz ze słomą pszenicy. Rośliny uprawiane na podbloku bez obornika (obiekt a) pobierały od 44 do 58% tej wartości. Z plonem ziarna pszenicy nawożonej największą dawką azotu (N₃) odprowadzono średnio o prawie 60%, a w przypadku słomy o około 30% więcej fosforu niż z obiektu kontrolnego (N₀).

Całkowite pobranie fosforu z plonami wahało się od 8,2 do 23,5 kg P·ha⁻¹ (tab. 58). Przeciętnie w warunkach badań 82% pobranego fosforu nagromadzała pszenica w ziarnie. Zastosowanie do nawożenia pszenicy najwyższych dawek azotu w warunkach uprawy bezobornikowej powodowało znaczne podwyższenie wartości współczynnika zbioru fosforu, gdyż w plonie słomy odnajdywano tylko 13% całkowitej ilości fosforu odprowadzanego z plonami. Należy podkreślić, że współczynniki zbioru dla fosforu charakteryzowały się niewielkim zróżnicowaniem, co pozwala wnioskować, że pierwiastek ten wraz ze wzrostem podaży azotu czy podaży składników z obornika wzbogaca równomiernie ziarno i słomę (tab. 58).

Intensywne nawożenie azotem przyczyniało się nie tylko do wzrostu poziomu plonów roślin, ale również do wzrostu ilości składników pokarmowych odprowadzanych z pola. W warunkach ograniczonego dostarczenia innych składników niż azot można oczekiwać pogarszania zasobności gleby, szczególnie gdy jednostronne nawożenie azotowe stosowane jest przez wiele lat.

Tabela 58
Table 58

Pobranie fosforu przez pszenicę ozimą [kg P·ha⁻¹]
Phosphorus uptake by winter wheat

Nawożenie obornikiem FYM treatment	Nawożenie azotem Nitrogen fertilization				X _{sr}
	N ₀	N ₁	N ₂	N ₃	
Ziarno – Grain					
a	6,6	11,1	13,2	13,2	11,0 ^D
b	14,3	17,0	18,6	18,9	17,2 ^A
c	11,9	13,7	16,8	17,9	15,1 ^B
d	9,7	14,1	16,1	16,8	14,2 ^C
X_{sr}	10,6 ^c	14,0 ^b	16,1 ^a	16,7 ^a	14,4
NIR _{0,05} I – 0,67 II – 0,88 I / II – r.n. II / I – r.n.					
Słoma – Straw					
a	1,6	1,8	1,9	1,9	1,8 ^D
b	3,3	3,5	4,8	4,6	4,1 ^A

Tabela 58 cd.
Table 58 cont.

c	2,7	2,7	3,5	3,6	3,1 ^C
d	3,1	3,1	3,7	3,7	3,4 ^C
X _{sr}	2,7 ^b	2,8 ^b	3,5 ^a	3,5 ^a	3,1
NIR _{0,05} I – 0,27 II – 0,39 I / II – r.n. II / I – r.n.					
Ziarno + słoła Grain + straw					
a	8,2	12,9	15,1	15,1	12,8 ^C
b	17,6	20,5	23,3	23,5	21,2 ^A
c	14,6	16,4	20,3	21,4	18,2 ^B
d	12,8	17,3	19,8	20,5	17,6 ^B
X _{sr}	13,3 ^c	16,7 ^b	19,6 ^a	20,2 ^a	17,5
NIR _{0,05} I – 0,72 II – 1,04 I / II – r.n. II / I – r.n.					
Współczynniki zbioru fosforu Coefficients of phosphorus harvest					
a	0,80	0,86	0,87	0,87	0,86
b	0,81	0,83	0,80	0,80	0,81
c	0,82	0,84	0,83	0,84	0,83
d	0,76	0,82	0,81	0,82	0,81
X _{sr}	0,80	0,84	0,82	0,83	0,82

4.3. Doświadczenie mikropoletkowe

Właściwości fizyczno-chemiczne

Stosowane w doświadczeniu polowym systemy nawożenia – wyłącznie mineralne oraz organiczno-mineralne znacznie zmodyfikowały właściwości gleby, dlatego w doświadczeniu mikropoletkowym, pomimo zaniechania nawożenia obornikiem, nadal obserwowano efekty jego stosowania. Obiekty, które nie były nawożone obornikiem, wykazywały większe zakwaszenie i mniejszą zasobność w fosfor niż te, na których okresowo stosowano obornik. Intensywne nawożenie azotem mineralnym (N₃) powodowało istotny wzrost zakwaszenia gleb oraz spadek zasobności gleby w rozpuszczalne formy fosforu – oznaczane testem Egnera-Riehma (tab. 59, 60).

Analiza gleb pobranych z mikropoletek po zakończeniu badań wykazała, że po zastosowaniu wapnowania i zebraniu plonów 4 roślin zakwaszenie gleb było mniejsze niż przed rozpoczęciem badań (tab. 59). Wykorzystywanie w płodozmianie jednorazowo niewielkiej dawki nawozu odkwaszającego pozwoliło na utrzymanie na niezmienionym poziomie kwasowości hydrolitycznej na obiektach nawożonych najwyższą dawką azotu mineralnego (N₃), a zmniejszała ją na obiektach, na których azotu nie stosowano. Najmniejsze zakwaszenie, utrzymujące się na stałym poziomie, obserwowano na obiektach nawożonych wyłącznie organicznie.

Stan fosforowy

Zawartość rozpuszczalnych form fosforu przed rozpoczęciem doświadczenia jak i po jego zakończeniu była najniższa na obiektach nawożonych intensywnie azotem (N_3), szczególnie na tych gdzie wcześniej nie stosowano obornika (tab. 60). Najwyższe zawartości fosforu oznaczonego testem Egnera-Riehma uzyskano na obiektach bez azotu mineralnego (N_0), ale nawożonych w doświadczeniu polowym obornikiem. Przeciętnie przed rozpoczęciem badań, w glebach nawożonych obornikiem stwierdzono wyższą o $38,2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ zawartość fosforu niż w glebach obiektów nawożonych wyłącznie mineralnie. Po zakończeniu okresu badań zawartość tego składnika nadal utrzymywała się na wyższym poziomie i była wyższa średnio o $34,6 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. Mimo że w zmianowaniu nie stosowano fosforu zasobność gleby w formy rozpuszczalne tego pierwiastka utrzymała się na tym samym poziomie, a na obiektach których nie nawożono azotem mineralnym, odnotowano nawet wzrost zawartości P oznaczanego testem Egnera-Riehma.

Stężenie fosforu aktywnego (tab. 60) przed rozpoczęciem badań wahało się od $0,33$ do $0,82 \text{ mg P}\cdot\text{dm}^{-3}$, a średnio w doświadczeniu stężenie to wynosiło $0,59 \text{ mg P}\cdot\text{dm}^{-3}$. Pomimo wyczerpywania gleby z labilnych form fosforu przez rośliny uprawiane w doświadczeniu analiza wskazała wyższe stężenie tej formy fosforu w glebach po zakończeniu badań. Średnio wyniosło $0,67 \text{ mg P}\cdot\text{dm}^{-3}$. Może to świadczyć o efektywnym uwalnianiu rezerw tego pierwiastka, nagromadzonych dzięki systematycznemu nawożeniu stosowanemu przez 28 lat w doświadczeniu polowym.

Po zakończeniu doświadczenia stężenie również P aktywnego w glebach było wyższe niż przed jego rozpoczęciem. Najniższe stężenie P ($0,41 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$) stwierdzono na obiektach intensywnie nawożonych azotem w warunkach zakwaszonych gleb, nawożonych w wieloleciu wyłącznie mineralnie.

Tabela 59
Table 59

Stan zakwaszenia gleby Soil acidification level

Nawożenie Fertilization	Nawożenie azotem Nitrogen fertilization			X_{sr}
	N_0	N_1	N_3	
pH (KCl)				
przed rozpoczęciem doświadczenia – before the experiment				
mineralne – mineral	5,4	5,3	4,7	5,0 ^b
organiczno-mineralne organic-mineral	6,3	6,1	5,5	5,8 ^a
X_{sr}	5,8 ^b	5,5 ^b	4,9 ^a	5,2
po zakończeniu doświadczenia – after the experiment				
mineralne – mineral	5,9	5,5	5,0	5,3 ^b
organiczno-mineralne organic-mineral	6,0	5,8	5,5	5,8 ^a
X_{sr}	6,0 ^c	5,7 ^b	5,2 ^a	5,5

Tabela 59 cd.
Table 59 cont.

Hh mmol(+) \cdot kg ⁻¹ przed rozpoczęciem doświadczenia – before the experiment				
mineralne – mineral	13,4	15,0	19,5	16,0^A
organiczno-mineralne organic-mineral	12,0	13,5	16,8	14,1^B
X_{sr}	12,7^c	14,3^b	18,2^a	15,0
po zakończeniu doświadczenia – after the experiment				
mineralne – mineral	11,4	14,9	19,5	15,3^A
organiczno-mineralne organic-mineral	11,7	14,9	16,8	14,5^B
X_{sr}	11,6^c	14,9^b	18,1^a	14,9

Tabela 60
Table 60

Zmiany stanu fosforowego gleby
Changes in phosphorus status in soil

Nawożenie Fertilization	Nawożenie azotem Nitrogen fertilization			X _{sr}
	N ₀	N ₁	N ₃	
P Egnera-Riehma [mg P\cdotkg⁻¹] przed rozpoczęciem doświadczenia – before the experiment				
mineralne mineral	74,7	64,0	51,3	62,1^B
organiczno- -mineralne organic-mineral	121,8	105,7	81,7	100,3^A
X_{sr}	98,2^a	84,8^b	66,5^c	81,2
po zakończeniu doświadczenia after the experiment				
mineralne mineral	81,3	64,9	54,6	66,9^B
organiczno- -mineralne organic-mineral	120,8	105,7	78,0	101,5^A
X_{sr}	101,0^a	85,3^b	66,3^c	84,2
P aktywny [mg P\cdotdm⁻³] przed rozpoczęciem doświadczenia before the experiment				
mineralne mineral	0,42	0,45	0,33	0,40^B

Tabela 60 cd.
Table 60 cont.

organiczno- -mineralne organic-mineral	0,80	0,82	0,69	0,78^a
X_{sr}	0,61^a	0,63^a	0,51^b	0,59
po zakończeniu doświadczenia after the experiment				
mineralne mineral	0,50	0,48	0,41	0,46^b
organiczno- -mineralne organic-mineral	0,90	0,94	0,77	0,87^a
X_{sr}	0,70^a	0,71^a	0,59^b	0,67

Plonowanie roślin

W doświadczeniu mikroplotkowym najwyższe plony wszystkich roślin uzyskiwano na glebach o korzystniejszych właściwościach fizyczno-chemicznych (pochodzących z podbloku nawożonego obornikiem w doświadczeniu polowym) oraz w warunkach nawożenia ich najwyższą dawką azotu mineralnego (N₃). W trakcie trwania badań najsłabiej plonowały rośliny nienawożone azotem, szczególnie gdy wcześniej nie wprowadzano go z obornikiem (tab. 61). Suma wytworzonej przez rośliny biomasy w badanym okresie wahała się od 782 do 1317 g·m⁻². Stosowanie azotu w doświadczeniu oraz zwiększanie jego dawki umożliwiało roślinom wytworzenie większych ilości suchej masy zarówno na obiektach nawożonych w wieloleciu wyłącznie mineralnie, jak i w warunkach wcześniejszego wnoszenia obornika.

Plony suchej masy poszczególnych roślin uprawianych w zmianowaniu malały w szeregu: owies > bazylia > gorczyca I > gorczyca II i mieściły się w przedziale od 41,93 do 912,8 g·m⁻². Suma biomasy uzyskanej z czterech roślin, na obiektach wcześniej nawożonych dodatkowo obornikiem, wyniosła średnio w doświadczeniu 1225,7 g·m⁻², natomiast w warunkach nawożenia wyłącznie mineralnego była aż o 25% mniejsza. Efekt następczy stosowania obornika (w doświadczeniu polowym) w postaci wyższych plonów roślin obserwowano przez wszystkie lata prowadzenia badań mikroplotkowych.

Na obiektach N₀ rośliny nienawożone azotem a uprawiane na podbloku, wcześniej w wieloleciu nawożonym obornikiem, wytworzyły przeciętnie 40% więcej biomasy, niż gdy uprawiano je na obiektach nawożonych wyłącznie mineralnie. Różnice w systemach nawożenia najsilniej modyfikowały plony nienawożonej azotem gorzycy, bowiem wynosiły 66% po uprawie owsa i 93% – gdy gorzycę uprawiano jako ostatnią roślinę zmianowania. Podobny efekt wcześniejszego nawożenia organicznego dotyczył owsa uprawianego na zielonkę, którego plon na tych obiektach był o 40% wyższy, ale zmniejszał się w miarę stosowania coraz wyższych dawek azotu.

U uprawianych w doświadczeniu bazylii i gorzycy również wraz ze zwiększaniem dawek azotu uzyskiwano coraz mniejsze różnice w plonach pomiędzy uprawą bezobornikową

a nawożeniem organiczno-mineralnym. Wynosiły one przeciętnie w doświadczeniu, dla pojedynczej dawki azotu, około 20%, a dla dawki potrójnej tego składnika 10%. Zwraca uwagę wyraźne obniżenie plonów bazylii nawożonej najwyższą dawką azotu na glebach, które nawożono wyłącznie mineralnie. Wcześniejsze nawożenie obornikiem umożliwiało tej roślinie efektywne wykorzystanie wysokich dawek azotu.

Ilości azotu i fosforu pobrane przez rośliny uprawiane w warunkach badań mikropoletkowych były głównie związane z wytwarzaną przez rośliny biomasą (tab. 61–63). Najmniej N w plonach gromadziły rośliny uprawiane w warunkach pomijania tego składnika w nawożeniu, szczególnie gdy nie wnoszono azotu także wcześniej (w doświadczeniu polowym) w oborniku. Różnica w sumarycznym pobraniu azotu przez rośliny uprawiane na obiektach nawożonych tylko mineralnie a nawożonymi wcześniej organiczno-mineralnie niezależnie od dawek nawożenia azotem wynosiła 6,6 g N·m⁻². Wraz ze wzrostem dawek azotu u wszystkich uprawianych w doświadczeniu roślin obserwowano wzrost nagromadzenia tego składnika.

Tabela 61
Table 61

Sucha masa roślin [g·m⁻²]
Dry mass of crop

Nawożenie Fertilization	Nawożenie azotem Nitrogen fertilization			X _{sr}
	N ₀	N ₁	N ₃	
Owies na zielonkę Green oats				
mineralne – mineral	567,9	821,7	897,9	762,5
organiczno-mineralne organic-mineral	773,9	894,1	912,8	860,2
X_{sr}	670,9	857,9	905,3	811,4
Gorzycza I Mustard I				
mineralne – mineral	67,75	69,25	116,13	84,38
organiczno-mineralne organic-mineral	112,25	118,25	133,63	121,38
X_{sr}	90,00	93,75	124,88	102,88
Bazylia Basil				
mineralne – mineral	104,86	106,12	96,95	102,64
organiczno-mineralne organic-mineral	128,05	144,21	159,37	143,88
X_{sr}	116,46	125,16	128,16	123,26
Gorzycza II Mustard II				
mineralne – mineral	41,93	58,08	80,20	60,07

Tabela 61 cd.
Table 61 cont.

organiczno-mineralne organic-mineral	81,23	108,05	111,33	100,20
X_{sr}	61,58	83,06	95,76	80,13
Suma suchej masy plonów Sum of crop dry mass				
mineralne – mineral	782,5	1055,2	1191,2	1009,6
organiczno-mineralne organic-mineral	1095,4	1264,6	1317,1	1225,7
X_{sr}	938,9	1159,9	1254,1	1117,6

Tabela 62
Table 62

Pobranie azotu przez rośliny [g N·m⁻²]
Nitrogen uptake by crop

Nawożenie Fertilization	Nawożenie azotem Nitrogen fertilization			X_{sr}
	N_0	N_1	N_3	
Owies na zielonkę Green oats				
mineralne – mineral	5,86	9,80	14,40	9,99
organiczno-mineralne organic-mineral	8,60	10,40	15,80	11,55
X_{sr}	7,23	10,1	15,1	10,77
Gorczyca I Mustard I				
mineralne – mineral	1,33	1,81	2,62	1,92
organiczno-mineralne organic-mineral	2,24	2,58	3,26	2,69
X_{sr}	1,79	2,20	2,94	2,31
Bazylia Basil				
mineralne – mineral	4,58	5,88	6,62	5,69
organiczno-mineralne organic-mineral	7,15	8,79	10,55	8,83
X_{sr}	5,87	7,34	8,59	7,26
Gorczyca II Mustard II				
mineralne – mineral	0,97	1,47	2,09	1,51
organiczno-mineralne organic-mineral	2,15	2,75	3,07	2,65
X_{sr}	1,56	2,11	2,58	2,08

Tabela 62 cd.
Table 62 cont.

Suma Sum				
mineralne – mineral	12,74	18,96	25,73	19,11
organiczno-mineralne organic-mineral	20,14	24,52	32,68	25,72
X_{sr}	16,44	21,74	29,21	22,42
różnica difference	7,40	5,56	6,95	6,61

Spośród roślin uprawianych w doświadczeniu mikropoletkowym najmniejsze ilości azotu pobrała gorczyca uprawiana jako ostatnia roślina zmianowania. Nagromadziła ona w swoich częściach nadziemnych przeciętnie o $0,23 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ mniej tego składnika niż uprawiana wcześniej gorczyca po owsie. Różnice w pobieraniu azotu pomiędzy tymi roślinami były większe, gdy uprawiano je na glebie pochodzącej z obiektów, których w wieloletnim nawożeniu połowym nie nawożono obornikiem.

W warunkach nawożenia wyłącznie mineralnego, na obiektach intensywnie nawożonych azotem, pobranie tego składnika było przeciętnie dwukrotnie większe niż z obiektów kontrolnych (N_0). Natomiast na obiektach wcześniej nawożonych obornikiem różnica w pobraniu azotu między obiektami kontrolnymi (N_0) a największą zastosowaną dawką azotu mineralnego (N_3) była mniejsza i wynosiła przeciętnie około 50%.

W doświadczeniu ilości fosforu odprowadzonego z plonami poszczególnych gatunków roślin, podobnie jak w przypadku azotu, były związane przede wszystkim z uzyskaną ilością tej biomasy (tab. 63).

Ilości nagromadzonego fosforu przez owies mieściły się w przedziale od $1,50 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$, na obiektach, gdzie brak azotu uniemożliwił roślinom nagromadzenie biomasy – do $3,20 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$, w warunkach, gdy miały one do dyspozycji azot wnoszony w najwyższych ilościach (N_3) oraz składniki dodatkowo wprowadzane przez wiele lat z obornikiem.

Niezależnie od dawek azotu pobranie fosforu przez owies z obiektów nawożonych wyłącznie mineralnie w porównaniu z nawożeniem mineralno-organicznym było niższe o $0,62 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$. Dużą różnicę stwierdzono pomiędzy pobraniem P przez bazylię uprawianą przy różnych systemach nawożenia, która wyniosła przeciętnie $0,47 \text{ g}\cdot\text{P}\cdot\text{m}^{-2}$. Pobranie fosforu przez uprawiane w obu terminach gorczyce było niewielkie i wynosiło średnio $0,50 \text{ g}\cdot\text{P}\cdot\text{m}^{-2}$ przez gorczycę uprawianą po owsie oraz $0,38 \text{ g}\cdot\text{P}\cdot\text{m}^{-2}$, gdy roślinę tę uprawiano jako ostatnią w zmianowaniu. Obserwowane, sięgające 28%, obniżenie ilości pobranego fosforu przez gorczycę było spowodowane wytworzeniem mniejszej biomasy.

Według wskazań testów chemicznych gleb deficyt fosforu nie był czynnikiem ograniczającym plonowanie tej rośliny, gdyż nie stwierdzono spadku zasobności gleby w formy rozpuszczalne tego składnika oznaczone testem Egnera-Riehma ani nie odnotowano zmniejszenia ruchliwości fosforanów w szybkim teście P aktywnego.

Mogło to być spowodowane uwalnianiem z gleb zasobnych w P tego składnika, gdyż nastąpił efekt tego zabiegu – zwiększenie rozpuszczalności fosforanów glebowych – jest powszechnie znany [Tyler i Olson 2001, Bednarek i Tkaczyk 2001, 2004].

Tabela 63
Table 63

Pobranie fosforu przez rośliny [g P·m⁻²]
Phosphorus uptake by crop

Nawożenie Fertilization	Nawożenie azotem Nitrogen fertilization			X _{sr}
	N ₀	N ₁	N ₃	
Owies na zielonkę – Green oats				
mineralne mineral	1,50	2,20	2,62	2,09
organiczno-mineralne organic-mineral	2,20	2,84	3,20	2,71
X _{sr}	1,85	2,52	2,91	2,40
Gorczyca I – Mustard I				
mineralne mineral	0,33	0,36	0,55	0,41
organiczno-mineralne organic-mineral	0,50	0,56	0,73	0,59
X _{sr}	0,42	0,46	0,64	0,50
Bazylija – Basil				
mineralne mineral	0,73	0,76	0,65	0,71
organiczno-mineralne organic-mineral	1,09	1,20	1,26	1,18
X _{sr}	0,91	0,98	0,96	0,95
Gorczyca II – Mustard II				
mineralne mineral	0,20	0,29	0,41	0,30
organiczno-mineralne organic-mineral	0,38	0,51	0,54	0,48
X _{sr}	0,29	0,40	0,48	0,39
Suma – Sum				
mineralne mineral	2,77	3,60	4,23	3,51
organiczno-mineralne organic-mineral	4,17	5,11	5,73	4,97
X _{sr}	3,47	4,36	4,98	4,24
różnica difference	1,40	1,51	1,50	1,46

4.4. Doświadczenie wazonowe

Konsekwencją gospodarowania z ujemnym bilansem składników pokarmowych jest wyczerpanie zasobów glebowych i degradacja gleb uprawnych. Powoduje to konieczność

wnoszenia składników pokarmowych w zwiększonych dawkach. W doświadczeniach wazonowych oceniano możliwości poprawy stanu fosforowego gleby wyczerpanej z dostępnych dla roślin form fosforu poprzez wnoszenie do niej różnych związków tego składnika, jak również poprzez polepszenie jej właściwości decydujących o rozpuszczalności, a tym samym dostępności glebowych fosforanów.

Plonowanie rośliny doświadczalnej

Gorzycza uprawiana w pierwszym doświadczeniu wazonowym wytworzyła od 11,24 do 24,17 g-wazon⁻¹ zielonej masy (tab. 64). Przeciętnie w dwóch zbiorach wyniosła ona około 16,4 g-wazon⁻¹. Wszystkie substancje wnoszone do gleby (tab. 6, 7) zwiększały ilość wytwarzanej przez gorzycę zielonej i suchej masy (tab. 64 i 65). Jednak istotne efekty uzyskiwano po wprowadzeniu do gleby fosforanów w dawce pojedynczej.

Po podwojeniu dawek istotne zwiększenie plonów wystąpiło po nawożeniu fosforem amonu. Plony suchej masy były przeciętnie o 80% większe po zastosowaniu fosforu w mniejszej dawce i 60% większe, gdy dawkę podwajano, ale był to przede wszystkim korzystny efekt zastosowania fosforanu amonu.

Tabela 64

Table 64

Suma plonów gorzycy, doświadczenie I
Sum of mustard yields, experiment I

Obiekt doświadczenia Test pots	Zielona masa Fresh mass	Sucha masa Dry mass
	[g-wazon ⁻¹ g-pot ⁻¹]	
Gleba kontrolna – Control soil	11,24 ^b	1,49 ^b
2 NK	14,14 ^b	1,68 ^b
CaCO ₃	15,17 ^b	1,99 ^b
CaCO ₃ + 2 NK	15,62 ^b	1,81 ^b
PRP max	16,11 ^b	1,55 ^b
PRP min	12,32 ^b	1,45 ^b
P – N	19,49 ^a	2,72 ^a
P – K	22,66 ^a	2,85 ^a
P – Ca	18,86 ^a	2,55 ^a
2P – N	24,17 ^a	3,32 ^a
2P – K	12,76 ^b	1,82 ^b
2P – Ca	14,09 ^b	2,03 ^b
Średnio w doświadczeniu Average for the experiment	16,427	2,111

Odkwaszanie gleby za pomocą węgla wapnia czy dużą dawką PRP przyniosło efekty plonotwórcze w postaci większych plonów zielonej masy, jednak okazały się one nieistotne statystycznie.

Gorzycza nawożona niskimi dawkami fosforanów najwięcej biomasy wytwarzała, gdy była uprawiana na glebie, na której stosowano fosforan potasu, natomiast po podwojeniu

dawki P największym efektem plonotwórczym skutkowało nawożenie tej rośliny fosforem amonu (tab. 64).

Zastosowany w doświadczeniu PRP, niezależnie od dawki, nie powodował istotnych zmian w ilości suchej masy wytworzonej przez rośliny. Widoczna była jednak tendencja do lepszego plonowania roślin po użyciu wyższej jego dawki.

W drugiej części przeprowadzonego doświadczenia wegetacyjnego testowano wpływ stosowania roztworu Efektywnych Mikroorganizmów na plonowanie oraz możliwości poprawy zaopatrzenia gorczycy w fosfor.

Tabela 65

Table 65

Suma plonów gorczycy, doświadczenie II
Sum of mustard yields, experiment II

Obiekt doświadczenia Test pots	Zielona masa Fresh mass	Sucha masa Dry mass
	[g.wazon ⁻¹ g.pot ⁻¹]	
Gleba kontrolna – Control soil	8,961 ^b	1,288 ^b
gleba + EM soil + EM	6,897 ^b	0,879 ^c
gleba +EM + gorczyca soil + EM + mustard	11,926 ^a	1,534 ^b
gleba odkażona heat disinfection of soil	11,949 ^a	1,588 ^a
gleba odkażona + EM heat disinfection of soil + EM	11,796 ^a	1,473 ^b
gleba odkażona + EM + gorczyca heat disinfection of soil + EM + mustard	13,468 ^a	1,888 ^a
Średnio w doświadczeniu Average for the experiment	10,833	1,442

Zastosowane roztwory EM na glebie kwaśnej nie powodowały przyrostu biomasy gorczycy, a nawet obserwowano przeciwną reakcję roślin, istotne zmniejszenie suchej masy roślin zarówno na obiekcie z glebą odkażoną, jak i nie odkażoną (tab. 65).

Istotny wzrost plonów świeżej masy gorczycy w porównaniu z obiektem kontrolnym uzyskano natomiast, gdy uprawiano tę roślinę na glebie odkażonej po wniesieniu do niej materii organicznej (gorczycy), do której dodano EM, sam zabieg odkażania termicznego gleb przynosił podobny efekt.

Zawartość i pobranie fosforu

Zmiany stanu fosforowego gleb, czyli zmniejszenie lub zwiększenie dostępności fosforanów glebowych oceniano, również stosując metodę biologiczną. W warunkach doświadczenia wazonowego gorczyca zawierała od 1,37 do 6,37 g P w przeliczeniu na kilogram suchej masy (tab. 66). Najniższe zawartości fosforu oraz pobranie tego pierwiastka obserwowano u roślin uprawianych na obiektach, na których nie stosowano dodatków fosforanów (tab. 67).

Regulacja odczynu za pomocą węglanu wapnia oraz PRP nie powodowała istotnych zmian zawartości fosforu w gorczycy. Nawożenie potasowo-azotowe oraz wapnowanie łącznie z nawożeniem potasowo-azotowym również nie wpływało na zwiększenie zawartości fosforu w gorczycy. Skrajnie różne dawki nawozu PRP wykorzystywane w doświadczeniu także nie powodowały zmian w zawartości fosforu w roślinach. Na wszystkich wymienionych wyżej obiektach efekty użycia dodatków były takie same.

Tabela 66
Table 66

Zawartość i pobranie fosforu przez gorczycę, doświadczenie I
Content and uptake of phosphorus by mustard, experiment I

Obiekt doświadczenia Test pots	Zawartość fosforu Content of phosphorus	Pobranie fosforu Uptake of phosphorus
	[g P·kg ⁻¹]	[g·wazon ⁻¹] [g·pot ⁻¹]
Gleba kontrolna – Control soil	1,646 ^c	2,457 ^d
2 NK	1,371 ^c	2,274 ^d
CaCO ₃	1,662 ^c	3,219 ^d
CaCO ₃ + 2 NK	1,468 ^c	2,644 ^d
PRP max.	1,988 ^c	2,86 ^d
PRP min.	1,861 ^c	2,457 ^d
1P – N	3,718 ^b	9,925 ^c
1P – K	3,294 ^b	9,353 ^c
1P – Ca	5,641 ^a	14,128 ^b
2P – N	5,364 ^a	17,282 ^a
2P – K	6,369 ^a	11,596 ^c
2P – Ca	5,677 ^a	11,465 ^c
Średnio w doświadczeniu Average for the experiment	3,338	7,472

Różnie przedstawia się zawartość fosforu w roślinach po zastosowaniu nawożenia fosforanami. Wykorzystanie pojedynczych dawek fosforanu potasu i fosforanu amonu nie powodowało zwiększenia zawartości fosforu w badanym materiale roślinnym. Istotny wzrost zawartości fosforu w gorczycy obserwowano natomiast po użyciu fosforanu wapnia oraz podwojonych dawek fosforanów (potasu, amonu, wapnia), które powodowały taki sam wzrost zawartości fosforu.

Zwiększona zawartość fosforu w gorczycy po zastosowaniu fosforanu wapnia spowodowana była prawdopodobnie korzystnym oddziaływaniem zwiększonej ilości jonów wapnia w glebie, co niewątpliwie wpływało na dostępność fosforu dla roślin, niemniej podwajanie dawki fosforanu wapnia nie powodowało dalszego wzrostu zawartości fosforu w roślinach.

Na pobranie przez rośliny fosforu nie wpływały regulacja odczynu ani regulacja odczynu połączona z nawożeniem potasowo-azotowym. Stosowanie nawozu PRP w mniejszej dawce, w charakterze polepszacza, oraz w dawce odkwaszającej glebę nie wpłynęło

istotnie na pobranie fosforu przez gorczycę. Powyższe substancje w taki sam sposób oddziaływały na pobranie fosforu przez gorczycę.

Wszystkie dawki i rodzaje użytych fosforanów wpłynęły istotnie na pobieranie fosforu przez gorczycę. Najwięcej fosforu, ponad czterokrotnie więcej niż na obiekcie kontrolnym, pobierały rośliny po zastosowaniu podwójnej dawki fosforanu amonu. Podwójna dawka fosforanu wapnia powodowała istotny spadek pobrania fosforu przez rośliny w stosunku do dawki pojedynczej, co świadczy o braku celowości jej zwiększania. Podwojenie dawki fosforanu potasu nie wpływało na wzrost pobrania fosforu przez rośliny (tab. 66).

Dane dotyczące zawartości i pobrania fosforu przez gorczycę uprawianą w II części doświadczenia wegetacyjnego zamieszczono w tabeli 67. Stosowane do gleby dodatki wpływały w sposób zróżnicowany na zawartość fosforu w materiale roślinnym. Dodanie do gleby nieodkażonej EM powodowało istotny spadek zawartości fosforu w gorczycy. Można to tłumaczyć tym, że EM mogły stanowić konkurencję dla roślin uprawnych w stosunku do fosforu – na drodze tzw. sorpcji biologicznej. Dodanie do gleby nieodkażonej EM oraz materii organicznej powodowało istotny wzrost zawartości fosforu w roślinach, w porównaniu z samym dodatkiem EM. Jednak zawartość ta kształtowała się na poziomie zawartości uzyskanej na glebie nieodkażonej.

Tabela 67
Table 67

Zawartość i pobranie P przez gorczycę, doświadczenie II
Content and uptake of phosphorus by mustard, experiment II

Objekt doświadczenia Test pots	Zawartość fosforu Content of phosphorus	Pobranie fosforu Uptake of phosphorus
	[g P·kg ⁻¹]	[g·wazon ⁻¹] [g·pot ⁻¹]
Gleba kontrolna – Control soil	1,585 ^b	2,036 ^c
gleba + EM soil + EM	0,827 ^c	0,708 ^d
gleba +EM + gorczyca soil + EM + mustard	1,628 ^b	2,506 ^{bc}
gleba odkażona heat disinfection of soil	1,746 ^a	2,756 ^b
gleba odkażona + EM heat disinfection of soil + EM	1,397 ^b	1,999 ^c
gleba odkażona + EM + gorczyca heat disinfection of soil + EM + mustard	2,128 ^a	3,906 ^a
Średnio w doświadczeniu Average for the experiment	1,597	2,400

Podobnie przedstawiała się zawartość fosforu w gorczycy uprawianej na glebie odkażonej zarówno bez, jak i z dodatkiem EM. Wzrost zawartości fosforu w roślinach obserwowano dopiero po wprowadzeniu do gleby odkażonej EM z materią organiczną.

Stosowanie EM wraz z dodatkiem materii organicznej na glebie odkażonej nie powodowało istotnych zmian w zawartości fosforu w roślinach w porównaniu z efektami

obserwowanymi wówczas, gdy dodatków tych nie używano. Po zastosowaniu EM wystąpiło obniżenie zawartości fosforu w gorczycy o 12%, jednak różnice te nie były istotne statystycznie. Wykorzystanie EM zarówno na glebie naturalnej, jak i na odkażonej powodowało obniżenie zawartości fosforu w roślinach.

Różnice w pobraniu fosforu przez gorczycę były zbliżone do wyników zmian zawartości fosforu w gorczycy, ponieważ różnice w plonach były niewielkie. Dodatek EM do gleby powodował istotny spadek pobrania fosforu przez gorczycę. Nie obserwowano zmian w pobraniu fosforu przez gorczycę na glebie odkażonej i glebie odkażonej z EM. Dopiero dodatek do gleby odkażonej z EM materii organicznej spowodował wzrost pobrania fosforu przez rośliny (tab. 67).

Stan fosforowy

Ocenę oddziaływania testowanych dodatków na zmianę zawartości fosforu rozpuszczalnego przeprowadzono, wykorzystując powszechnie stosowany w naszym kraju test chemiczny wg Egnera-Riehma oraz stosunkowo nowy test stosowany w Japonii do wspólnej ekstrakcji makro- i mikrośladników zaproponowany przez Yanai i in. [2000]. Ilość fosforu przechodzącego do roztworu oznaczanego metodą Yanai była średnio czterokrotnie mniejsza niż ilość P oznaczanego metodą Egnera-Riehma zarówno w I, jak i w II doświadczeniu (tab. 68).

Tabela 68
Table 68

Zawartość wybranych form P w glebie po zakończeniu doświadczenia I
Content of selected P forms in soil after experiment I

Obiekt doświadczenia Test pots	Fosfor aktywny Active P	Fosfor rozpuszczalny Egner-Riehm Soluble P Egner-Riehm	Fosfor rozpuszczalny Yanai Soluble P Yanai
	[mg·dm ⁻¹]	[mg·kg ⁻¹]	
Gleba kontrolna Control soil	0,001	26,37	5,57
2 NK	0,001	25,98	6,72
CaCO ₃	0,001	25,22	4,99
CaCO ₃ + 2 NK	0,001	26,37	6,24
PRP max.	0,001	41,66	6,43
PRP min.	0,001	22,54	5,18
P – N	0,064	55,42	13,87
P – K	0,049	57,33	14,06
P – Ca	0,266	107,02	28,35
2P – N	0,348	104,35	27,29
2P – K	0,286	110,84	28,64
2P – Ca	1,129	216,73	52,69
Średnio w doświadczeniu Average for the experiment	0,178	68,32	16,67

Podobnie było na poszczególnych obiektach (poza obiektem PRP max.), gdzie jedynie 15% ilości P stwierdzanej metodą Egnera-Riehma przechodziło do roztworu Yanai. Również na obiekcie CaCO₃ roztworem do wspólnej ekstrakcji identyfikowano mniej niż 20% ilości P oznaczanej metodą Egnera-Riehma (tab. 68).

Stosowane w doświadczeniu substancje różnie wpływały na zawartość fosforu rozpuszczalnego w glebie. Regulacja odczynu powodowała niewielkie obniżenie zawartości tej formy fosforu w stosunku do obiektu kontrolnego, na co wskazują wyniki uzyskane obiema metodami. Inkubacja gleby z nawozami potasowo-azotowymi nie powodowała wzrostu fosforu rozpuszczalnego według Egnera-Riehma, nieznacznie zwiększając ilość fosforanów ekstrahowanych metodą Yanai. Podobną sytuację obserwowano po dodaniu do gleby węglanu wapnia i nawozu potasowo-azotowego.

Różne ilości fosforu ruchomego oznaczono metodą Egnera-Riehma i testem według Yanai, w glebach po stosowaniu dużej (odkwaszającej) dawki nawozu PRP. Metodą Egnera-Riehma wykazano większy 58% wzrost zawartości w glebie fosforu rozpuszczalnego, a metodą według Yanai uzyskano jedynie 8% zwiększenie ilości P. Użycie mniejszej dawki PRP – zalecanej przez producenta – powodowało spadek ilości fosforu rozpuszczalnego oznaczanego metodą Egnera-Riehma o 14%, a według Yanai o 7%.

Inkubacja gleby z fosforanami najskuteczniej zwiększała ilość rozpuszczalnych frakcji fosforu oznaczanych obiema metodami (testem Egnera-Riehma uzyskano wzrost czterokrotny, testem Yanai pięciokrotny). Podwojenie dawki fosforanów powodowało wzrost zawartości fosforu rozpuszczalnego w glebie. Najlepsze efekty w postaci wyższych wartości uzyskiwanych w testach glebowych zarówno po zastosowaniu dawki pojedynczej, jak i podwójnej fosforanów uzyskano po użyciu fosforanu wapniowego. W porównaniu z fosforanem potasu i fosforanem amonu obserwowano dwukrotnie lepsze efekty. Potwierdza to zdolności mleczanu wapniowego do rozpuszczania fosforanów wapnia.

Tabela 69

Table 69

Zawartość wybranych form P w glebie po zakończeniu doświadczenia II
Content of selected P forms in soil after experiment II

Obiekt doświadczenia Test pots	Fosfor aktywny Active P	Fosfor rozpuszczalny Egner-Riehm Soluble P Egner- -Riehm	Fosfor rozpuszczalny Yanai Soluble P Yanai
	[mg·dm ⁻¹]	[mg·kg ⁻¹]	
Gleba kontrolna – Control soil	0,001	28,28	5,08
gleba + EM soil + EM	0,001	25,98	4,02
gleba +EM + gorczyca soil + EM + mustard	0,001	32,86	6,92
gleba odkażona heat disinfection of soil	0,001	32,86	5,85

Tabela 69 cd.
Table 69 cont.

gleba odkażona + EM heat disinfection of soil + EM	0,001	31,34	5,47
gleba odkażona + EM + gorczyca heat disinfection of soil + EM + mustard	0,001	36,31	8,37
Średnio w doświadczeniu Average for the experiment	0,001	31,27	5,95

W II części doświadczenia, po dodaniu do odkażonej gleby materii organicznej, obserwowano największy przyrost zawartości fosforu ruchomego, którego testem Egnera-Riehma oznaczono o 28% więcej, a testem Yanai aż o 64% więcej. Testy P rozpuszczalnego, przeprowadzone metodą Egnera-Riehma oraz metodą Yanai, wykazały brak poprawy stanu fosforowego gleby, jeżeli nie wnoszono wraz z testowanymi substancjami fosforu do gleby. Zastosowanie EM nie modyfikowało zawartości rozpuszczalnego fosforu w glebach.

Dodanie EM do gleby nieodkażonej powodowało spadek zawartości fosforu rozpuszczalnego w inkubowanej glebie, według testu Egnera-Riehma o 8%, natomiast w metodzie Yanai o 20%. Dodanie do gleby równocześnie z EM substancji organicznej powodowało wzrost zawartości fosforu rozpuszczalnego o 16% testem Egnera-Riehma i 32% metodą Yanai. Oba testy wskazały także, że potraktowanie gleby wilgotnej wysoką temperaturą w celu jej odkażenia powodowało wzrost ilości fosforu ruchomego o około 15%, natomiast dodanie do takiej gleby jeszcze EM spowodowało kilkuprocentowy spadek (5 i 7%) zawartości tej formy fosforu.

Stężenie fosforu aktywnego w testowanej glebie zamieszczono wraz z wynikami dotyczącymi form rozpuszczalnych w tabeli 69. Uzyskane w warunkach doświadczenia inkubacyjnego wartości wahały się w granicach od 0,001 do 0,348 mg P-dm⁻¹ roztworu. Jedynie stosowanie podwójnej dawki fosforanu wapnia znacznie zwiększyło ilość fosforu aktywnego w glebie, aż do wartości 1,129 mg P-dm⁻¹, a więc prawie dwukrotnie większej od uznawanej za wystarczającą do optymalnego zaopatrzenia roślin w fosfor. Należy zauważyć także, że stężenie P w glebie na obiekcie 2P – Ca było ponad sześciokrotnie większe niż przeciętna jego wartość uzyskana w doświadczeniu (tab. 68).

Gleby o wysokiej zasobności w fosfor ruchomy na ogół wykazują duże stężenie fosforu w roztworze glebowym. Testowana gleba charakteryzowała się niską zawartością tej formy fosforu, zatem na obiektach gdzie nie wnoszono P wraz z testowanymi substancjami, zawartość fosforu aktywnego była bardzo niska. Na obiektach gdzie uregulowano odczyn (węglanem wapnia), analiza wykazała brak wzrostu rozpuszczalności fosforu. Podobnie stosowanie różnych dawek PRP i nawożenia potasowo-azotowego nie wpłynęło na zmianę stężenia fosforu aktywnego w roztworze glebowym.

Nawożenie fosforanami spowodowało w analizowanej glebie wzrost stężenia fosforu aktywnego średnio o 0,357 mg-dm⁻¹. Jednak najlepsze efekty uzyskano po zastosowaniu zarówno dawki pojedynczej, jak i podwójnej fosforanu wapnia. Najprawdopodobniej wapń zawarty w tych fosforanach wpływał dodatkowo na zwiększenie rozpuszczalności fosforu w kwaśnej glebie.

Analiza efektów oddziaływania substancji używanych w II części doświadczenia (tab. 69) wykazała faktyczny brak ich wpływu na rozpuszczalność fosforanów w $0,01 \text{ mol dm}^{-3}$ CaCl_2 . Zawartość fosforu aktywnego po zastosowaniu testowanych substancji pozostała prawie na poziomie śladowym.

Test fosforu aktywnego stosuje się w celu uściślenia dawek nawozów fosforowych. Pozwala on na określenie aktualnie dostępnych fosforanów lub tych które występują w formie bardzo szybko ustalającej się równowagi z roztworem glebowym [Fotyma i in. 1991]. Analiza gleb obu doświadczeń inkubacyjnych wykazała, że na glebach wyczerpanych z fosforu najlepszym sposobem poprawy stanu fosforowego gleb jest „stosowanie tradycyjnych nawozów fosforowych” zawierających fosfor mineralny lub materii organicznej zawierającej w swoim składzie fosfor organiczny. Żaden dodatek mający „użyźniać”, zamiast wnoszenia fosforu do gleby zdegradowanej, nie powodował poprawy jej stanu fosforowego.

Doświadczenie inkubacyjne nie potwierdziło poglądu Ahmada i in. [1995], że EM mogą zastąpić częściowo nawożenie mineralne. Odkazanie gleby oraz stosowanie materii organicznej również nie wpłynęło istotnie na rozpuszczalność związków fosforu występujących w glebie.

Właściwości sorpcyjne gleb względem fosforu

Oprócz opisanych wcześniej statycznych wskaźników, które tylko ilościowo opisują pulę fosforu rozpuszczalnego lub aktywnego, określano dynamikę tego składnika w glebie. Na wszystkich obiektach gleba desorbowała niewielkie ilości fosforu, o czym świadczy stężenie I_n średnio $0,142 \text{ mg P} \cdot \text{dm}^{-3}$.

Tabela 70

Table 70

Desorpcja i sorpcja fosforu po zakończeniu doświadczenia I
Desorption and sorption of phosphorus after experiment I

Obiekt doświadczenia Test pots	Stężenie fosforu w roztworze Concentration of phosphorus in solution [mg P·dm ⁻³]			
	0	5	7,5	10
Gleba kontrolna – Control soil	0,002	0,273	0,460	0,802
2 NK	0,006	0,266	0,507	0,834
CaCO ₃	0,002	0,162	0,270	0,443
CaCO ₃ + 2 NK	0,002	0,150	0,262	0,443
PRP max.	0,000	0,154	0,205	0,431
PRP min.	0,008	0,228	0,407	0,741
P – N	0,033	0,501	0,726	1,364
P – K	0,026	0,472	0,743	1,166
P – Ca	0,199	0,780	1,033	1,584
2P – N	0,265	0,928	1,248	1,872
2P – K	0,227	0,739	1,138	1,880

Tabela 70 cd.
Table 70 cont.

2P – Ca	0,934	1,626	1,758	2,419
Średnio w doświadczeniu Average for the experiment	0,142	0,523	0,729	1,165

Najmniej desorbowanego fosforu stwierdzono, gdy nie stosowano nawożenia fosforowego. Dotyczyło to obiektów, na których testowano zarówno oddziaływanie regulacji odczynu (węglanem wapnia i PRP), jak i nawożenia potasowo-azotowego, oddziaływanie EM z dodatkiem oraz bez dodatku materii organicznej.

Wzrost ilości uwolnionego fosforu do roztworu obserwowano jedynie na obiektach traktowanych fosforanami. Każde zwiększenie ich dawek powodowało wzrost uwalniania fosforu do roztworu. Wśród analizowanych w doświadczeniu fosforanów najwięcej fosforu uwalniało się z gleby na obiektach z fosforanem wapnia.

Zastosowanie roztworów z dodatkiem P o stężeniu 5,0; 7,5 oraz 10 mg P·dm⁻³ pozwoliło na określenie zdolności sorpcyjnych badanej gleby. Badana gleba z I doświadczenia (tab. 70) średnio wiązała 90% aplikowanego w roztworze fosforu, więcej 93% zatrzymywała gleba z II doświadczenia. Wyniki uzyskane po równoważeniu gleby w roztworach, o coraz wyższych stężeniach P, wskazały na jej duże możliwości do wiązania fosforu, gdyż ilości bezwzględne sorbowanego P z roztworu wzrastały.

Na wszystkich obiektach w I części doświadczenia można zauważyć powtarzającą się prawidłowość, świadczącą o tym, że:

- Nawożenie potasem i azotem oraz PRP w mniejszej dawce nie powodowały zmian w ilości uwalnianego fosforu do roztworu, w stosunku do gleby kontrolnej.
- Wapnowanie (węglanem wapnia): wapnowanie z nawożeniem potasowo-azotowym; PRP max. powodowały takie same zmiany w ilości sorbowanego fosforu w stosunku do gleby kontrolnej. Gleba na tych obiektach sorbowała więcej fosforu niż gleba kontrolna. Wraz ze wzrostem stężenia roztworu malał przyrost ilości sorbowanego przez glebę fosforu w stosunku do kontroli.
- Nawożenie fosforanami wpływało na mniejsze sorbowanie przez glebę fosforu aplikowanego w roztworach. Zwiększanie dawek nawozów fosforowych powodowało spadek sorpcji roztworu z gleby. Fosforany wapniowe (w dawce pojedynczej i w dawce podwójnej) zmniejszały ilość sorbowanego przez glebę fosforu.

Tabela 71
Table 71

Desorpcja i sorpcja fosforu po zakończeniu doświadczenia II
Desorption and sorption of phosphorus after experiment II

Obiekt doświadczenia Test pots	Stężenie fosforu [mg P·dm ⁻³] Concentration of phosphorus			
	0	5	7,5	10
Gleba kontrolna – Control soil	0,002	0,264	0,475	0,784
gleba + EM soil + EM	0,006	0,416	0,729	1,138

Tabela 71 cd.
Table 71 cont.

gleba +EM + gorczyca soil + EM + mustard	0,000	0,247	0,437	0,773
gleba odkażona heat disinfection of soil	0,008	0,269	0,486	0,870
gleba odkażona + EM heat disinfection of soil + EM	0,008	0,375	0,680	1,103
gleba odkażona + EM + gorczyca heat disinfection of soil + EM + mustard	0,006	0,206	0,371	0,581
Średnio w doświadczeniu Average for the experiment	0,005	0,296	0,530	0,875

Wnoszenie do gleby Efektywnych Mikroorganizmów (tab. 71) powodowało spadek sorpcji fosforu w glebie zarówno odkażonej, jak i nieodkażonej. Dodatek EM do materii organicznej przed wprowadzeniem jej do gleby nieodkażanej niwelował ograniczanie sorpcji fosforu przez gleby zawierające tylko EM. Sorpcja ta była taka sama jak na glebie nieodkażanej, na której nie stosowano dodatków.

Na obiekcie gdzie odkażano gleby przed zastosowaniem EM, dodatek materii organicznej, podobnie jak wówczas, gdy gleby nie odkażano, powodował wzrost sorpcji fosforu w glebie.

Najlepszym wskaźnikiem oceny przydatności wyników analiz chemicznych gleb dla praktyki rolniczej jest ich weryfikacja za pomocą testów roślinnych. Zwykle przy wykorzystaniu w testach biologicznych roślin wyższych obliczane są korelacje pomiędzy wytworzoną biomasą oraz jej składem chemicznym a ilością wyekstrahowanego za pomocą różnych roztworów testowanego składnika.

Obliczone współczynniki korelacji pomiędzy wynikami uzyskanymi w doświadczeniach wegetacyjnych oraz doświadczeniu inkubacyjnym przedstawiono w tabeli 72.

W warunkach prowadzonych badań ilości fosforu występującego w glebach w formach ruchomych były w największym stopniu skorelowane z zawartością P w roślinach gorczycy.

Najwyższe współczynniki korelacji, z każdym z analizowanych parametrów doświadczenia wegetacyjnego, uzyskano z zawartością w glebie P ekstrahowanego metodą Yanai, a najniższe ze stężeniem w glebie fosforu aktywnego (tab. 72).

Tabela 72
Table 72

Zależność pomiędzy wynikami doświadczenia wegetacyjnego i inkubacyjnego
Correlation between effects of vegetative and incubational experiments

Zawartość P na obiektach doświadczenia inkubacyjnego Content P at incubational experiment sites	Parametry doświadczenia wegetacyjnego Parameters of vegetative experiment			
	Zielona masa Fresh mass	Sucha masa Dry mass	Zawartość P Content P	Pobranie P Uptake P
P – aktywny Active P	0,200	0,319	0,724	0,622

Tabela 72 cd.
Table 72 cont.

P – Egnera-Riehma Egner-Riehm P	0,325	0,444	0,860	0,763
P Yanai	0,371	0,499	0,894	0,808

Wyniki uzyskane w badaniach własnych wskazują, że metoda proponowana przez Yanai i in. [2000] może być przydatna do szerokiego zastosowania w warunkach Polski w celu badania zasobności gleb w fosfor dostępny dla roślin, ponieważ jej wyniki w większym stopniu były powiązane z zawartością fosforu w roślinach i pobraniem przez nie tego składnika niż dotychczas stosowana metoda Egnera-Riehma.

Metodę Yanai i in. [2000] testowano na 49 glebach uprawnych, pobranych z doświadczeń prowadzonych na terenie Japonii i Korei. Autorzy wykazali ścisłą zależność pomiędzy ilością fosforu ekstrahowanego proponowaną przez nich metodą, a powszechnie stosowanymi w tych krajach metodami ekstrakcji P dostępnego dla roślin Truoga ($r = 0,991$) oraz Bray'a ($r = 0,898$).

Zastosowanie tej metody do jednoczesnej ekstrakcji wielu składników w celu masowego oznaczania stanu zasobności gleb wydaje się korzystniejsze niż metody Mehlich 3, ponieważ można nią oznaczać również $N-NO_3$. Analizy zaś przeprowadzać w naczyniach szklanych, gdyż proponowany roztwór ekstrakcyjny nie zawiera NH_4F .

5. Wnioski

Na podstawie wyników uzyskanych podczas przeprowadzonych badań można sformułować następujące wnioski:

1. Pomimo bardzo wysokich wartości wskaźników bonitacji negatywnej zasobności gleb Polski w fosfor oraz stosowania przeciętnie małych dawek nawozów fosforowych większość badanych gleb uprawnych Dolnego Śląska zawierała bardzo duże ilości tego składnika.
2. Z ogólnej puli fosforu zawartego w glebach uprawnych ilości tego składnika oznaczone poszczególnymi testami układały się w następującym malejącym szeregu: P całkowity (100%) > P-Egnera-Riehma (15%) > P-Mehlich-3 (11%) > P aktywny (0,1%). Ilości fosforu ekstrahowanego roztworem Mehlich-3 nie były skorelowane ani z ilością fosforu oznaczonego testem Egnera-Riehma, ani z parametrami sorpcji pomimo ekstrakcji zbliżonych ilości tego składnika obiema metodami.
3. Test Egnera-Riehma stosowany do oceny zasobności gleb mineralnych w fosfor i wyznaczania dawek nawozów fosforowych pozwolił określić jedynie zawartość rozpuszczalnych fosforanów (głównie wapniowych), natomiast okazał się nieprzydatny do prognozowania zdolności sorpcyjnych gleb względem fosforu. Do tego celu bardziej miarodajna okazała się metoda Pagela, która jednocześnie jest prostsza w wykonaniu.
4. Ilość fosforu zasorbowana przez badane gleby była dodatkowo skorelowana z zawartością C organicznego i części spławialnych, natomiast ujemnie z wielkością desorpcji fosforu i udziałem tego składnika, wyekstrahowanego roztworem Egnera-Riehma, w fosforze całkowitym.
5. Systematyczne nawożenie obornikiem przez wiele lat oraz wzrastającymi dawkami azotu mineralnego powodowało istotne zmiany właściwości sorpcyjnych gleby względem fosforu. W warunkach stosowania obornika i niskich dawek azotu ulegały zwiększeniu możliwości gleb do uwalniania fosforu, aż do głębokości 40 cm.
6. W warunkach prowadzonego doświadczenia polowego nie stwierdzono wpływu nawożenia obornikiem na modyfikację wartości indeksu sorpcji fosforu oznaczonego według Bache. Wykazano natomiast istotny wzrost tego indeksu w warstwie ornej i podornej gleby pod wpływem trwałego nawożenia wysokimi dawkami nawozów azotowych.
7. Głębsze warstwy gleby sorbowały większe ilości fosforu niż warstwa orna. Średnio w doświadczeniu względne wartości indeksu sorpcji według Bache warstwy 20–40 cm

były większe o ponad 50%, warstwy 40–60 cm – prawie trzykrotnie, a warstwy 60–80 cm ponad 4,5-krotnie większe niż wartość tego indeksu obliczona dla warstwy ornej (0–20 cm).

8. Wieloletnie stosowanie obornika przyczyniło się do wzbogacenia gleby w fosfor całkowity oraz jego formy rozpuszczalne mierzone testem Egnera-Riehma, aż do głębokości 80 cm. Najbardziej dostępne dla roślin, labilne fosforany mierzone testem fosforu aktywnego występowały głównie w warstwie ornej i podornej, natomiast nie stwierdzono ich obecności w warstwie gleby położonej poniżej 60 cm.
9. Gleby nawożone obornikiem, na których nie stosowano nawożenia azotem mineralnym lub wykorzystywano niskie dawki tego składnika, charakteryzowały się najlepszym stanem fosforowym.
10. Okres 3-letnich badań wegetacyjnych okazał się zbyt krótki do wykazania przyjętymi metodami chemicznymi zmniejszenia się rezerw fosforu, nagromadzonego w glebach w wyniku wcześniejszego wieloletniego nawożenia. Nie stwierdzono obniżenia zasobności gleby w formy rozpuszczalne tego składnika oznaczone testem Egnera-Riehma ani zmniejszenia jego ruchliwości oznaczanej testem P aktywnego.
11. Ilości fosforu pobranego przez rośliny były zależne nie tylko od zasobności gleby w formy ruchome tego składnika, ale były również silnie powiązane z wielkością dawek nawożenia azotowego i rosły wraz z ich zwiększaniem.
12. Wapnowanie gleby wyczerpanej z fosforu węglanem wapnia w ilości 1 Hh nie zwiększało ani stężenia fosforu aktywnego, ani ilości fosforu rozpuszczalnego ekstrahowanego zarówno metodą Egnera-Riehma, jak i Yanai.
13. Wprowadzanie do gleby kwaśnej, wyczerpanej z fosforu, preparatu PRP – niezależnie od wnoszonej dawki – nie wpływało na plonowanie roślin, ani nie modyfikowało zawartości i nagromadzenia fosforu w roślinach, jak również stanu fosforowego gleby. Roztwór Efektywnych Mikroorganizmów dodany do kwaśnej gleby obniżał w niej zawartość fosforu rozpuszczalnego, natomiast wzrost jego zawartości obserwowano wtedy, gdy z tym roztworem wnoszono do gleby substancję organiczną.
14. Istotne efekty plonotwórcze oraz wzrost zasobności w fosfor gleby kwaśnej, wyczerpanej z fosforu, wykazano jedynie po wniesieniu do niej substancji organicznej lub dodaniu do niej fosforanów. Najlepsze działanie plonotwórcze wykazywał fosforan amonu, natomiast stan fosforowy gleby najlepiej poprawiał fosforan wapnia.
15. W warunkach niedoboru fosforu w glebie najlepszą korelację z testem wegetacyjnym uzyskano, określając jej stan fosforowy metodą Yanai.
16. Wykazana silna zależność pomiędzy stężeniem fosforu aktywnego a parametrami sorpcji tego składnika pozwala przypuszczać, że ten prosty i łatwy do wykonania test może być wykorzystany do wstępnego oszacowania ilości fosforanów uwalnianych z fazy stałej gleb do roztworu glebowego, zwłaszcza gdy są one zasobne w ten składnik.

6. Piśmiennictwo

- Abdu N., 2006. Soil phosphorus extraction methodologies: A review, *African Journal of Agricultural Research*, 1, (5), 159–161.
- Ahmad R., Hussain T., Jilani G., Shalid S. A., Akhtar S. N., Abbas M. A., 1995. Use of effective microorganisms for sustainable crop production in Pakistan. *Proc. of Second Conference of Effective Microorganisms*, 15–27.
- Allen D.G., Barras N.J., Bolland M.D.A., 2001. Comparising simple methods for measuring phosphate sorption by soil. *Austr. J. of Soil Res.*, 39(6), 1433–1442.
- Andersson H., Bergstrom L., Djodjic F., Ulen B., Kirchmann H., 2013. Topsoil and subsoil properties influence phosphorus leaching from agricultural soil. *J. Environ Qual.*, 42 (2), 455–463.
- Anghinoni I., Barber S.A., 1980. Phosphorus influx and growth characteristics of corn roots as influenced by phosphorus supply. *J. Agron.*, 72, 658–688.
- Assubale F.N., 2012. A Novel Facile Method For the Extraction of Phosphorus in Soil Samples Based on Magnesium Salphate, *J. of Research in Environmental Science and Toxicology*, 1 (8), 213–220.
- Bache B.W., Williams E., G., 1971. A phosphate sorption index for soils. *J. Soil Sci. Oxford*, 22 (3), 289–301.
- Barber S., 1995. *Soil Nutrient Bioavailability. A Mechanistic Approach*, John Wiley and Sons, New York, 398.
- Barrow N. J., 1997. Desorption of phosphate from soils using anion Exchange resin. *J. Soil Sci.*, 31, 297–306.
- Bednarek W., Maćkowiak Cz., Tkaczyk P., 1999. Wpływ nawożenia na występowanie mineralnych frakcji fosforu w glebie. *Zesz. Probl. Post. Nauk Roln.*, 467, 331–337.
- Bednarek W., Tkaczyk P., 2001. Mineralne formy fosforu w glebie wapnowanej oraz nawożonej azotem i fosforem. *Prace Nauk. AE Wrocław*, 888, 167–172.
- Bednarek W., Tkaczyk P., 2004. Następczy wpływ wapnowania oraz nawożenia mineralnego na zawartość ruchomych form i mineralnych frakcji fosforu w glebie. *Prace Naukowe AE Wrocław*, 1017, 60–68.
- Besford R.T., 1979. Uptake and distribution of phosphorus in tomato plants, *Plant Soil*, 51, 331–340.
- Bieleski R.L., 1973. Phosphate pools, phosphate transport, and phosphate availability, *Ann. Rev. Plant Physiol.*, 24, 225–252.
- Black C.A., 1965. *Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties*. Agron. Mono. No. 9., Am. Soc. of Agronom., Madison: WI, USA.

- Blake L., Mercik S., Koerschens M., Moskal S., Poulton P.R., Goulding K.W.T., Weigel A., Powlson D.S., 2000. Phosphorus content in soil, uptake by plants and balance in three European long-term field experiments, *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 56 (3), 263–275.
- Blecharczyk A., 1999. Forty years of fertilizing experiment in Brody with crop grown continuously and in crop rotation. *Zesz. Probl. Post. Nauk Roln.*, 465, 261–272.
- Bray R.H., Kurtz L.T., 1945. Determination of total organic and available forms of phosphorus in soils. *Soil Sci*, 59, 39–45.
- Chapman S., 2002. The new Mehlich-3 soil extractant. University of Arkansas Soil Test Notes.
- Chojnacki A., Boguszewski W., 1971. Zawartość azotu, fosforu i potasu w głównych roślinach uprawnych w Polsce. *Pam. Puł.*, 50, 5–27.
- Cwojdzński W., Nowak K., Majcherczak E., 1993. Wpływ nawożenia organicznego i mineralnego na niektóre właściwości gleb w statycznym doświadczeniu nawozowym. *Zesz. Nauk. AR Kraków, Rolnictwo*, 278, 373–381.
- Czuba R. 1995. Zmiany zasobności gleb kraju w trzydziestoleciu oraz eksperymentalna ocena systemów regeneracji nadmiernie wyczerpanych ich zasobów. *Zesz. Probl. Post. Nauk Roln.*, 421, 59–66.
- Czuba R., Andruszak E., 1990. Zasoby fosforu w wierzchniej warstwie gleb i ich znaczenie w produkcji roślinnej. *Prac. Nauk AE Wrocław, Chemia*, 526, 10–20.
- Dechnik I., Bednarek W., Filipek T., 1993. Wpływ nawożenia azotem i potasem na niektóre właściwości gleby brunatnej wytworzonej z lessu. *Zesz. Nauk. AR Kraków*, 37, 133–141.
- Djordjic F., Bergstrom L., 2005. Conditional phosphorus index as an educational tool for risk assessment and phosphorus management. *Ambio.*, 34 (4–5), 296–300.
- Djordjic F., Borling K., Bergstrom L., 2004. Phosphorus leaching in relation to soil type and soil phosphorus content. *J. Environ Qual.*, 33 (2), 678–684.
- Ehlert P., Morel C., Fotyma M., Destain J., 2002. Potential role of phosphate buffering capacity of soils in fertilizer management strategies fitted to environmental goals. *Journal of plant Nutrition and Soil Science*, 166, 4, 409–415.
- Faber A. 1988. Ocena stanu odżywienia roślin makroelementami metodą zintegrowanego systemu diagnozy i zaleceń – DRIS. I. Wykorzystanie analizy roślin do określania potrzeb nawożenia. *Pam. Puł.*, 93, 7–22.
- Fardeau J.C., 1996. Dynamics of phosphate in soils. An isotopic outlook, *Fert. Res.*, 91–109.
- Fotyma M., 1978. Zasady nawożenia fosforem w Polsce. *Prace Nauk. AE, Wrocław Chemia*, 132 (154), 19–27.
- Fotyma M., Adamus M., Filipiak K., Gosek S., Kozłowska H., 1976. Opracowanie wskaźników optymalizacji nawożenia. Cz. I. Nawożenie fosforem. *Pam. Puł. Prace IUNG*, 66, 75–88.
- Fotyma M., Fotyma E., Gosek S., Hłowiecka E., Pietrasz-Kęsik G., Kęsik K., Ostrokólski I., Szewczyk M., Wilkos G., Faber A., 1991. Szybkie metody określania potrzeb nawozowych roślin oraz zagrożenia środowiska w wyniku nawożenia, *Instrukcja wdrożenia* 34/91. Puławy.

- Fotyma M., Gosek S., Szewczyk M., 1996. Porównanie przydatności różnych metod określania odczynu gleby oraz zawartości przyswajalnych form fosforu, potasu i magnezu. *Rocz. Glebozn.*, 47, (1/2), 65–78.
- Fotyma M., Mercik S., Faber A., 1987. Chemiczne podstawy żyzności gleb i nawożenia. PWRiL, Warszawa.
- Fotyma M., Naglik E., Pietrasz-Kęsik G., 1989. Zmiany produktywności i żyzności gleby wytworzonej z gliny lekkiej pod wpływem wieloletniego nawożenia fosforem i potasem. *Rocz. Glebozn.*, 40, (1), 83–99.
- Frossard R., Stadelmann F.X., 1987. Phosphor in der Pflanze – Funktion, Bedarf. Phosphat in Landwirtschaft und Umwelt. FAC-Oktobertagung Liebefeld.
- Fuhrman J.K., Zhang H., Schroder J.L., Davis R.L., 2005. Water- Soluble Phosphorus as Affected by Soil to Extractant Ratios, Extraction Times and Electrolyte Comm. In *Soil Science and Plant Analysis*, 36, 925–935.
- Gibczyńska M., 2008. Związki fosforu w glebie i metody oznaczania ich zawartości, *Zesz. Probl. Post. Nauk Roln.*, 533, 97–116.
- Gibczyńska M., Jurgiel- Małecka G., Lewandowska L., 2008. Porównanie metod oznaczania zawartości fosforu nieorganicznego i organicznego w glebach mineralnych, *Zesz. Probl. Post. Nauk Roln.*, 533, 117–123.
- Gosek S., Boreczek B., 1998. Ocena różnych metod oznaczania glebowego fosforu, *Prace Nauk. AE Wrocław*, 792, 207–215.
- Higgs B., Johnston A.E., Salter J.J., Dawson C.J., 2000. Some aspects of achieving sustainable phosphorus use in agriculture. *Journal of Environmental Quality*, 29, 80–87.
- Holford I.C.R., 1997 Soil phosphorus: it's measurement, and it's uptake by plants, *Aust. J. Soil Res.*, 35, 227–239.
- Itoh S., Barber S.A., 1983. Phosphorus uptake by six plant species as related to Root hairs. *Agron. J.*, 75, 457–461.
- Kamińska W., Kardasz T., Strahl A., Bałuka T., Walczak K., 1972. Metody badań laboratoryjnych w stacjach chemiczno-rolniczych. Cz. II. Badanie materiału roślinnego. IUNG Puławy.
- Koper J., Lemanowicz J., Igras J., 2004. Wpływ nawożenia obornikiem i azotem mineralnym na zawartość wybranych form fosforu oraz aktywność fosfatazową. *Prace Nauk. AE Wrocław*, 1017, 41–51.
- Koter Z., Krawczyk Z., 1977. Plonowanie i skład chemiczny kilku gatunków roślin niemotylkowych w zależności od dawki azotu i terminu sprzętu. *Pam. Puł.*, 68, 105–119.
- Kundler P., 1970. Ausnutzung, Festlegung und Verluste von Düngemittelstickstoff. *Albrecht-Thaer-Archiv*, 14 (3), 191–210.
- Łabętowicz J., 2000. Współczesne poglądy na żyzność i metody testowania gleb, *Nawozy i nawożenie*, 3, 106–130.
- Łabętowicz J., Korc M., Gutowska A., 1998. Ocena skutków niezrównoważonego nawożenia dla zasobów fosforu glebowego w trwałym doświadczeniu nawozowym. *Prace Nauk. AE Wrocław*, 792, 159–267.
- Łabętowicz J., Majewski E., Radecki A., Kaszczuk M., 2002. Bilans fosforu w wybranych gospodarstwach rolnych w Polsce. *Nawozy i nawożenie*, 4(13), 139–147.

- Łabętowicz J., Rutkowska B., 2001. Czynniki kształtujące stężenie fosforu w roztworze glebowym gleb rolniczych Polski, *Prace Nauk. AE Wrocław*, 888, 151–159.
- Lambers H., Shane M., Cramer M., Pearse S., Veneklaas E., 2006. Root Structure and Functioning for Efficient Acquisition of Phosphorus: Matching Morphological and Physiological Traits. *Ann. Bot.*, 98 (4), 693–713.
- Larsen S., 1967 Soil phosphorus, *Advances in Agronomy*, 19, 151–210.
- Lewis D.R., McGechan M., 2002. A Reviewed of field scale phosphorus dynamics models, *Biosystem Engineering*, 82 (4), 359–380.
- Lityński T., Jurkowska H., Gorlach E., 1976. *Analiza chemiczno-rolnicza*. PWN, Warszawa.
- Marschner H., 1995. *Mineral Nutrition of Higher Plants* Academic Press, London, New York.
- Mazur T., 1999. Rolnicze i ekologiczne znaczenie nawożenia organicznego i mineralnego, *Zesz. Probl. Post. Nauk Roln.*, 467, 151–157.
- McDowell R. W., Sharpley A.N., 2003. Phosphorus solubility and release kinetics as a function of soil test P concentration, *Geoderma*, 112, 143–154.
- Mehlich A., 1978. New extractant for soil test evaluation of phosphorus, potassium, magnesium, calcium, sodium, manganese and zinc. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, 9 (6), 477–492
- Mehlich A., 1984. Mehlich 3 soil test extractant: A modification of Mehlich 2 extractant. *Comm. Soil Sci. Plant An.*, 15, 1409–1416.
- Mengel K., Kirkby E.A., 1987. *Podstawy żywienia roślin*. Międzynarodowy Instytut Potasowy, Bazylea.
- Mercik S., Moskal S., Stępień W., Turemka E., 1998. Losy fosforu z superfosfatu i z obornika w zależności od zmianowania w wieloletnich doświadczeniach nawozowych, *Prace Nauk. AE Wrocław*, 792, 296–303.
- 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.
- Nelson W.L., Mehlich A., Winters E., 1953. The development, evaluation and use of soil tests for phosphorus availability, *Agronomy*, 4, 153–188.
- Olsen S.R., Cole C.V., Watanabe F.S., Dean L.A., 1954. Estimation on available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate U. S. Dep. of Agric. Circ. 939.
- Omotoso T.I., Wild A., 1970. Content of inositol phosphates in some English and Nigerian soils. *J. Soil Sci.*, 21, 216–236.
- Pagel H., Benkenstein H., Krüger W., 1981. Vereinfachte Ermittlung von P-Sorptionsisothermen und ihre Bedeutung für die Erfassung des P-Zustandes und der P-Dynamik im Boden. *Arch. Acker- u. Pflanzenbau u. Bodenkd.*, 25 (12), 755–764.
- Pagel H., Van Huay H., 1976. Wichtige Parameter der Phosphat-Sorptionskurven einiger Böden der Tropen und Subtropen und ihre zeitliche Veränderung durch P-Düngung. *Arch. Acker u. Pflanzenbau u. Bodenkd.*, 20, 765–778.
- Piechota T., Blecharczyk A., Małecka I., 2000. Wpływ wieloletniego nawożenia organicznego i mineralnego na zawartość składników pokarmowych w profilu glebowym. *Folia UNIV. Agric. Stetin.* 211, *Agricultura* (84), 393–398.

- Pondel H., 1974. Zawartość fosforu w glebach wytworzonych z glin z uwzględnieniem jego połączeń mineralnych i organicznych, *Pam. Puł, PWRiL, zeszyt 59*, 9–26.
- Pondel H., Terelak H., Wilkos S., 1971. Właściwości chemiczne gleb uprawnych Polski. *Pam. Puł. supl.*, 71, 5–181.
- Prace Komisji Naukowych PTG 1976. Ujednolicone metody oznaczania całkowitej zawartości makroskładników w glebie, Warszawa, 11/4.
- Rabikowska B., 1999. Oddziaływanie długoletniego nawożenia obornikiem i azotem na plonowanie i zawartość podstawowych makroskładników w kukurydzy, *Zesz. Probl. Post. Nauk Roln.*, 465, 219–231.
- Rabikowska B., 2002. Wpływ nawożenia obornikiem i azotem mineralnym na bilans azotu w doświadczeniu statycznym, *Nawozy i nawożenie*, 1(10), 188–197.
- Rabikowska B., Piszcz U., 2002. Bilans fosforu w warunkach długoletniego zróżnicowanego nawożenia obornikiem i azotem mineralnym. *Nawozy i nawożenie*, 4, 149–158.
- Raven K.P., Hossner L.R., 1993. Phosphate desorption quantity- intensity relationship in soil., *Soil Sci Am. J.*, 57, 1505–1508.
- Rhodes E.R., 1977. Simple phosphate sorption index on some soils of the humid tropics, *Plant and Soil*, 46, 263–266.
- Richter D. (red.), 1982. *Agrochemische Methoden für die Untersuchung des Phosphathaushaltes der Boden; Methodensammlung DAL Jena.*
- Rutkowska B., Łabętowicz J., Szulc W., 2002. Stężenie fosforu w roztworze glebowym w zróżnicowanych warunkach glebowych i nawozowych. *Nawozy i nawożenie*, 4, 285–295.
- Sądej W., 2000. Badania nad przemianami fosforu w glebach i jego wykorzystaniem przez rośliny uprawne w warunkach zróżnicowanego nawożenia. *Wyd. Uniw. Warmińsko-Mazurskiego, Olsztyn.*
- Sharpley A.N., 1995. Soil phosphorus dynamics agronomic and environmental in pacts, *Ecological Engeneering*, 5, 261–279.
- Sharpley A.N., 2000. Bioavailable phosphorus in soil [in:] Pierzynski G.M. (ed.) *Methods for phosphorus analysis for soils, sediments, residual and waters. Southein Cooperative Series Bull.*, XXX, 38–43.
- Sharpley A.N., Robinson J.S., Smith S.J., 1995. Bioavailable phosphorus dynamics in agricultural soils and effects on water quality, *Geoderma*, 67, 1–15.
- Sibbesen E., 1978. An investigation of the anion- exchange resin method for soil phosphate extraction, *Plant Soil*, 50, 305–321.
- Smith K.A., Jackson D.R., Peper T.J., 2001a. Nutrient losses by surface run-off following the application of organic manures to arable land. 1. Nitrogen. *Environmental Pollution*, 112 (1), 41–51.
- Smith K.A., Jackson D.R., Withers P.J.A., 2001b. Nutrient losses by surface run-off following the application of organic manures to arable land. 2. Phosphorus. *Environmental Pollution*, 112 (1), 53–60.
- Sparks D.L., 1985. Kinetics of ionic reaction in clay minerals and soils, *Adv. Agron.*, 38, 226–231.

- Stępień M., Mercik S., Stępień W., 2002. Regeneracja gleb ubogich w próchnicę oraz bardzo kwaśnych i wyczerpanych z fosforu przy pomocy obornika. *Nawozy i nawożenie*, 4, 211–219.
- Szymańska M., Szara E., Łabętowicz J., 2009. Próba oszacowania przepływu fosforu w rolnictwie polskim w oparciu o model Schrödera, *Zesz. Probl. Post. Nauk Roln.*, 538, 291–297.
- Tiyapongpattana W., Pongsakul P., Shiowatana J., Nacapricha D., 2004. Sequential extraction of phosphorus in soil and sediment using a continuous-flow system, *Talanta*, 62, 765–771.
- Tyler G., Olsson T., 2001. Concentrations of 60 elements in soil solution as related to the soil acidity. *European Journal of Soil Science*, 52, 151–165.
- Ulen B., Djodjic F., Etana A., Johansson G., Lindstrom J., 2011. The need for an improved risk index for phosphorus losses to water from tile-drained agricultural land. *Journal of Hydrology*, 400, (1), 234–243.
- Uusitalo R., Tuhkannen H.R., 2000. Phosphorus saturation of Finnish soils evaluating an easy oxalate extraction method, *Agricultural and Food Science in Finland*, 9(1), 61–70.
- Watanabe F.S., Olsen S.R., 1965. Test of an ascorbic acid method for determining phosphorus in water and NaHCO_3 extracts from soil. *Soil Sci. Am. Proc.*, 29 (6), 677–678.
- Wójcik J., 1990. Starzenie się fosforanów nawozowych w różnych glebach. *Roczn. Glebozn.*, 41(1/2), 93–115.
- Wolska E., Wojcieszka U., 1986. Wpływ zróżnicowanego zaopatrzenia w azot na pobranie i rozmieszczenie N, P, K i Mg w roślinach owsa. *Pam. Puł.*, 87, 109–123.
- Yanai M., Uwasawa M., Shimizu Y., 2000. Development of a New Multinutrient Extraction Method for Macro- and Micro- Nutrients in Arable Land Soil. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 46 (2), 299–313.

Ocena przydatności testów chemicznych do opisu stanu fosforowego gleb uprawnych

Streszczenie

W pracy przedstawiono wyniki badań nad możliwością wykorzystania testów chemicznych do oceny stanu fosforowego gleb w zależności od szeregu ich właściwości oraz zróżnicowanego nawożenia mineralnego i organicznego.

Podstawę analiz stanowiły:

- gleba pochodząca z wieloletniego, statycznego doświadczenia polowego o znanej od 30 lat historii nawożenia,
- gleby z pól uprawnych rozległego terenu południowo-zachodniej Polski o zróżnicowanych właściwościach fizyczno-chemicznych,
- gleby z najbliższych okolic Wrocławia o dużej zmienności w zakresie zawartości fosforu,
- gleba z gospodarstwa rolnego, skrajnie wyczerpana z fosforu w wyniku wieloletniego gospodarowania z ujemnym bilansem tego składnika.

Wszystkie z wymienionych gleb oceniano pod kątem właściwości fizyczno-chemicznych i stanu fosforowego. Stan fosforowy oceniano testami statycznymi, oznaczając w nich całkowitą zawartość fosforu, zawartość fosforu rozpuszczalnego metodą Egnera-Riehma, Mehlicha-3 oraz stosowaną w Japonii metodą Yanai. Testami dynamicznymi określono stężenie fosforu aktywnego (test intensywności) oraz uwalnianie tego składnika do CaCl_2 na drodze wielokrotnej ekstrakcji. Wykonano również testy pojemności sorpcyjnej tych gleb względem fosforu. Na glebach pochodzących z doświadczenia polowego oraz na wyczerpanej z fosforu założono doświadczenia wegetacyjne prowadzone metodą mikropoletek i w wazonach w fitotronie i uprawiano rośliny. Analiza tych roślin stanowiła dodatkowy materiał badawczy. Wyniki potwierdziły, że na terenie Dolnego Śląska gleby uprawiane rolniczo były z reguły zasobne w formy fosforu przyswajalne dla roślin. Formy te oznaczone dwiema najczęściej stosowanymi metodami stanowiły około 15% całkowitej zawartości tego składnika. Wykazano jednak, że metody te, przydatne do oceny zawartości w glebie rozpuszczalnych fosforanów, nie są w stanie prognozować zdolności sorpcyjnych gleb w stosunku do tego składnika. Możliwość te dobrze określała jednak prosta w wykonaniu metoda Pagela, którą można zaproponować do oceny ilości fosforanów uwalnianych do roztworu glebowego oraz szacowania siły wiązania fosforanów wprowadzanych w nawozach. O ilości fosforu, którą gleby te mogły sorbować, decydowały ich skład granulome-

tryczny oraz zawartość węgla organicznego. Systematyczne stosowanie obornika przez 28 lat skutkowało wzbogaceniem gleby w fosfor przyswajalny dla roślin aż do głębokości 80 cm, chociaż najbardziej labilne formy występowały głównie w warstwie ornej i podornej. Badania wykazały, że te gleby, które nawożono obornikiem, a ograniczono wprowadzanie do nich azotu, charakteryzowały się najkorzystniejszym stanem fosforowym. Sorpcja tego pierwiastka zmieniała się w warunkach stosowania dużych ilości azotu i zwiększała się wraz z głębokością w glebie. W najgłębszych warstwach gleby była ponad czterokrotnie większa niż w poziomie próchnicznym.

Próby poprawy zasobności gleby w fosfor, wyczerpanej z tego składnika w wyniku wieloletniego na niej gospodarowania, z ujemnym jego bilansem wykazały, że jest to możliwe jedynie na drodze wprowadzania do gleby substancji organicznej i fosforanów. Nie uzyskano takich efektów ani w wyniku wapnowania, ani w wyniku odkwaszania preparatem PRP. Pozytywnych rezultatów w tym zakresie nie stwierdzono także, stosując preparaty reklamowane przez producentów jako poprawiające właściwości gleb i wspomagające wzrost roślin. W tak ekstremalnych warunkach niedoboru fosforu wyraźnie wskazano na przydatność do oceny zasobności gleb w ten składnik testu Yanai jako jednej z wielu ocenianych metod. Ilości fosforu pobranego przez rośliny nie zależały jedynie od zawartości jego form ruchomych w glebie, ale były również silnie powiązane z wielkością dawek nawożenia azotowego i rosły wraz z ich zwiększaniem. Okres 3-letnich badań wegetacyjnych okazał się zbyt krótki do wykazania przyjętymi metodami chemicznymi zmniejszenia się rezerw fosforu, nagromadzonego w glebach w wyniku wcześniejszego wieloletniego nawożenia. Nie stwierdzono obniżenia zasobności gleby w formy rozpuszczalne tego składnika oznaczone testem Egnera-Riehma ani zmniejszenia jego ruchliwości oznaczanej testem – P aktywnego.

Słowa kluczowe: stan fosforowy gleb, P-Egner-Riehm, P-Mehlich, P-Yanai, nawożenie obornikiem

Assessment of the usefulness of chemical tests for determining phosphorus status in soils

Summary

This paper presents the results of research into the possibility of using chemical tests to evaluate the level of phosphorus in soil with regard to the range of values and differences from mineral and organic fertilization.

The research was based on:

- soil taken from a long-standing, static experiment field that had a 30-year history of fertilization,
- soils from a large area of farmland in southwestern Poland with different physical and chemical properties,
- soils from surrounding areas in Wrocław with wide ranges in the level of phosphorus,
- soil from a farm which was highly depleted in phosphorus as a result of long-term agricultural use with a negative balance of this element.

All of the above soils were tested for physical and chemical properties and for the level of phosphorus. The phosphoric level was determined by static tests which measured the total phosphorus level, the content of soluble phosphorus with the Egner-Riehm method, the Mehlich-3 method, and the Yanai method used in Japan. Dynamic testing of the active phosphorus concentration was determined (intensity test) along with the release of this element to CaCl_2 by multiple extraction. Tests were also done on the sorption capacity of phosphorus in these soils. Vegetation experiments were done on soils from the experimental field and the phosphorus-depleted farm soil using the micro-plot method and plants cultivated in pots in a growth chamber. An analysis of these plants provided additional study material. The research showed that in the Lower Silesia region cultivated farm soils were generally rich in the forms of phosphorus available to plants. These bio-available forms, determined by the two most commonly applied methods, accounted for about 15% of the total phosphorus content. It was found, however, that the test methods useful for assessing the content of soluble phosphate in the soil were unable to predict the sorption capacity of the soil relative to the level of phosphorus. This indicates a good opportunity for the easily applied method described by Pagel, which can be used to evaluate the amount of phosphate released in the soil and the estimated strength of phosphorus added from fertilizers. The amount of phosphorus that could be absorbed by soil was dependent

on the grain size and organic carbon content. The systematic use of manure for 28 years resulted in enriching the soil in the forms of phosphorus available to plants to a depth of 80 cm, although the most labile forms were found mainly in the topsoil and subsoil layers. This research showed that soil which had been fertilized with manure – although limited as to the level of nitrogen – was found to have the most beneficial level of phosphorus. The sorption of phosphorus changed when large amounts of nitrogen were applied and also went up with increasing soil depth. The results for the deepest layer of soil were more than four times greater than at the humus level.

Efforts to improve phosphorus enrichment in the soil, depleted from years of farming and with a negative balance, were found to be successful only when organic matter and phosphorus had been applied. No positive effect was shown either from liming or from deacidifying with a PRP preparation. Positive results were also not obtained for preparations advertised by manufacturers for the improvement of soil properties and the promotion of plant growth. In cases of extreme phosphorus depletion, the Yanai test was clearly indicated above other methods for its usefulness in assessing the level of soil enrichment of this element. Phosphorus uptake by plants was not only dependent on the level of mobile forms in the soil, but was also strongly related to dose levels of nitrogen fertilizer, increasing with higher doses. The 3-year study period on vegetation was too short to determine an acceptable chemical method of decreasing the reserves of phosphorus accumulation in soils as a result of previous long-term fertilization. A decrease in the soluble forms of phosphorus in soil could not be verified with the Egner-Riehm test nor was a reduction in mobility confirmed by the $-P$ active test.

Key words: phosphorus status of soils, P-Egner-Riehm, P-Mehlich, P-Yanai, FYM