

Received: 14.12.2021 / Accepted: 01.02.2022

ARTYKUŁ ORYGINALNY

Przenikanie fosforu z różnego typu nawozów fosforowych w głąb profilu glebowego w aspekcie ryzyka zanieczyszczenia wód

Phosphorus leakage from various phosphorus sources in terms of the risk of water pollution

Ewa Stanisławska-Glubiak^{A*}, Jolanta Korzeniowska^B

Streszczenie

Przeprowadzono doświadczenie wazonowe z pszenicą jarą na glebie, której odczyn zróżnicowano węglanem wapnia na trzy poziomy pH. Na każdym poziomie pH testowano działanie czterech nawozów fosforowych różniących się formami zawartego w nich fosforu. W trakcie wegetacji trzykrotnie pobierano przesącze glebowe w celu określenia stężenia jonów fosforanowych w wodzie przesączonej przez glebę. Stwierdzono, że ilość fosforu przenikającego w głąb gleby z nawozów zależała od typu nawozu, odczynu gleby oraz czasu, jaki upłynął od aplikacji nawozu. Najwięcej fosforanów przedostawało się do przesączy glebowych z nawozów zawierających fosforany jedno- i dwuamionowe, a także orto- i polifosforany. W przypadku tego typu nawozów istnieje duże ryzyko zanieczyszczenia wód fosforem, w związku z czym ich dawki powinny być ustalane z dużą ostrożnością.

Słowa kluczowe: nawożenie fosforem, wypłukiwanie fosforu z gleby, jony fosforanowe, przesącze glebowe

Abstract

A pot experiment was carried out with spring wheat on soil, the pH of which was differentiated with calcium carbonate into three pH levels. At each pH level, the effects of four phosphorus fertilizers, which differed in the forms of phosphorus, were tested. During the vegetation period, soil filtrates were collected three times in order to determine the concentration of phosphate ions in the water filtered through the soil. It was found that the amount of phosphorus penetrating deep into the soil from fertilizers depended on the type of fertilizer, soil pH and the time that elapsed from the application of the fertilizer. The greatest amount of phosphates was found in soil filtrates from fertilizers containing mono- and diammonium phosphates, as well as ortho- and polyphosphates. For this type of fertilizers, there is a high risk of phosphorus contamination of waters, therefore their doses should be determined with great care.

Key words: phosphorus fertilization, phosphorus leaching from the soil, phosphate ions, soil filtrates

Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa – Państwowy Instytut Badawczy
Zakład Herbologii i Techniki Uprawy Roli
Orzechowa 61, 50-540 Wrocław
*corresponding author: e.glubiak@iung.wroclaw.pl
ORCID: ^A0000-0003-1852-6732, ^B0000-0003-3701-9576

Wstęp / Introduction

Eutrofizacja antropogeniczna, czyli proces nadmiernego wzbogacania zbiorników wodnych w składniki odżywcze w wyniku działalności człowieka zaliczany jest do najważniejszych zagrożeń jakości wód powierzchniowych i przybrzeżnych (Garske i wsp. 2020). Pierwiastki odżywcze po dostaniu się do zbiorników wodnych powodują przyspieszony wzrost glonów i innych form roślin, w wyniku którego następuje załamanie równowagi ekosystemu wodnego. W warunkach naturalnych eutrofizacja jest procesem powolnym, który może trwać setki, a nawet tysiące lat. Przekształcanie środowiska przez ludzi znacznie przyspieszyło ten proces, zagrażając zasobom wodnym. Szkodliwe skutki eutrofizacji obejmują zachwianie równowagi ekologicznej zbiorników wodnych, wymieranie gatunków tlenolubnych, zmniejszenie bioróżnorodności, degradację wody pitnej i przemysłowej oraz spadek jakości wodnych terenów rekreacyjnych. Duży niepokój budzi w ostatnich latach pogarszanie się jakości wody i niekorzystne zmiany w mikroflorze i faunie Morza Bałtyckiego (Igras i Pastuszak 2009).

Podstawowymi pierwiastkami powodującymi eutrofizację są azot i fosfor, które dostają się do wód wraz ze ściekami oraz odpływami z terenów rolniczych (Solovey 2008). Rola fosforu w eutrofizacji znacznie wzrosła w ciągu ostatniego półwiecza z powodu powszechnego stosowania fosforanów w detergentach i nawozach mineralnych. Obecnie przyjmuje się, że rolnictwo jest największym źródłem fosforu powodującym eutrofizację zbiorników wodnych (Dubrovsky i wsp. 2010; Sharpley i wsp. 2015). Nadmierne stosowanie nawozów zawierających fosfor dobrze rozpuszczalny w wodzie może bowiem powodować przekroczenie pojemności sorpcyjnej gleb względem tego pierwiastka, a w następstwie jego straty i przedostawanie się jonów fosforanowych do wód (Sapek 2014).

Hydrologiczne drogi przemieszczania się fosforu z pól uprawnych do wód są często bardzo złożone i przebiegają z udziałem wielu transferów powierzchniowych i podpowierzchniowych (Sharpley i wsp. 2015). Spływ powierzchniowy odgrywa dominującą rolę w utracie P, zwłaszcza na obszarach wyżynnych oraz zalewowych, niemniej przenikanie fosforu w głąb gleby jest również potencjalnym źródłem zanieczyszczenia wód (Hua i wsp. 2017). Coraz częstsze występowanie ulewnych deszczy nasila te zjawiska.

Racjonalne gospodarowanie nawozami fosforowymi jest niezmiernie trudnym zadaniem. Głównym problemem jest rozbieżność pomiędzy ilością fosforu gwarantującą wysokie plony, opłacalność produkcji roślinnej i bezpieczeństwo żywnościowe a ilością wymaganą dla ograniczenia transferu fosforu z gleby do wód (Kleinman i wsp. 2011). Rozwiązanie tego problemu stanowi jedno z wyzwań współczesnego rolnictwa. Niezbędne jest więc prowadzenie badań nad minimalizowaniem przenoszenia fosforu z ob-

szarów rolnych do wód, z uwzględnieniem zarówno nawozów naturalnych, jak i mineralnych (Bindraban i wsp. 2020; Liu i wsp. 2020).

Przy aktualnym deficycie obornika w naszym kraju, do nawożenia fosforem używa się przede wszystkim nawozów wieloskładnikowych oraz superfosfatów zawierających fosfor w formie łatwo rozpuszczalnej w wodzie (Pakuła i wsp. 2018). Nawozy wieloskładnikowe najczęściej zawierają w pełni rozpuszczalny fosfor w formie fosforanu amonu lub orto- i polifosforanów. Aktualnie produkowany, częściowo rozłożony, superfosfat wzbogacony zawiera fosfor w formie rozpuszczalnego fosforanu jednowapniowego i nierozpuszczalnego fosforanu trójwapniowego (Hoffmann i wsp. 2011). Rzadziej stosowana mączka fosforytowa zawiera nierozpuszczalne w wodzie fosforany wapnia, znacznie gorzej przyswajalne dla roślin, ale równocześnie stanowiące mniejsze zagrożenie dla środowiska wodnego (Stanisławska-Głubiak i wsp. 2012).

Celem badań było porównanie przenikania jonów fosforanowych do przesączy glebowych z czterech nawozów fosforowych zawierających różne formy fosforu. Celem dodatkowym było zbadanie wpływu tych nawozów na odczyn gleby, zawartość przyswajalnego fosforu w glebie oraz zawartość tego pierwiastka w roślinach i jego pobranie przez rośliny.

Materiały i metody / Materials and methods

Doświadczenia wazonowe

W roku 2021 przeprowadzono doświadczenie w hali wegetacyjnej zlokalizowanej w Jelczu-Laskowicach z wykorzystaniem wazonów typu Mitcherlicha o pojemności 10 kg gleby. Charakterystykę gleby doświadczalnej przedstawiono w tabeli 1.

Odczyn gleby doświadczalnej zróżnicowano na 3 poziomy pH, stosując dodatek węglanu wapnia w ilości 0, 10 i 20 g CaCO₃/wazon. Na każdym poziomie pH testowano 5 obiektów nawozowych w 4 powtórzeniach: kontrola (K), mączka fosforytowa (MF), superfosfat wzbogacony (SW), Polidap (Poli) i Yara Mila (Yara). Cztery nawozy fosforowe użyte w badaniach pochodziły od różnych producentów i różniły się formami zawartego w nich fosforu (tab. 2). Skład nawozów i ich rozpuszczalność podano w tabelach 3 i 4.

Badane nawozy zastosowano w ilości odpowiadającej dawce 1 g P/wazon (tab. 5). Na obiektach K, MF, SW i Poli uzupełniono azot w formie NH₄NO₃ oraz potas w formie KCl, w dawkach równoważnych zawartości tych składników w nawozie Yara. Dodatkowo na każdym obiekcie zastosowano magnez w formie MgSO₄ × 7 H₂O.

Rośliną testową była pszenica jara odmiany Harenda, którą wysiano 23.03.2021 r. w ilości po 27 ziaren na jeden wazon. Po przerywce pozostawiono po 17 roślin w wazo-

Tabela 1. Charakterystyka gleby doświadczalnej
Table 1. Characteristics of the experimental soil

Piasek – Sand 2,0–0,05	Pył – Silt 0,05–0,002	łł – Clay <0,002	C org [%]	pH w – in KCl	K	Mg	P
[%]							
73,34	18,27	2,39	0,75	5,3	125	70	241*

C org: węgiel organiczny – organic carbon, *Mehlich 3

Tabela 2. Badane nawozy fosforowe
Table 2. Tested phosphorus fertilizers

Nawóz – Fertilizer	Symbol	Producent – Producer	Forma fosforu – Phosphorus forms
Mączka fosforytowa – Rock dust	MF	fosforyt Maroko Morocco phosphate	nierozpuszczalne fosforany wapnia – insoluble calcium phosphates
Superfosfat wzbogacony – Enriched superphosphate Super FosDar 40	SW	Zakłady Fosforowe Gdańsk Sp. z o.o.	fosforany jednowapniowe i trójwapniowe – monocalcium and tricalcium phosphates
POLIDAP 18-46	Poli	Police SA	fosforany jednoamonowe i dwuamonowe – monoammonium and diammonium phosphates
Yara Mila 16-16-16	Yara	Yara	polifosforany i ortofosforany – polyphosphates and orthophosphates

Tabela 3. Skład badanych nawozów podawany przez producentów
Table 3. Composition of fertilizers according to the producers

Nawóz Fertilizer	N	Całkowity Total P ₂ O ₅ *	P ₂ O ₅ w – in cyt. am.**	P ₂ O ₅ w – in H ₂ O	K ₂ O	MgO	CaO	S-SO ₃
MF	–	13,4	1,5	0,05	–	0,3	40,2	–
SW	–	40,0	25,0	23,5	–	–	10,0	5,0
Poli	18,0	46,0	46,0	41,0	–	–	–	5,0
Yara	16,0	16,0	16,0	11,2	16,0	–	4,9	–

*fosfor rozpuszczalny w kwasach mineralnych – phosphorus soluble in mineral acids

**fosfor rozpuszczalny w cytrynianie amonu – phosphorus soluble in ammonium citrate

Tabela 4. Rozpuszczalność badanych nawozów (fosfor rozpuszczalny w cytrynianie amonu i w wodzie w stosunku do fosforu całkowitego)

Table 4. Solubility of the tested fertilizers (phosphorus soluble in ammonium citrate and in water in relation to total phosphorus)

Nawóz Fertilizer	W cytrynianie amonu	W – In H ₂ O
	In ammonium citrate	
[%]		
MF	11,2	0,4
SW	62,5	58,8
Poli	100	89,1
Yara	100	70,6

Tabela 5. Ilość składników pokarmowych dostarczona z nawozami
Table 5. The amount of nutrients provided with the fertilizers

Obiekt Treatment	P	N	K	Mg	Ca	S
	[g/wazon – g/pot]					
K	–	2,3	1,9	0,45	–	–
MF	1,0	2,3	1,9	0,03 + 0,45*	4,9	–
SW	1,0	2,3	1,9	0,45	0,4	0,12
Poli	1,0	0,9 + 1,4*	1,9	0,45	–	0,08
Yara	1,0	2,3	1,9	0,45	0,5	–

*ilość składnika w badanym nawozie + uzupełnienie – amount of the nutrient in the tested fertilizer + supplementation

nie. Zbiór pszenicy nastąpił 26.07.2021 r., w fazie pełnej dojrzałości.

W trakcie wegetacji trzykrotnie pobierano odcieki (prześcące glebowe) z każdego wazonu oddzielnie, w celu określenia stężenia jonów fosforanowych w wodzie przesączonej przez glebę. Odcieki w ilości 100 ml z wazonu pobierano

w odstępach miesięcznych, poczynając od 11.05.2021 r. Próbkę przesączy były pobierane po uprzednim zalaniu (dzień wcześniej wieczorem) każdego wazonu jednakową ilością wody destylowanej, symulującej intensywny opad deszczu.

Analizy chemiczne

Analizy chemiczne materiału glebowego i roślinnego wykonano w Głównym Laboratorium Chemicznym Instytutu Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa – Państwowego Instytutu Badawczego (IUNG – PIB) w Puławach, akredytowanym przez Polskie Centrum Akredytacji (certyfikat numer AB 339 na podstawie normy PN-EN ISO/IEC 17025) oraz w Zakładzie Gleboznawstwa Erozji i Ochrony Gruntów IUNG – PIB.

W glebie pobranej przed założeniem doświadczenia oznaczono skład granulometryczny metodą areometryczną (PN-R-04033:1998), pH – metodą potencjometryczną w roztworze KCl (ISO10390:2005), zawartość węgla organicznego (C_{org}) metodą Tiurina (PB 021 Wyd. IV 28.08.2020). Ponadto w glebie oznaczono zawartość przyswajalnego fosforu metodą Mehlich 3 (Kęsik i wsp. 2014), potasu metodą Egnera-Riehma (PN-R-04022:1996) oraz magnezu metodą Schachtschabela (PN-R-04020:1994).

W próbkach glebowych pobranych z każdego wazonu po zbiorze roślin oznaczono pH (ISO10390:2005) oraz zawartość fosforu metodą Mehlich 3. W średnich obiektowych próbkach roślinnych (ziarno i słoma), po ich uprzedniej mineralizacji na mokro kwasem azotowym, oznaczono zawartość fosforu metodą atomowej spektrometrii emisyjnej ze wzbudzeniem w plazmie indukowanej (ICP-OES).

Analizy chemiczne przesączów glebowych wykonano w Okręgowej Stacji Chemiczno-Rolniczej we Wrocławiu. W próbkach przesączów, pobranych z każdego wazonu, oznaczono zawartość jonów PO_4^{3-} . Metodyka oznaczenia (PN-EN ISO 15681-2) polegała na zadaniu próbek przesączu detergentem oraz kwaśnym roztworem zawierającym jony Mo i Sb. Otrzymany kompleks fosforo-antymonylo-

molibdenowy po zredukowaniu kwasem askorbinowym do błękitu molibdenowego oznaczono spektrofotometrycznie.

Obliczenia statystyczne

Plon ziarna i słomy, zawartość fosforu w glebie i roślinach oraz stężenie jonów fosforanowych w przesączach poddano analizie wariancji z wykorzystaniem testu Tukey HSD ($P < 0,05$), posługując się programem AWAR opracowanym w IUNG – PIB (Filipiak i Wilkos 1995).

Wyniki i dyskusja / Results and discussion

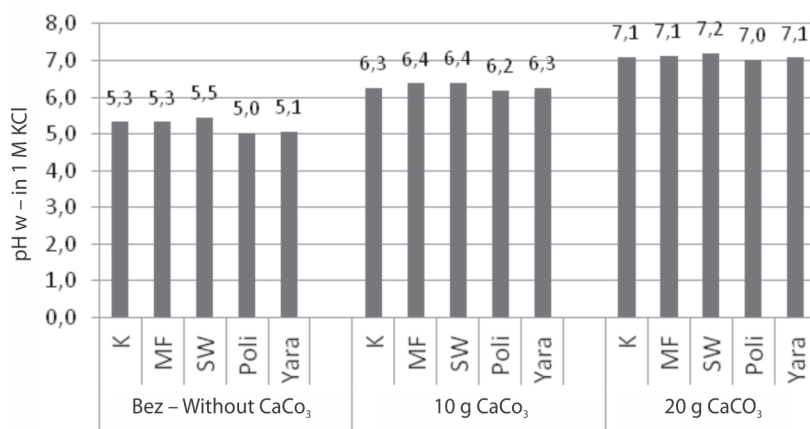
Odczyn gleby

Wyjściowe pH gleby wynosiło 5,3 (rys. 1). Po zbiorze roślin pH na obiektach bez Ca wynosiło 5,0–5,5 (odczyn kwaśny), na obiektach z 10 g $CaCO_3$ wahało się od 6,2 do 6,4 (odczyn lekko kwaśny), a na obiektach z najwyższą dawką Ca – od 7,0 do 7,2 (odczyn obojętny). Wykazano niewielką tendencję obniżenia się odczynu gleby po zastosowaniu Polidapu i Yary Mili na glebie bez aplikacji wapna.

Zawartość fosforu w glebie

Pomimo wprowadzenia do gleby identycznej ilości fosforu wraz ze wszystkimi badanymi nawozami (wyliczonej według P całkowitego), zawartość przyswajalnego P w glebie po zbiorze roślin znacznie różniła się w zależności od zastosowanego nawozu (rys. 2). Generalnie, bez względu na odczyn gleby, największą zawartość przyswajalnego P w glebie odnotowano na glebie nawożonej Polidapem i Yarą Miłą, następnie superfosfatem, a najmniejszą na glebie nawożonej mączką fosforytową.

Wpływ odczynu gleby ujawnił się głównie w działaniu mączki fosforytowej. Na glebie lekko kwaśnej (10 g $CaCO_3$) i obojętnej (20 g $CaCO_3$) zawartość P w glebie nawożonej mączką była taka sama jak na kontroli, a jedynie na glebie



Rys. 1. Odczyn gleby

Fig. 1. Soil pH

kwaśnej (bez CaCO_3) nawożenie mączką przynosiło dodatni efekt w postaci wzrostu zasobności gleby w przyswajalny fosfor.

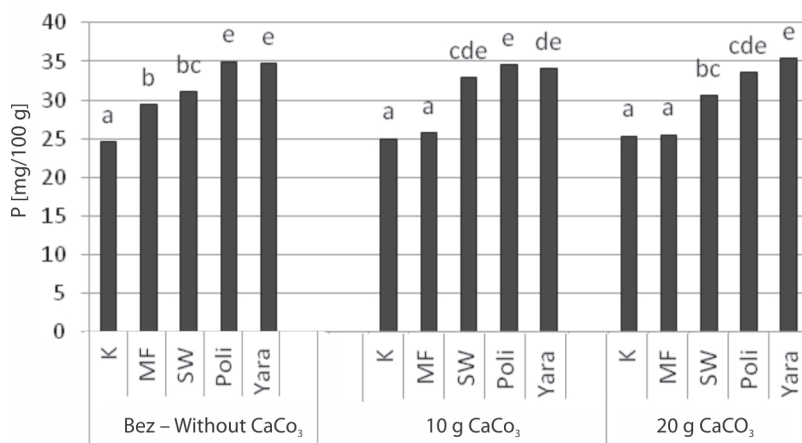
Zawartość fosforu w roślinie

Zawartość fosforu w ziarnie zmniejszała się wraz ze wzrostem pH gleby i na glebie o odczynie obojętnym była mniejsza niż na glebie kwaśnej i lekko kwaśnej (rys. 3). Ziarno pszenicy nawożonej mączką fosforytową charakteryzowało się mniejszą zawartością fosforu, niż pszenicy nawożonej trzema pozostałymi nawozami, przy czym efekt ten był bardziej widoczny na glebie kwaśnej i lekko kwaśnej niż na obojętnej. Pomiędzy ziarnem pszenicy nawożonej superfosfatem, Polidapem i Yarą Miłą nie stwierdzono istotnych różnic w zawartości fosforu.

Podobnie, jak w przypadku ziarna, zawartości fosforu w słomie pszenicy zmniejszały się wraz ze wzrostem pH gleby, przy czym na glebie kwaśnej były większe średnio o ponad 50% niż na glebie lekko kwaśnej i obojętnej (rys. 4). Na glebie kwaśnej i lekko kwaśnej słoma pszenicy zgromadziła mniej fosforu po nawożeniu mączką fosforytową, niż superfosfatem oraz Polidapem i Yarą Miłą. Równocześnie wystąpiła tendencja mniejszej zawartości fosforu w słomie nawożonej Yarą Miłą w porównaniu z Polidapem. Na glebie o odczynie obojętnym nie było różnicy między tymi nawozami.

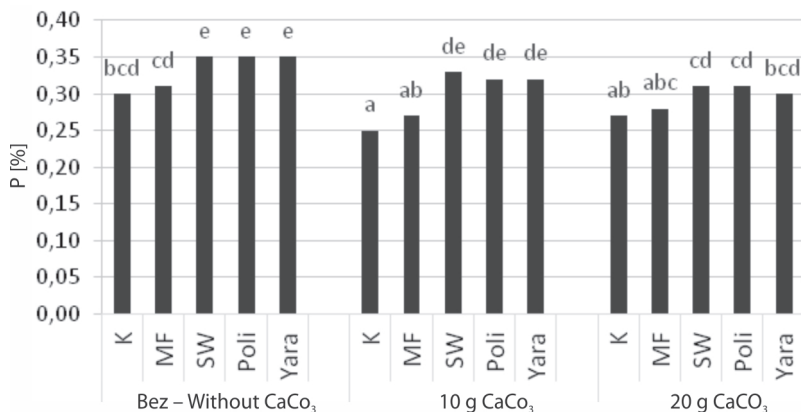
Pobranie fosforu przez rośliny

Całkowite pobranie P przez pszenicę było wyraźnie uzależnione od odczynu gleby (rys. 5). Rośliny pobrały znacznie więcej P z gleby kwaśnej niż z lekko kwaśnej i obojętnej.



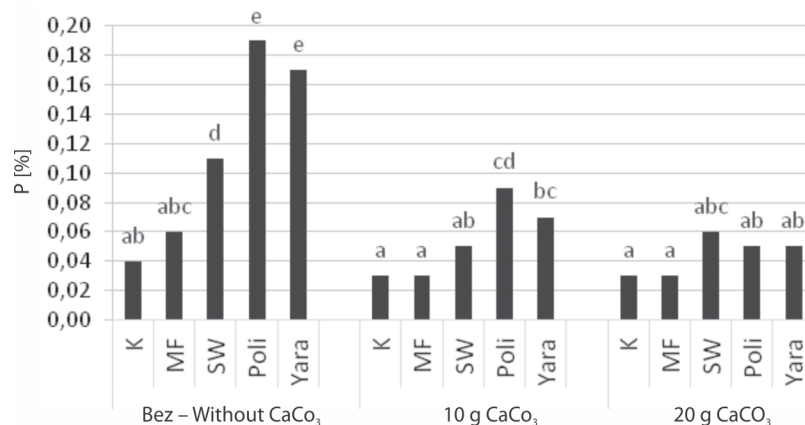
Rys. 2. Zawartość przyswajalnego fosforu w glebie oznaczonego metodą Mehlich 3. Słupki oznaczone tymi samymi literami nie różnią się od siebie istotnie według testu Tukeya HSD ($p < 0,05$)

Fig. 2. The concentration of phosphorus in the soil determined by the Mehlich 3 method. Bars marked with the same letters do not differ significantly according to the Tukey's HSD test ($p < 0.05$)



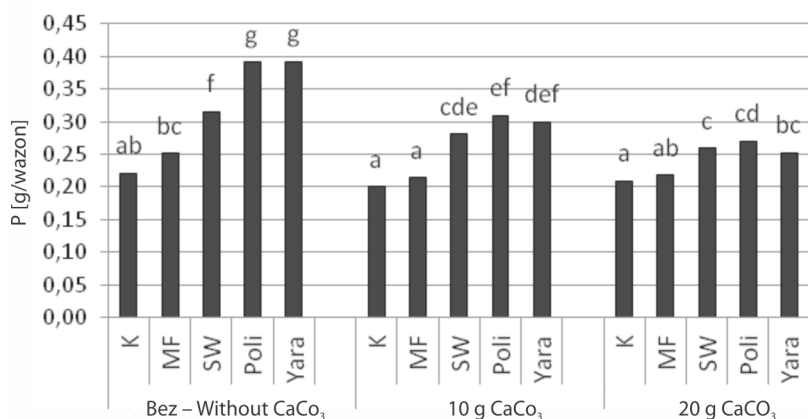
Rys. 3. Zawartość fosforu w ziarnie pszenicy. Słupki oznaczone tymi samymi literami nie różnią się od siebie istotnie w świetle testu Tukeya HSD ($p < 0,05$)

Fig. 3. The concentration of phosphorus in wheat grain. Bars marked with the same letters do not differ significantly according to the Tukey's HSD test ($p < 0.05$)



Rys. 4. Zawartość fosforu w słomie pszenicy. Słupki oznaczone tymi samymi literami nie różnią się istotnie w świetle testu Tukeya HSD ($p < 0,05$)

Fig. 4. The concentration of phosphorus in wheat straw. Bars marked with the same letters do not differ significantly according to the Tukey's HSD test ($p < 0.05$)



Rys. 5. Pobranie fosforu (ziarno + słoma). Słupki oznaczone tymi samymi literami nie różnią się istotnie w świetle testu Tukeya HSD ($p < 0,05$)

Fig. 5. Phosphorus uptake (grain + straw). Bars marked with the same letters do not differ significantly according to the Tukey's HSD test ($p < 0.05$)

Pobranie P na glebie kwaśnej było o 14–36% większe niż na obojętnej, niezależnie od rodzaju nawozu. Generalnie najmniejsze pobranie P przez rośliny pszenicy odnotowano w kontroli i glebie nawożonej mączką fosforytową, większe w glebie nawożonej superfosfatem i najwyższe w glebie nawożonej zarówno Yara Milą, jak i Polidapem. Różnice między tymi nawozami w pobraniu P przez rośliny były bardziej wyraźne na glebie kwaśnej, niż lekko kwaśnej i obojętnej. Wpływ odczynu zaznaczył się bardzo wyraźnie w przypadku stosowania mączki fosforytowej. Podobnie, jak w przypadku zawartości P w glebie, pobranie P przez rośliny po zastosowaniu mączki było istotnie większe w porównaniu z obiektem kontrolnym jedynie na glebie kwaśnej, podczas gdy na pozostałych dwóch glebach o wyższym pH nie odnotowano różnicy między tymi obiektami.

Zawartość jonów fosforanowych w przesączach glebowych

Zawartość jonów fosforanowych w przesączach glebowych, jaką stwierdzono w poszczególnych terminach ich poboru, podano dla każdego obiektu jako średnie wartości z 4 powtórzeń (tab. 6). W formie graficznej przedstawiono stężenia jonów fosforanowych w przesączach w zależności od rodzaju nawozu i odczynu gleby, jako średnie z 3 terminów poboru przesączy (rys. 6). Ponadto zaprezentowano stężenia jonów dla każdego nawozu i każdego terminu poboru próbek, jako średnie z 3 poziomów wapnowania (rys. 7).

Średnie stężenie jonów fosforanowych z 3 terminów poboru było uzależnione zarówno od rodzaju zastosowanego nawozu, jak i od dawki CaCO₃, czyli od odczynu gleby (rys. 6). Wartości tych stężeń wahały się w zakresie 0,6–3,2 mg PO₄³⁻/dm³. Stwierdzono, że najmniej fosforu, od

0,6 do 0,9 mg $\text{PO}_4^{3-}/\text{dm}^3$, wypłukiwało się z obiektu nawożonego mączką fosforytową, na równi z obiektem kontrolnym, przy czym wystąpiła tendencja większego wypłukiwania fosforu z mączki na glebie kwaśnej w porównaniu z glebą lekko kwaśną i obojętną.

W przesączach glebowych z obiektów, na których stosowano superfosfat wzbogacony, stężenie fosforanów było

większe w porównaniu z mączką fosforytową i mieściło się w zakresie 1,5–2,2 mg $\text{PO}_4^{3-}/\text{dm}^3$, przy czym różnica była tym bardziej widoczna im odczyn gleby przesuwiał się w kierunku zasadowego. Po zastosowaniu Polidapu i Yary Mili stężenie jonów fosforanowych było większe niż po aplikacji mączki fosforytowej i superfosfatu, i wynosiło 2,2–3,2 mg $\text{PO}_4^{3-}/\text{dm}^3$. Jednocześnie na glebie kwaśnej i lekko kwaśnej wystąpiła tendencja mniejszego stężenia fosforu po zastosowaniu Yary Mili niż Polidapu, a odwrotny efekt zaobserwowano na glebie o odczynie obojętnym.

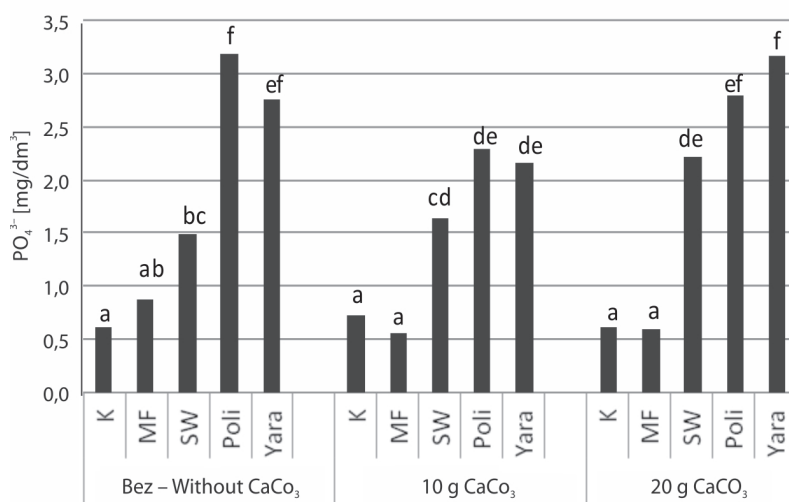
Stężenie fosforanów w przesączach zmieniało się w trakcie wegetacji i było odmienne w poszczególnych terminach ich poboru (rys. 7). Jedynie fosfor z mączki fosforytowej uwalniał się równomiernie w czasie całego okresu wegetacji, a stężenie jonów fosforanowych w przesączach było jednakowe w każdym z 3 badanych terminów. W przypadku pozostałych nawozów większość fosforu została uwolniona już w pierwszym terminie, czyli na początku wegetacji. Szczególnie dużym przenikaniem fosforu do roztworu glebowego w I terminie charakteryzowały się nawozy Polidap i Yara Mila. Stężenie jonów fosforanowych w przesączu pobranym w I terminie z obiektu nawożonego Polidapem było około 5-krotnie większe w porównaniu z II i III terminem. W przypadku Yary Mili było ono 4-krotnie większe, natomiast po zastosowaniu superfosfatu 2,5-krotnie większe.

Pobieranie fosforu z gleby przez rośliny jest determinowane rozpuszczalnością związków fosforowych, czyli powstawaniem tzw. form przyswajalnych. Proces ten zależy głównie od odczynu gleby i zawartości w niej związków wapnia, glinu i żelaza. Fosfor w glebie może wytrącać się w postaci amorficznych połączeń Fe–P i/lub Al–P w glebach kwaśnych oraz Ca–P w glebach zasadowych. Może to skutkować zmniejszeniem dostępności P dla roślin (Chien

Tabela 6. Zawartość jonów fosforanowych w przesączach glebowych

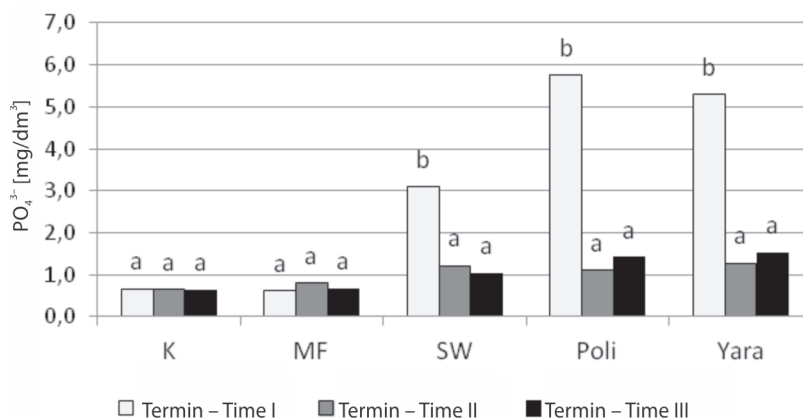
Table 6. Phosphate ion content in soil filtrates

Obiekt Treatment		Termin Time I	Termin Time II	Termin Time III
		PO_4^{3-} [mg/dm ³]		
Bez Without CaCO_3	K	0,47	0,84	0,59
	MF	0,62	1,48	0,60
	SW	2,43	1,31	0,75
	Poli	7,08	1,28	1,22
	Yara	5,18	1,73	1,32
10 g CaCO_3	K	0,77	0,66	0,73
	MF	0,52	0,49	0,75
	SW	2,92	0,98	1,22
	Poli	4,79	0,85	1,29
	Yara	3,79	1,13	1,62
20 g CaCO_3	K	0,76	0,42	0,72
	MF	0,74	0,42	0,61
	SW	3,95	1,37	1,44
	Poli	5,38	1,23	1,71
	Yara	6,91	0,98	1,82



Rys. 6. Zawartość jonów fosforanowych w przesączach glebowych – średnia z trzech terminów poboru. Słupki oznaczone tymi samymi literami nie różnią się istotnie w świetle testu Tukeya HSD ($p < 0,05$)

Fig. 6. Phosphate ion concentration in soil filtrates – average of the three filtrate collection times. Bars marked with the same letters do not differ significantly according to the Tukey's HSD test ($p < 0.05$)



Rys. 7. Zawartość jonów fosforanowych w przesączach glebowych w zależności od terminu poboru przesączy (średnie z poziomów wapnowania). Słupki oznaczone tymi samymi literami w ramach jednego rodzaju nawozu nie różnią się istotnie w świetle testu Tukeya HSD ($p < 0,05$)

Fig. 7. Concentration of phosphate ions in soil filtrates depending on the time of filtrate collection (average of liming levels). The bars marked with the same letters within one type of fertilizer do not differ significantly according to the Tukey's HSD test ($p < 0.05$)

i wsp. 2011). Według literatury największy stopień wiązania P w związki nierozpuszczalne występuje przy pH około 4,5 oraz 6,5 (Price 2006; Penn 2019). Penn (2019) podkreśla jednak, że dokładna wartość pH, przy której rozpuszczalność P, a tym samym jego dostępność dla roślin jest najlepsza, może się różnić między różnymi rodzajami gleb.

Wyniki przeprowadzonych badań potwierdzają doniesienia literaturowe o zróżnicowanej rozpuszczalności związków fosforu i jego dostępności dla roślin w zależności od odczynu gleby (Barrow 2017). Zarówno zawartość fosforu w roślinach, jak również jego całkowite pobranie z gleby przez pszenicę były największe na glebie kwaśnej przy pH 5,0–5,5 (bez dodatku CaCO_3), a najmniejsze na glebie obojętnej przy pH 7,0–7,2 (20 g CaCO_3), niezależnie od rodzaju zastosowanego nawozu fosforowego (rys. 3–5).

Ze stopniem rozpuszczalności związków fosforowych, wiązaniem P w glebie w formy niedostępne oraz pobraniem P przez rośliny wiąże się możliwość strat tego składnika z gleby. Uwolniony z nawozów fosfor, znajdujący się w roztworze glebowym w postaci jonów fosforanowych, niepoabrany przez rośliny i niezwiązany ponownie w związki nierozpuszczalne, może wraz z opadami migrować w głąb profilu glebowego. Stamtąd może przedostawać się do wód gruntowych, a następnie do powierzchniowych i powodować ich eutrofizację (Igras i Fotyma 2009; Lipiński 2009).

Jako graniczną wartość dla procesu eutrofizacji wód płynących przyjmuje się $0,25 \text{ mg P/dm}^3$, co w przeliczeniu na jony PO_4^{3-} wynosi $0,77 \text{ mg/dm}^3$ (Rozporządzenie 2002). W warunkach naturalnych zawartość składników mineralnych w wodach na każdym kolejnym etapie migracji ulega rozcieńczeniu. Dlatego też uzyskanych wyników w doświadczeniach wazonowych nie można odnosić do jakichkolwiek norm. Niemniej jednak wyniki te mogą służyć do porównania badanych obiektów nawozowych pod wzglę-

dem potencjalnego zagrożenia nadmiernym przenikaniem jonów fosforanowych do wód.

Przenikanie fosforu wprowadzonego do gleby wraz z nawozami w głąb profilu glebowego jest wypadkową rodzaju nawozu i rodzaju gleby, a głównie jej odczynu. Przeprowadzone badania wykazały jednak znacznie większy wpływ rodzaju nawozu niż odczynu gleby na stężenie jonów fosforanowych w przesączach glebowych. Niezależnie od pH gleby najwięcej fosforanów przedostawało się do roztworu glebowego, a dalej do przesączy, z nawozów Polidap i Yara Mila, następnie z superfosfatu wzbogaconego, a najmniej z mączki fosforytowej (tab. 6, rys. 6). Stężenie jonów fosforanowych w przesączach z obiektów nawożonych Polidapem i Yara Milą było około 5-krotnie, a nawożonych superfosfatem około 3-krotnie większe niż z obiektu kontrolnego. Stężenie jonów w przesączach z obiektu nawożonego mączką fosforytową było zdecydowanie najmniejsze, często porównywalne ze stężeniem na obiekcie kontrolnym. Większe ilości fosforanów w przesączach glebowych po nawożeniu superfosfatem niż mączką fosforytową autorzy zaobserwowali również we wcześniejszych badaniach (Stanisławska-Głubiak i wsp. 2012).

Z zawartością fosforanów w przesączach glebowych korespondowała zawartość fosforu w glebie oznaczona po zbiorze roślin (rys. 2). Podobnie, jak w przypadku stężenia jonów PO_4^{3-} , najbardziej w fosfor wzbogacały glebę nawozy Polidap i Yara Mila, następnie superfosfat, a najmniej mączka fosforytowa.

Nie tylko rodzaj nawozu, ale również odczyn gleby miał wpływ na ilość fosforu przenikającego do przesączy glebowego. W przypadku mączki fosforytowej największe stężenie jonów fosforanowych stwierdzono w przesączach z gleby kwaśnej przy pH 5,0–5,5 (rys. 6). Obiekt nawożony superfosfatem wzbogaconym, przeciwnie do obiektu

z mączką fosforytową, charakteryzował się wzrostem stężenia fosforanów w przesączach wraz ze wzrostem pH gleby. W przypadku nawozów Polimag i Yara Mila odnotowano natomiast znacznie mniejsze stężenie jonów fosforanowych w przesączach z gleby lekko kwaśnej (pH 6,2–6,4), niż z gleby kwaśnej (5,0–5,5) i obojętnej (7,0–7,2).

Na ilość fosforu przedostającego się w głąb gleby, poza rodzajem nawozu i odczynem gleby, miał również wpływ czas, jaki upłynął od aplikacji nawozu. W przeprowadzonych badaniach udowodniono, że przenikanie fosforanów do przesiąkającej przez profil glebowy wody w okresie wegetacji roślin zachodziło nierównomiernie (rys. 7). Podobny efekt odnotowano w badaniach Stanisławskiej-Głubiak i wsp. (2015). Zawartość jonów fosforanowych w przesączach, jaką stwierdzono w kolejnych terminach ich poboru, świadczy o dynamice uwalniania fosforu z poszczególnych nawozów do roztworu glebowego. Szybkie tempo przechodzenia tego składnika do roztworu glebowego z nawozów Polidap i Yara Mila, powodowało że nie został on pobrany w dużej ilości przez młode rośliny pszenicy w początkowym okresie wegetacji, co skutkowało dużym wzrostem stężenia jonów fosforanowych w przesiąkającej przez glebę wodzie. Sugeruje to możliwość niepotrzebnych strat fosforu z tego rodzaju nawozów w przypadku zastosowania zbyt dużej ich dawki. Rozpuszczanie związków fosforu z mączki fosforytowej zachodziło natomiast w powolnym i równomiernym tempie, a superfosfat wzbogacony powodował efekt pośredni między mączką fosforytową a nawozami Polidap i Yara Mila.

Wnioski / Conclusions

1. Stwierdzone różnice w zawartości przyswajalnego fosforu w glebie po zbiorze roślin, a także w całkowitym pobraniu tego pierwiastka przez rośliny, świadczą o różnej rozpuszczalności związków fosforu w badanych nawozach. Zróżnicowana rozpuszczalność miała wpływ nie tylko na wzrost i rozwój roślin, ale również na przenikanie fosforu w głąb gleby.

tym pobraniu tego pierwiastka przez rośliny, świadczą o różnej rozpuszczalności związków fosforu w badanych nawozach. Zróżnicowana rozpuszczalność miała wpływ nie tylko na wzrost i rozwój roślin, ale również na przenikanie fosforu w głąb gleby.

2. Ilość fosforu przenikającego w głąb gleby z nawozów fosforowych zależała od typu nawozu, odczynu gleby oraz czasu, jaki upłynął od ich aplikacji. Niezależnie od pH gleby najwięcej fosforanów przedostawało się do roztworu glebowego z nawozów Polidap i Yara Mila, następnie z superfosfatu wzbogaconego, a najmniej z mączki fosforytowej.
3. Nawozy zawierające fosforany jedno- i dwuamonowe (Polidap), a także orto- i polifosforany (Yara Mila), charakteryzowały się szybkim tempem uwalniania fosforu do roztworu glebowego i przenikania jonów fosforanowych w głąb gleby. Większość tego pierwiastka została uwolniona bezpośrednio po ich aplikacji.
4. Łatwe i szybkie uwalnianie fosforu z nawozów zawierających fosforany jedno- i dwuamonowe oraz orto- i polifosforany stanowi ryzyko zanieczyszczenia wód fosforem. Nawozy tego typu bezwzględnie powinny być stosowane w dawkach zbilansowanych według potrzeb pokarmowych rośliny uprawnej i aktualnej zasobności gleby.
5. Mączka fosforytowa jest źródłem fosforu uwalnianego w powolnym i równomiernym tempie, co wprawdzie nie stanowi zagrożenia dla środowiska wodnego, ale może nie zaspokoić potrzeb pokarmowych roślin w roku ich uprawy. Najlepszą efektywność nawozową mączki można uzyskać na glebie kwaśnej.

Literatura / References

- Barrow N.J. 2017. The effects of pH on phosphate uptake from the soil. *Plant and Soil* 410 (1–2): 401–410. DOI: 10.1007/s11104-016-3008-9
- Bindraban P.S., Dimkpa C.O., Pandey R. 2020. Exploring phosphorus fertilizers and fertilization strategies for improved human and environmental health. *Biology and Fertility of Soils* 56 (3): 299–317. DOI: 10.1007/s00374-019-01430-2
- Chien S.H., Prochnow L.I., Tu S., Snyder C.S. 2011. Agronomic and environmental aspects of phosphate fertilizers varying in source and solubility: An update review. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 89 (2): 229–255. DOI: 10.1007/s10705-010-9390-4
- Dubrovsky N.M., Burow K.R., Clark G.M., Gronberg J.M., Hamilton P.A., Hitt K.J., Mueller D.K., Munn M.D., Nolan B.T., Puckett L.J., Rupert M.G., Short T.M., Spahr N.E., Sprague L.A., Wilber W.G. 2010. The quality of our Nation's waters – Nutrients in the Nation's streams and groundwater, 1992–2004. U.S. Geological Survey Circular 1350 (2): 174. DOI: 10.3133/cir1350
- Filipiak K., Wilkos S. 1995. Obliczenia statystyczne. Opis systemu AWAR. Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa, Puławy, R (324): 35–36.
- Garske B., Stubenrauch J., Ekardt F. 2020. Sustainable phosphorus management in European agricultural and environmental law. *Review of European, Comparative & International Environmental Law* 29 (1): 107–117. DOI: 10.1111/reel.12318
- Hoffmann K., Skut J., Rybarski S., Hoffmann J. 2011. Badania nad częściowym rozkładem fosforytu (metodą PAPR) z zastosowaniem kwasu siarkowego i fosforowego. *Proceedings of ECOpole 5* (2): 531–536.
- Hua L., Liu J., Zhai L., Xi B., Zhang F., Wang H., Liu H., Chen A., Fu B. 2017. Risks of phosphorus runoff losses from five Chinese paddy soils under conventional management practices. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 245: 112–123. DOI: 10.1016/j.agee.2017.05.015

- Igras J., Fotyma M. 2009. Wykorzystanie i straty polowe fosforu z polowej produkcji roślinnej. Udział polskiego rolnictwa w emisji związków azotu i fosforu do Bałtyku. [Contribution of Polish agriculture to emission of nitrogen and phosphorus compounds to the Baltic Sea]. Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa – Państwowy Instytut Badawczy, Puławy: 163–198.
- Igras J., Pastuszek M. (red.) 2009. Udział polskiego rolnictwa w emisji związków azotu i fosforu do Bałtyku. Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa – Państwowy Instytut Badawczy, Puławy, 416 ss.
- ISO 10390:2005. 2005. Soil quality – Determination of pH. International Standardization Organization, Geneva, Switzerland, 7 ss.
- Kęsik K., Lipiński W., Jadczyzsyn T., Boreczek B., Janda B., Sumorek-Gołąbek A., Kocoń A., Ochal P., Piękała D., Bochniarz A. 2014. Liczby graniczne oraz procedura badawcza oznaczania metodą Mehlich 3 ruchomych form fosforu, potasu i magnezu w glebach mineralnych. Instrukcja wdrożeniowa nr 230. Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa – Państwowy Instytut Badawczy, Puławy, 26 ss.
- Kleinman P.J.A., Sharpley A.N., McDowell R.W., Flaten D.N., Buda A.R., Tao L., Bergstrom L., Zhu Q. 2011. Managing agricultural phosphorus for water quality protection: principles for progress. *Plant and Soil* 349 (1): 169–182. DOI: 10.1007/s11104-011-0832-9
- Lipiński W. 2009. Stan i znaczenie wodnej infrastruktury technicznej na obszarach wiejskich. Udział polskiego rolnictwa w emisji związków azotu i fosforu do Bałtyku. [Contribution of Polish agriculture to emission of nitrogen and phosphorus compounds to the Baltic Sea]. Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa – Państwowy Instytut Badawczy, Puławy: 233–252.
- Liu W., Ciais P., Liu X., Yang H., Hoekstra A.Y., Tang Q., Wang X., Li X., Cheng L. 2020. Global phosphorus losses from croplands under future precipitation scenarios. *Environmental Science & Technology* 54 (22): 14761–14771. DOI: 10.1021/acs.est.0c03978
- Pakuła K., Kuziemska B., Becher M., Kiepuszewska A. 2018. Analiza logistyki zaopatrzenia indywidualnych gospodarstw rolnych w nawozy mineralne. [Analysis of supply logistics of private agricultural farms in the artificial fertilizers]. *Roczniki Naukowe Stowarzyszenia Ekonomistów Rolnictwa i Agrobiznesu* 20 (3): 120–124. DOI: 10.5604/01.3001.0012.1505
- PB 021 Wyd. IV 28.08.2020. Oznaczanie węgla organicznego. Procedura badawcza Głównego Laboratorium Analiz Chemicznych. Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa – Państwowy Instytut Badawczy, Puławy.
- Penn C.J., Camberato J.J. 2019. A critical review on soil chemical processes that control how soil pH affects phosphorus availability to plants. *Agriculture* 9 (6): 120. DOI: 10.3390/agriculture9060120
- PN-EN ISO 15681-2:2019-02. Water quality – Determination of orthophosphate and total phosphorus by flow analysis (FIA and CFA) - Part 2: Continuous flow analysis method (CFA). Polish Committee for Standardization, Warsaw.
- PN-R-04020:1994. 1994. Agrochemical soil analyse: Determination of available magnesium content in mineral soils. Polish Committee for Standardization, Warsaw.
- PN-R-04022:1996. 1996. Agrochemical soil analyse: Determination of available potassium content in mineral soils. Polish Committee for Standardization, Warsaw.
- PN-R-04033:1998. 1998. Soil and mineral soil materials: Particle size distribution on soil classes. Polish Committee for Standardization, Warsaw.
- Price G. (red.) 2006. Australian Soil Fertility Manual, third edition. Fertilizer Industry Federation of Australia Inc. and CSIRO Publishing, Collingwood, Victoria, 168 ss.
- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 23 grudnia 2002 r. w sprawie kryteriów wyznaczania wód wrażliwych na zanieczyszczenie związkami azotu ze źródeł rolniczych. Dz.U. z 2002 r., nr 241, poz. 2093.
- Sapek B. 2014. Nagromadzenie i uwalnianie fosforu w glebach – źródła, procesy, przyczyny. [Soil phosphorus accumulation and release – sources, processes, causes]. *Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie/Water-Environment-Rural Areas* 14 (1) (45): 77–100.
- Sharpley A.N., Bergström L., Aronsson H., Bechmann M., Bolster C.H., Börling K., Djodjic F., Jarvie H.P., Schoumans O.F., Stamm C., Tonderski K.S., Ulen B., Uusitalo R., Withers P.J. 2015. Future agriculture with minimized phosphorus losses to waters: Research needs and direction. *Ambio* 44 (2): 163–179. DOI: 10.1007/s13280-014-0612-x
- Solovey T. 2008. Ocena potencjalnej eutrofizacji wód płynących w zlewni środkowej Wisły. [Evaluation of potential eutrophication in running waters of the central vistula catchment basin]. *Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie/Water-Environment-Rural Areas* 8 (1) (22): 323–336.
- Stanisławska-Głubiak E., Korzeniowska J., Hoffmann J., Górecka H. 2015. Porównanie pylistej i granulowanej postaci nawozu fosforowo-siarkowego wytworzonego na bazie mielonego fosforytu w aspekcie wpływu na środowisko. [Comparison of powder and granular forms of phosphorus-sulphur fertilizers prepared on the base of ground phosphate rock in terms on the environment impact]. *Przemysł Chemiczny* 94 (3): 408–411. DOI: 10.15199/62.2015.3.31
- Stanisławska-Głubiak E., Korzeniowska J., Hoffmann J., Kantek K. 2012. Zwiększenie efektywności surowców fosforytowych poprzez dodatek siarki. Cz. 2. Wpływ nawozów fosforytowo-siarkowych na środowisko. [Increasing efficiency of phosphate rock by sulfur addition. Pt. 2. The impact of phosphate-sulfur fertilizers on the environment]. *Przemysł Chemiczny* 91 (5): 1000–1005.