

Beata Jurga, Alicja Filipek

*Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa – Państwowy Instytut Badawczy
w Puławach*

WPLYW WYBRANYCH PRAKTYK ROLNICZYCH NA DOSTĘPNOŚĆ FOSFORU DLA ROŚLIN – PRZEGLĄD PIŚMIENNICTWA*

Słowa kluczowe: dostępność fosforu, fosfor dostępny, bakterie fosforowe

Wstęp

Fosfor (P) jako pierwiastek biogeny jest niezbędny do prawidłowego wzrostu i plonowania roślin. Funkcje fizjologiczne fosforu są szeroko rozpoznane i dokładnie opisane w literaturze. Fosfor nie tylko buduje nić DNA i stanowi niezbędny składnik szeregu związków organicznych i wielu enzymów, ale jest również składnikiem cząsteczek ADP lub ATP, które są głównym przenośnikiem i akumulatorem energii w procesach biochemicznych. Ponadto fosfor, jako czynnik warunkujący ilość i jakość plonów, stanowi obok azotu główny składnik wnoszony na pola z nawozami mineralnymi i naturalnymi. W Polsce ok. 41% gleb charakteryzuje się wysoką i bardzo wysoką zawartością fosforu przy 33% gleb o zawartości niskiej i bardzo niskiej (10). O naturalnej zasobności gleby w fosfor w głównej mierze stanowi zawartość tego składnika w skale macierzystej, z której gleba została wytworzona. Istnieje duże zróżnicowanie form fosforu, wśród najczęściej występujących możemy wskazać: mineralne i organiczne związki P w roztworze glebowym, trudno-rozpuszczalne formy z żelazem, glinem czy wapniem, słabo związane z fazą stałą gleby, związane przez minerały ilaste i związki próchnicze oraz nierozpuszczalne związki organiczne jak próchnica glebowa czy biomasa glebowa (22, 19). Tylko niewielki ułamek (2-10%) glebowej puli fosforu jest dostępny dla roślin ($P_{dost.}$), z czego zaledwie 1% jest łatwo przyswajalny (6), co wynika z faktu, że rośliny mogą przyswajać fosfor wyłącznie w dwóch formach: $H_2PO_4^-$ (głównie) oraz HPO_4^{2-} . Resztę, poprzez odpowiednią agrotechnikę, należy właściwie zagospodarować.

Fosfor wnoszony jest do gleby jako nawóz mineralny, organiczny lub resztki roślinne. Według danych GUS (dane wstępne) w sezonie rolniczym 2015/2016 zużyto

* Opracowanie wykonano w ramach zadania 1.6 w programie wieloletnim IUNG-PIB.

łącznie 328,3 tys. ton nawozów fosforowych w przeliczeniu na czysty składnik (8). Najczęściej stosowane i najłatwiej dostępne nawozy fosforowe to:

- superfosfat pojedynczy (prosty) pylisty - otrzymuje się go poprzez traktowanie fosforytów i apatytów kwasem siarkowym. W nawozie jest ok. 18% fosforu w postaci P_2O_5 , oraz 10% siarki i 20% wapnia;
- superfosfat potrójny granulowany – nawóz ten występuje w postaci granulek i zawiera 46% P_2O_5 . Stosuje się go bezpośrednio przed siewem lub sadzeniem roślin, aby zawarty w nim łatwo rozpuszczalny w wodzie fosfor mógł być w krótkim czasie pobrany przez rośliny;
- mączka fosforytowa - jest to drobno zmielona skała fosforytowa. Zawiera ona 29% fosforu w postaci P_2O_5 . Pod działaniem kwasów zawartych w glebie przechodzi w formę łatwiej przyswajalną dla roślin, z tego względu lepiej stosować ją na glebach o odczynie lekko kwaśnym lub zbliżonych do obojętnego (22).

Naturalne nawozy, takie jak obornik i gnojowica, są łatwo dostępnym źródłem tego pierwiastka dla roślin, gdyż 50-70% całkowitego fosforu ($P_{\text{całk.}}$) występuje w nich w formie dostępnych fosforanów wapnia. Aby umożliwić rolnikom ocenę stanu zawartości P w glebie, stosuje się klasy zasobności dla konkretnej metody jego oznaczania. Poniżej w tabeli 1 przedstawiono klasy zasobności przyswajalnego fosforu w glebie oznaczonego metodą Egnera-Riehma. W różnych krajach stosuje się różne metody oceny stanu zasobności gleb w fosfor, o czym wyczerpująco pisał F o t y m a i in. (5).

Tabela 1

Klasy zasobności przyswajalnego fosforu w glebie (wg metody Egnera-Riehma)

Klasa zasobności	Zawartość fosforu w mg $P_2O_5 \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ gleby
Bardzo niska	<5,0
Niska	5,1-10,0
Średnia	10,1-15,0
Wysoka	15,1-20,0
Bardzo wysoka	>20,0

Źródło: Zalecenia Nawozowe, 1985 (30)

Celem opracowania jest omówienie wpływu różnych, powszechnie stosowanych, praktyk agrotechnicznych na dostępność fosforu dla roślin.

Odczyn gleby

Odczyn gleby jest kluczową cechą gleby decydującą o dostępności fosforu dla roślin. W zależności od pH gleby w roztworze dominują różne związki fosforu nieorganicznego:

- pH poniżej 4,0 – kwas ortofosforowy H_3PO_4 ;
- pH 4,0–8,0 – jon $H_2PO_4^-$;
- pH powyżej 8,0 – jon HPO_4^{2-} (28).

W glebach o odczynie obojętnym i zasadowym, które wysyczone są kationami II- i III- wartościowymi oraz w glebach zawierających związki wapnia w roztworze, jednozasadowy fosforan wapnia przechodzi w fosforan dwu- i trójzasadowy (15). W glebach kwaśnych, o odczynie poniżej pH 5,5, wodorotlenki glinu i żelaza reagują z kwasem fosforowym tworząc nierozpuszczalne w wodzie i niedostępne dla roślin fosforany żelaza i glinu. Dodatkowo degradację zastosowanego nawozu powodują procesy wiązania P na powierzchni koloidów glebowych. Zdaniem S z c z e p a n i a k a (28) najlepszy zakres pH dla pobierania fosforu przez rośliny to pH 5,6-7,2. K r e i ś m a n e i i n . (14) zawęża ten przedział do pH 6-7, za optymalną podając wartość pH ok 6,5.

Tabela 2

Dostępność fosforu dla roślin w zależności od odczynu gleby (9)

Odczyn	Dostępność fosforu
pH 6,0	52%
pH 5,5	48%
pH 5,0	34%

Źródło: Hargreaves, 2015 (9)

Nieuregulowany odczyn gleby powoduje, że rośliny nie są w stanie zasymilować składników dostarczonych w nawozach i innych źródłach, np. produktach ubocznych. W glebie o niskim pH fosfor zostaje silnie związany z cząsteczkami gleby i razem z nimi może być wyniesiony na drodze spływu powierzchniowego do wód. W wyniku takich procesów jak: erozja wietrzna, erozja powierzchniowa i wymywanie w głąb profilu glebowego, składniki, wniesione pierwotnie w celu odżywienia roślin zostają bezpowrotnie stracone z cyklu produkcji rolniczej i zostają rozproszone do środowiska wodnego (bepośrednio lub pośrednio).

W świetle powyżej przedstawionych informacji oczywistym jest, że uregulowanie odczynu gleby jest zabiegiem optymalizującym dostępność P dla roślin i zmniejszającym poziom strat fosforu do wód. Skuteczność takich działań została potwierdzona w wielu badaniach. Wapnowanie „środowiskowe” z powodzeniem stosowane jest w krajach takich jak Szwecja czy Finlandia, gdzie w wyniku tego zabiegu zaobserwowano poprawienie struktury gleby i związane z nim zwiększenie penetracji gleby przez korzenie, znaczące usprawnienie pobrania składników przez rośliny i ograniczenie zmywu powierzchniowego (21). Ustalono również, że wapnowanie pozwalało na uzyskiwanie zadowalających plonów na glebach kwaśnych przy stosowaniu obniżonych dawek fosforu. Zwiększona efektywność wykorzystania składnika jak również samo ograniczenie ilości fosforu wnoszonego do gleby bezpośrednio zmniejsza ryzyko przedostania się szkodliwych ilości fosforu do wód.

Wg danych GUS-u (8), 39% polskich gleb wykazuje kwaśny lub bardzo kwaśny odczyn (pH<5,5) i powinna zostać poddana wapnowaniu (Tab. 3). Dla porównania, w sezonie wegetacyjnym 2015/2016 zużyto, wg wstępnych szacunków, 1006,2 tys. ton nawozów wapniowych. Warto zaznaczyć, że jest to ponad 70% wzrost w stosunku do lat 2006-2015 (8).

Tabela 3

Struktura odczynu gleb w latach 2012-2015.

Województwa	Liczba próbek	Przebadana powierzchnia w tys. ha	Odczyn gleby w %				
			bardzo kwaśny pH \leq 4,5	kwaśny pH 4,6-5,5	lekko kwaśny pH 5,6-6,5	obojętny pH 6,6-7,2	zasadowy pH $>$ 7,2
POLSKA	1565893	3861,9	13	26	34	18	9
Dolnośląskie	135264	414,8	8	23	42	19	8
Kujawsko-pomorskie	149358	384,5	7	19	31	26	17
Lubelskie	109160	94,5	17	26	26	15	16
Lubuskie	45029	139,3	9	28	41	15	7
Łódzkie	80671	135,2	24	33	27	11	5
Małopolskie	30268	35,1	23	27	23	14	13
Mazowieckie	108519	209,5	23	32	27	13	5
Opolskie	105268	235,8	3	15	54	24	4
Podkarpackie	56632	87,0	26	33	23	12	6
Podlaskie	46882	98,0	19	36	27	13	5
Pomorskie	117646	330,9	11	33	33	17	6
Śląskie	43350	222,5	13	23	41	19	4
Świętokrzyskie	30966	39,4	17	22	23	21	17
Warmińsko-mazurskie	148031	409,5	11	29	33	21	6
Wielkopolskie	217482	590,0	10	23	36	19	12
Zachodniopomorskie	141367	436,0	9	27	37	17	10

Źródło: GUS (8)

Nawożenie organiczne

Gleba jest układem składającym się z powiązanych ze sobą elementów: części mineralnej, organicznej, wody oraz powietrza glebowego. Materia organiczna stanowi zaledwie kilka procent gleby, ale to ona w dużym stopniu warunkuje uzyskanie zadowalającego plonu uprawianej rośliny. Materia organiczna gleby składa się z humusu (85%), resztek roślinnych (10%) oraz organizmów żywych (5%) czyli grzybów, bakterii, dżdżownic, makro-, mezo- i mikrofauny. Próchnica (humus) jest elementem budującym strukturę gleby, zwiększa zdolności buforowe, reguluje i stabilizuje odczyn gleby. Związki próchniczne mogą zmagazynować od 4 do 12 razy więcej składników pokarmowych niż część mineralna gleby i zatrzymać nawet 5-krotnie więcej wody niż same ważą (13).

W systemach bezinwentarzowych bardzo często mamy do czynienia z uproszczeniami płodozmianu i pozbywaniem się resztek poźniwnych, co skutkuje niewystarczającą ilością nawozów organicznych (np. obornika). Zabiegi te wpływają na zubożenie zawartości próchnicy oraz spadek aktywności biologicznej gleby. W następstwie takich praktyk mogą pojawić się trudności z dostępnością składników pokarmowych oraz wody, czego konsekwencją może być utrata plonu i spadek jego jakości.

Jak wcześniej wspomniano, w skład próchnicy wchodzi różne związki organiczne o rozmaitych właściwościach chemicznych, fizycznych i mikrobiologicznych, jednak głównym składnikiem próchnicy są kwasy humusowe. To właśnie one wywierają znaczący wpływ na utrzymanie optymalnej dostępności fosforu w glebie. Kwasy humusowe mają silne właściwości chelatujące. Neutralizują toksyczny mangan, żelazo i glin, dzięki czemu fosfor nie wytrąca się w postaci nierozpuszczalnych związków. Ponadto, kwasy humusowe mają zdolność do tworzenia związków kompleksowych z wapniem, przez co jony wapniowe nie powodują strącania fosforanów w postaci niedostępnych dla roślin fosforanów trójwapniowych. Nawozy naturalne (szczególnie te z dużą zawartością fosforu, jak np. obornik świński i drobiowy), są więc zarówno źródłem fosforu w glebie, jak również, poprzez wzbogacanie gleby w materię organiczną, efektywnym czynnikiem jego uruchamiania (29).

Kwasy humusowe odgrywają znaczącą rolę w zapewnieniu wysokiej dostępności fosforu, zabezpieczają go przed uwstecznieniem oraz utrzymują wysoką aktywność mikrobiologiczną gleby. Przyjmuje się, że w glebach uprawnych średnia zawartość fosforu organicznego wynosi 25-50% ogólnej zawartości składnika (22). W glebach bogatych w materię organiczną, biologiczne wiązanie przyswajalnych związków fosforu może być znaczące i spełniać pozytywną rolę poprzez uniemożliwianie powstawania nierozpuszczalnych form fosforu.

Jak powszechnie wiadomo, fosfor jest jednym z najważniejszych pierwiastków w początkowej fazie rozwojowej każdej rośliny. W warunkach glebowo-klimatycznych Polski wiosną, ze względu na niższe temperatury (poniżej 12°C) i niedobory wilgoci, stosunkowo często mamy do czynienia ze spadkiem dostępności P oraz niedoborami tego minerału. Należy zatem dołożyć wszelkich starań by zapewnić optymalny poziom materii organicznej w glebie, tak aby wyeliminować przynajmniej ten czynnik ograniczania dostępności P dla roślin.

Nawożenie mineralne

Właściwe odżywienie roślin uprawnych fosforem wpływa korzystnie na ich stan fizjologiczny, m.in. na rozwój bryły korzeniowej oraz na pobieranie składników pokarmowych (28). Jednak, jak donosi K r ó l (15), nieregularne nawożenie fosforem sprzyja procesom jego uwsteczniania, choć intensywność tego zjawiska zależy również od typu gleby. W g S a p e k (22) w glebach z natury bogatych w fosfor, lecz

z niską zawartością form dostępnych dla roślin intensywne nawożenie fosforem nie tylko nie zwiększa efektywności nawożenia, ani nie wpływa na jakość plonu, ale też powoduje zwiększone ryzyko rozproszenia fosforu do środowiska i jego emisji do wód. Autorka przytacza litewskie badania *Kutrai i in.* (17), którzy po takim zabiegu poza zwiększeniem w glebie $P_{\text{całk}}$, nie uzyskali oczekiwanej zwyżki plonu, a wniesiony na pola fosfor mógł zostać wymyty do wód. *Wg Filipka i Skowrona* (4) 20–30% fosforu wprowadzonego do gleby z nawozem, w nadmiarze w stosunku do rzeczywistych pokarmowych potrzeb roślin jest zatrzymywane w glebie w formach dostępnych dla roślin i ta ilość jest źródłem potencjalnych strat na drodze wymycia. Ogranicza to możliwość efektywnego uzupełniania niedoborów składnika i może powodować wymierne straty ekonomiczne.

Najlepsze wykorzystanie P z nawozów mineralnych obserwuje się przy regularnym stosowaniu starannie granulowanych nawozów, co sprzyja równomiernemu rozpuszczaniu się fosforu i tworzeniu jednakowych warunków w całej ryzosferze. Dla właściwego wykorzystania okresowości przemian fosforu w glebie ważne jest dostosowanie czasu aplikacji nawozów do możliwości ich asymilacji przez rośliny. Niezbędna jest tu specjalistyczna wiedza z zakresu dynamiki pobierania P przez daną roślinę, gdyż np. zboża pobierają najwięcej fosforu w okresie rozwoju i dojrzewania kłosa, okopowe zaś w drugim i trzecim miesiącu wegetacji.

Pobieranie przez rośliny fosforu ułatwiają jony NH_4^+ i Mg oraz S, natomiast jony NO_3^- działają antagonistycznie w stosunku do P, tzn. utrudniają jego pobieranie. Badając wpływ dodatku siarki na gospodarkę azotowo-fosforową kukurydzy, *Podleśna i in.* (18) zauważyli, że przy wzrastających dawkach azotu rośliny akumulowały większe ilości fosforu zarówno w słomie, jak i w ziarnie kukurydzy. Jest to zbieżne z doniesieniami *Kopera i Lemano wicza* (12) mówiącymi, że pobieranie fosforu jest determinowane przez stan odżywienia roślin azotem. Ponadto dodatek siarki powoduje, że kukurydza pobiera z gleby większe ilości fosforu niż z obiektów bez nawożenia siarką (różnica wynosiła od 5 do 15, 5 kg P·ha⁻¹); (18). Podobną zależność udało się zauważyć w badaniach z pszenżytem jarym, gdzie z obiektów nawożonych siarką pobranie fosforu było wyższe o 12% w porównaniu do obiektów nawożonych wyłącznie NPK (7).

Uprawa roli

Sposób uprawy roli modyfikuje właściwości gleby, m.in. stopień zagęszczenia gleby, stosunki wilgotnościowe i sposób rozmieszczenia w profilu glebowym składników pokarmowych, a w konsekwencji, modyfikuje czynniki warunkujące dostępność fosforu dla roślin (24). W klasycznym płużnym systemie uprawy przy pomocy pługa odkładnicowego wykonywana jest orka, która powoduje spulchnienie gleby, przez co przyczynia się do jej przesuszania i przyspieszenia tempa mineralizacji zawartej w niej materii organicznej. W konserwujących systemach uprawy roli

znacznie ograniczona jest intensywność zabiegów agrotechnicznych, powierzchnia gleby zostaje okryta resztkami poźniwnymi, mulczem lub roślinami okrywowymi, a ponadto stosuje się zróżnicowany płodozmian z wykorzystaniem międzyplonów (25).

S m a g a c z (24) oceniał wpływ tradycyjnego i bezpługowego systemu uprawy oraz siewu bezpośredniego na zawartość $P_{dost.}$. Ustalił on, że zawartość $P_{dost.}$ różniła się w zależności od badanego poziomu gleby oraz sposobu uprawy. Zarówno w warstwie 0-5 cm jak i 5-15 cm stwierdzono wzrost poziomu $P_{dost.}$ na obiektach z uprawą konserwującą (8-11 rok doświadczenia), co najbardziej widoczne było w warunkach siewu bezpośredniego. W głębszych warstwach gleby oznaczone zwartości tego składnika nie różniły się istotnie. Autor zauważa, że w systemach tradycyjnej orki $P_{dost.}$ jest równomiernie rozmieszczony w całym profilu glebowym, zaś w systemach z uproszczeniami zidentyfikowano wyższe poziomy $P_{dost.}$ w wierzchnich warstwach gleby.

Wybór systemu uprawy wywiera wpływ na dostępność fosforu dla roślin również w aspekcie erozyjnych strat fosforu do wód. Pozostawiając odkrytą powierzchnię wzruszonej gleby, uprawa pługowa dodatkowo potęguje erozyjne straty fosforu na drodze zmywania przez deszcz i wywiewania przez wiatr. Fosfor wynoszony z pól wraz z cząsteczkami gleby zostaje w ten sposób bezpowrotnie stracony dla produkcji rolniczej. Systemy konserwujące (siew bezpośredni czy uproszczony system uprawy roli) powodują ograniczenie strat erozyjnych gleby, zmniejszając przez to również ilość wyniesionego fosforu.

Rola mikroorganizmów glebowych

Naturalna pula dostępnego fosforu jest stosunkowo niewielka, gdyż wyflukiwanie go ze skał jest wolniejsze niż tempo asymilacji przez mikroorganizmy glebowe. Dostępność tej formy zależy więc od tempa mineralizacji. Aby fosfor z naturalnych surowców mógł być dostępny dla roślin, musi zostać zmineralizowany przez bakterie fosforowe, zatem istotnym elementem wpływającym na dostępność fosforu jest aktywność mikrobiologiczna danej gleby. Bakterie fosforowe (PSB ang. *phosphate solubilizing bacteria*) uruchamiają mineralne formy nierozpuszczalnego P, mineralizują fosfor organiczny oraz katalizują procesy utleniania lub redukcji jonów fosforowych (15). Proces ten polega na produkowaniu przez grzyby mikorytyczne oraz mikroorganizmy glebowe enzymów katalizujących proces mineralizacji. Do mikroorganizmów produkujących enzymy uwalniające fosfor zaliczamy bakterie z rodzaju: *Pseudomonas*, *Micrococcus*, *Flavobacterium*, *Bacillus*, *Rhizopus*, *Azotobacter* oraz grzyby z rodzaju *Penicillium* i *Aspergillus* (1, 3, 11, 16, 22, 27). W procesach biodegradacji ortofosforanów organicznych uczestniczą enzymy: fosfatazy kwaśne i alkaliczne, a produktem tych reakcji są dostępne dla roślin ortofosforany.

Mikroorganizmy przyczyniają się do zwiększenia dostępności fosforu również poprzez wydzielanie kwasów organicznych: glukonowego (*Rhodococcus*

erythropolis, *Serratia marcescens*), cytrynowego (*Bacillus megaterium*, *Arthrobacter*, *S. marcescens*, *Aspergillus niger*), mlekowego (*B. megaterium*, *S. marcescens*), bursztynowego (*S. marcescens*) i propionowego (*S. marcescens*, *B. megaterium*), oraz kwasów nieorganicznych, takich jak kwas siarkowy (*Thiobacillus ferrooxidans*, *Acidithiobacillus thiooxidans*). Kwasy te tworzą stabilne kompleksy z sorbentami fosforu (glin, żelazo, wapń) blokując miejsca sorpcji P i w ten sposób zwiększają pulę fosforu dostępnego dla roślin (3, 16, 20).

W literaturze dyskutowane są różne sposoby zwiększenia dostępności fosforu poprzez wykorzystanie mikroorganizmów glebowych: wyselekcjonowanych grzybów *PSF phosphate solubilizing fungi* oraz PSB (1, 11, 16.). Zasadniczo badane są dwie strategie stosowania mikroorganizmów w formie bionawozów: (1) wzmożenie rozpuszczalności związków fosforu obecnych w minerałach przez zakwaszenie gleby oraz uwolnienie czynników kompleksujących metale oraz (2) stymulowanie enzymatycznego rozkładu fosforu organicznego. Skuteczność tych procesów zależy m.in. od warunków wilgotnościowych i temperatury.

Saeid i in. (20) porównywały zdolność do uwalniania fosforu z apatytów przez dwa szczepy, które różnią się mechanizmem działania: *Bacillus megaterium* i *Acidithiobacillus ferrooxidans*. Dwukrotnie większe stężenie rozpuszczonego P uzyskano dla mikroorganizmu, który syntetyzuje kwas siarkowy (*Acidithiobacillus ferrooxidans*) w porównaniu z *Bacillus megaterium*, który syntetyzuje mieszaninę słabych kwasów organicznych.

Wyselekcjonowane organizmy PSF oraz PSB są wykorzystywane w formie szczepionek do uwalniania związków fosforu z fosforytu. Saeid i in. (20) przytaczają wyniki doświadczeń polowych (27), w których po zastosowaniu surowca fosforytowego łącznie ze szczepionką glebową *Bacillus megaterium* var. *phosphaticum* zaobserwowano wzrost $P_{\text{dost.}}$, a wydajność plonów trzciny cukrowej wzrosła o 12,6%. Łączne zastosowanie nawozów fosforowych i PSB pozwalało zmniejszyć rekomendowaną dawkę tych pierwszych o 25%. Dodatkowo, autorzy stwierdzają, że stosując szczepionki PSB można zastąpić aż 50% dawki superfosfatu znacznie tańszymi mineralnymi surowcami fosforowymi bez utraty wielkości plonu (27).

Kumar i in. (16) badając właściwości wyselekcjonowanych szczepów *Azotobacter chroococcum* w doświadczeniu wazonowym uzyskali wyższą przyswajalność P z zastosowanych nawozów mineralnych. Autorzy sugerują, że szczepionka wyselekcjonowanych autochtonicznych szczepów *Azotobacter chroococcum* może być ekonomicznie uzasadnionym środkiem zwiększenia produktywności upraw przy jednoczesnym zmniejszeniu dawek nawozów fosforowych. Podsumowując, należy zapewnić odpowiednie warunki do rozwoju mikroorganizmów, gdyż mogą one znacząco zwiększyć dostępność fosforu (i innych składników), co w efekcie przełoży się na wyższą efektywność zastosowanych nawozów i wykorzystania rezerw glebowych (13). Na polskim rynku dostępne są preparaty zawierające mieszaninę żywych bakterii glebowych pobranych

i wyselekcjonowanych z naturalnych siedlisk. Stymulują one rozwój bakterii (np. *Pseudomonas putida*), pobieranie fosforu, żelaza, stopniowy rozkład zawartego w glebie fosforanu wapnia oraz wpływają dodatnio na rozwój systemu korzeniowego, przyczyniając się w ten sposób do zwiększania puli $P_{\text{dost.}}$.

Warto nadmienić również, że poza bezpośrednim działaniem enzymatycznym grzybów i bakterii, mikrofauna glebowa wywiera również wpływ na dostępność fosforu poprzez tworzenie w glebie biogenicznych struktur o swoistej formie, charakterystycznych dla dżdżownic oraz kopców w przypadku termitów. Te mikrozmiiany struktury gleby znacznie zmieniają dostępność fosforu dla roślin, a uformowane struktury wpływają również na przemieszczanie się P wskutek infiltracji oraz spływu z erodowanej gleby (15).

Oddziaływanie roślin

Istotnym czynnikiem wzbogacającym gleby w fosfor mogą być resztki poźniwne (22). Większość fosforu z tych źródeł wchodzi w skład glebowej materii organicznej i w procesie jej przemian, także z udziałem mikroorganizmów glebowych, tworzy organiczne związki już odporne na mikrobiologiczny rozkład. Jak wyjaśniono wcześniej, fosfor nieorganiczny jest wiązany w glebie przez związki żelaza, glinu, manganu oraz wapnia i tworzy z nimi fosforany niedostępne dla roślin. Największa aktywność mobilizacji tych trudno dostępnych form P do $P_{\text{dost.}}$ (zachodząca przy udziale mikroorganizmów glebowych) ma miejsce w obrębie strefy korzenia, tzw. ryzosfery. Dlatego właśnie na glebach dobrze przerośniętych korzeniami (np. użytki zielone) większa ilość fosforu organicznego zostaje udostępniona dla roślin. Podobne działanie wykazują uprawy silnie korzeniące się roślin, np.: grochu, łubinu, gorczyca, lucerny czy koniczyny czerwonej (28).

Rośliny posiadają zróżnicowaną zdolność do pobierania fosforu i przejawiają zróżnicowane mechanizmy adaptacyjne. Według *S o ł t y s i a k a i i n.* (26) fosfor jest dobrze pobierany z gleby przez lucernę, strączkowe, koniczynę, trawy, okopowe, a gorzej przez zboża (zwłaszcza jęczmień) oraz rzepak.

Według *B a l e m i l a i N e g i s h o* (2) w warunkach deficytu $P_{\text{dost.}}$ rośliny adaptują się do warunków stresowych, uruchamiając pewne mechanizmy zwiększające wydajność pobierania fosforu. Głównym z nich jest modyfikacja architektury korzenia, polegająca na silnym rozwoju systemu korzeniowego, tworzeniu dłuższych włósników korzeni i zwiększeniu ilości wydzielin, w tym również enzymów sprzyjających pobieraniu fosforu. W przyszłości wszystkie te morfologiczne, fizjologiczne, biochemiczne oraz molekularne mechanizmy adaptacji mogą zostać wykorzystane w usprawnieniu efektywności nawożenia fosforem. *Z h a n g i i n.* (31), badając wpływ rodzaju okrywy roślinnej na formy oraz zawartość fosforu w wierzchniej warstwie (0-20 cm) gleby w pobliżu lasów alpejskich ustalił, że zmiana okrywy roślinnej od podalpejskich lasów szpilkowych, przez alpejskie zakrzaczenia, do

alpejskich łąk zakrzaczonych może zmniejszyć zarówno wiązanie fosforu w glebie jak i jego dostępność. Autorzy zauważają, że pełne rozpoznanie dynamiki przemian fosforu w glebach wymaga dalszych badań i należy rozpatrywać je wyłącznie w powiązaniu z przemianami azotu w glebie.

Podsumowanie

Dostarczenie roślinie fosforu w odpowiedniej ilości, formie i czasie powinno być jednym z celów nadrzędnych zrównoważonej i efektywnej produkcji roślinnej. Wykorzystanie puli fosforu glebowego przez rośliny zależy od szeregu czynników, by wymienić tylko: zasobność i dostępność składnika w glebie, pH gleby, prawidłowy rozwój bryły korzeniowej, obecność mikroorganizmów mobilizujących fosfor, rodzaj stosowanych zabiegów, czy temperaturę i fizjologiczny stan rośliny.

Problem niedoboru dostępnych form fosforu dotyczy szczególnie gleb bardzo ubogich w ten składnik. W przypadku gleb o stosunkowo wysokiej całkowitej zawartości P nie ma konieczności ich dalszego nawożenia. Należy jedynie uruchomić wprowadzone wcześniej przez człowieka zasoby P i zapewnić roślinie warunki umożliwiające ich pobranie, regulując odczyn i warunki wodno-powietrzne gleby. Grzyby i bakterie mobilizujące fosfor mogą stanowić ogromną wartość użytkową, ponieważ pozwalają na efektywne wykorzystywanie glebowych rezerw P, ale także na korzystanie z tańszych źródeł P (np. na stosowanie tańszego surowca fosforowego zamiast superfosfatu). Obecność w środowisku glebowym substancji humusowych zmniejsza wytrącanie się fosforanów i dodatkowo ogranicza procesy uwsteczniania fosforu wniesionego z nawozami.

Literatura

1. Akhtar M.S., Jilani G., Khan A.A., Naqvi S.M.S., Rasheed M.: Phosphorus solubilizing bacteria: Occurrence, mechanisms and their role in crop production, *J. Agric.Biol. Sci.*, 2009, **1**: 48-58.
2. Balemil T., Negisho K.: Management of soil phosphorus and plant adaptation mechanisms to phosphorus stress for sustainable crop production: a review. *J. Soil Sci. Plant Nutr.*, 2012, **12(3)**: 547-561.
3. Bojinova D., Ivanova R., K. Nedialkova.: Rock phosphate solubilization by soil bacteria, *J. University Chem. Technol. Metal.*, 2006, **41(3)**: 297-302.
4. Filipek T., Skowron P.: New proposals for phosphorus management in Polish agriculture. w: Sapek A.: Scientific basis to mitigate the nutrient dispersion into the environment. Falenty, 2000: 151-159.
5. Fotyma M., Kęsik K., Lipiński W., Filipiak K.: Testy glebowe jako podstawa doradztwa nawozowego, *Studia i Raporty IUNG-PIB, Puławy*, 2015, **42(16)**: 9-53.
6. Fotyma M., Igras J.: Udział obszarów wiejskich w ogólnej emisji związków azotu i fosforu z obszaru Polski do Bałtyku. W: Igras J., Pastuszek M.: Udział Polskiego rolnictwa w emisji związków azotu i fosforu do Bałtyku, Puławy, 2009: 331-348.

7. Klikocka H., Gaj R., Głowacka A., Narolski B., Szostak B.: Pobranie fosforu z ziarnem pszenżyta jarego na tle uprawy roli i nawożenia mineralnego oraz właściwości chemicznych gleby. *Polish J. Agronomy*, 2015, **21**: 3.
8. Główny Urząd Statystyczny (GUS): Środki produkcji w rolnictwie w roku gospodarczym 2015/2016, Warszawa, 2017 r.
9. Hargreaves P.: Soil Texture and pH Effects on Potash and Phosphorus Availability. *Potash News*, The Potash Development Association, 2015.
10. Jadczyzyn T., Kopiński J., Ochal P.: Produkcyjne i środowiskowe aspekty gospodarowania fosforem. *Studia i Raporty IUNG-PIB*, 2013, **34(8)**: 57-74.
11. Jones D.L., Oburger E.: Solubilization of phosphorus by soil microorganisms. W: *Phosphorus in action. Biological processes in soil phosphorus cycling*. Pr. zbior. Red. E.K. Buenemann, E. Frossard, A. Oberson., Ser. *Soil Biology*, Berlin, Heidelberg. Springer-Verlag, 2011, **100**: 169-198.
12. Koper J., Lemanowicz J.: Aktywność fosfatazy i zawartość fosforu w glebie spod wybranych roślin uprawnych nawożonych gnojowicą. *Proc. of ECOpole*, 2007, **1(12)**: 153.
13. Kozera A.: System ochrony fosforu w glebie. 2014 dostępne 12.06.2017 r. <http://agro-technika.pl/system-ochrony-fosforu-w-glebie/>.
14. Kreišmane Dz., Naglis-Liepa K., Popluga D., Lēnerts A., Rivžai P.: Liming effect on nitrogen use efficiency and nitrogen oxide emissions in crop farming. *Research for Rural Development*, 2016, **1**: 3-36.
15. Król M.: Przemiany mikrobiologiczne fosforu w glebie. *Monografie i rozprawy naukowe*, Puławy, 2012: 33.
16. Kumar V., Kumar Behl R., Narula N.: Establishment of phosphate-solubilizing strains of *Azotobacter chroococcum* in the rhizosphere and their effect on wheat cultivars under greenhouse conditions. *Microbiol. Res.*, 2001, **156**: 87-93.
17. Kutra G., Aksomaitienė R., Silnika A.S.: Phosphorus in Lithuanian agriculture and its accumulation in soil with different organic matter content. W: *Phosphorus in agriculture and water quality protection*. Pr. zbior. Red. A. Sapek. Falenty, 1998: 52-59.
18. Podleśna A., Podleśny J., Klikocka H.: Wpływ nawożenia siarką i azotem na azotowo-fosforową gospodarkę kukurydzy. *Przem. Chem.*, 2017, **96/6**: 1374-1377. DOI: 10.15199/62.2017.6.32.
19. Potarzycki J.: Fosfor w glebie. *J. of Elementol.*, 2003, **8**: 19-32.
20. Saeid A., Chojnacka K.W., Wyciszkiewicz M.: Wykorzystanie mikroorganizmów w wytwarzaniu nawozów fosforowych. *Przem. Chem.*, 2012, **91(5)**: 956-958.
21. Salomon E., Sundberg M. (Eds.): Implementation and status of priority measures to reduce nitrogen and phosphorus leakage – Summary of country reports, *Baltic COMPASS Work Package 3 Report*, JTI 2012: 1-33.
22. Sapek B.: Nagromadzenie i uwalnianie fosforu w glebach – źródła, procesy, przyczyny. *Woda Środ. Obsz. Wiej.*, 2014, **1(45)**: 77-100.
23. Sharpley, A.N.: Soil phosphorus dynamics: agronomic and environmental impact. *Ecol. Eng.*, 1995, **5**: 261-279.
24. Smagacz J.: Fosfor w glebie w warunkach zróżnicowanej uprawy roli. *Konferencja Naukowa Fosfor – współczesne wyzwania dla rolnictwa i środowiska. Materiały konferencyjne*. Puławy, 15-16 czerwca 2015: 135-136.
25. Smagacz J.: Uproszczona uprawa roli. w: Jadczyzyn T. (red.): *Dobre praktyki rolnicze na obszarach szczególnie narażonych (OSN) na azotany pochodzenia rolniczego*, Brwinów, 2015: 55-58.
26. Sołtysiak U., Kukuła K., Błażej J., Fajger M., Szczepański K., Bednarz B.: Ramowy program rozwoju rolnictwa ekologicznego na Podkarpaciu na lata 2003-2006. *Rzeszów*, 2002: 1-22.
27. Sundara B., Natarajan V., Hari K.: Influence of phosphorus solubilizing bacteria on the changes in soil available phosphorus and sugarcane and sugar yields. *Field Crops Res.*, 2002, **77(1)**: 43-49.
28. Szczepaniak W.: Dostępność fosforu dla roślin. 2014 dostępne na stronie: <http://agro-technika.pl/archiwa/dostepnosc-fosforu-dla-roslin/>.

29. Von Wandruszka R.: Phosphorus retention in calcereous soils and the effect of organic matter on its mobility [online]. *Geochemical Transactions*. 2006, **7(6)**: 1-8 [Dostęp 02.10.2013]. <http://www.geochemicaltrasactions.com./content/7/1/6>.
 30. Zalecenia Nawozowe. Cz. I. Liczby graniczne do wyceny zawartości w glebach makro- i mikroelementów. Puławy, 1985, Ser. P(20): 34.
 31. Zhang L., Wu Y., Wu N., Luo P., Liu L., Hu H. Y.: Impact of vegetation type o soil phosphorus availability and fractions near the alpine timberline of the Tibetan Plateau. *Pol. J. Ecol.*, 2011, **59(2)**: 307-361.
-

Adres do korespondencji:

mgr Beata Jurga
Zakład Żywienia Roślin i Nawożenia
IUNG-PIB
ul. Czartoryskich 8, 24-100 Puławy
tel. 81 47 86 839
e-mail: bjurga@iung.pulawy.pl