

STUDIA I RAPORTY IUNG-PIB

ZESZYT 59(13): 59-76

2019

Anna Podleśna*Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa – Państwowy Instytut Badawczy
w Puławach*CZYNNIKI KSZTAŁTUJĄCE POBIERANIE I WYKORZYSTANIE FOSFORU
PRZEZ ROŚLINY ORAZ JEGO STRATY Z GLEB UPRAWNYCH***Słowa kluczowe:** fosfor, okresy krytyczne, mineralizacja materii organicznej, wykorzystanie nawozów i wymywanie fosforu, działania zaradcze**Wstęp**

Zrównoważona gospodarka składnikami mineralnymi jest podstawowym elementem integrowanego rolnictwa. Jej celem jest pokrycie potrzeb pokarmowych roślin na poziomie umożliwiającym uzyskanie opłacalnych, wysokiej jakości plonów oraz redukcja zagrożeń dla środowiska naturalnego. Z tego względu opiera się m.in. na bilansowaniu przychodu i rozchodu składników pokarmowych z uwzględnieniem produkcyjnych, ekonomicznych i ekologicznych skutków nawożenia (41). Do najważniejszych składników pokarmowych roślin uprawnych obok azotu zalicza się fosfor. Z jednej strony składnik ten warunkuje produkcję roślinną a z drugiej może być potencjalnym źródłem zanieczyszczenia środowiska, w tym głównie wód lądowych i morskich. Aby zmniejszyć to zagrożenie podejmuje się działania zwiększające wykorzystanie fosforu nawozowego przez rośliny.

W oparciu o dostępną literaturę przedmiotu omówiono problem wpływu czynników agrotechnicznych i środowiskowo-pogodowych na pobieranie fosforu i wykorzystanie z nawozów przez rośliny uprawne. Przedstawiono także jego straty do wód z uwzględnieniem jakości wody pitnej oraz wód Morza Bałtyckiego i obszarów chronionych. Następnie omówiono działania prowadzące do zwiększenia wykorzystania fosforu nawozowego przez rośliny uprawne i obniżenia jego strat. Praca nie zawiera analizy oddziaływania produkcji zwierzęcej i stosowanych pasz na eutrofizację wód wywołaną nadmiarem fosforu.

* Opracowanie wykonano w ramach zadania 2.2 w programie wieloletnim IUNG-PIB.

Zapotrzebowanie roślin na fosfor i okresy krytyczne

Fosfor to ważny składnik pokarmowy, który spełnia w roślinie wiele istotnych funkcji i nie może być zastąpiony innymi pierwiastkami (2). Dzięki obecności w fosfolipidach (i innych związkach) pełni funkcje strukturalne i zapasowe (fityna), a dzięki możliwości wpływu na ekspresję genów spełnia funkcje regulacyjne (45). Fosfor bezpośrednio (jako np. fosforany cukrów) i pośrednio (np. poprzez regulację aktywności enzymów w procesie fosforylacji i defosforylacji) uczestniczy w metabolizmie komórkowym. Ponadto, jako składnik kwasów nukleinowych (DNA i RNA), bierze udział w procesach przekazywania informacji genetycznej a poprzez obecność w ATP uczestniczy w magazynowaniu energii. Generalnie można podsumować, iż poziom fosforu w tkankach roślin wpływa na przebieg i intensywność głównych procesów fizjologicznych i biochemicznych w roślinie, tj. fotosynteza, oddychanie, biosyntezę białek i kwasów nukleinowych oraz transport asymilatów i składników pokarmowych (3).

W rozwoju roślin występują dwa okresy krytyczne względem fosforu (14). Pierwszy dotyczy kilku tygodni początkowego wzrostu roślin i jest związany ze wzrostem systemu korzeniowego. Wówczas roślina musi mieć w podłożu dostateczną ilość przyswajalnej formy tego składnika. Drugi zaś przypada na czas po kwitnieniu, czyli na fazę tworzenia plonu generatywnego. Są to ważne etapy w rozwoju roślin, bowiem odnoszą się do zdolności zaopatrzenia w wodę i składniki pokarmowe, co warunkuje ich wzrost i rozwój oraz przetrwanie okresów stresu, a także do warunków sprzyjających tworzeniu plonu, który jest głównym celem produkcji roślinnej.

Chociaż fosfor jest niezbędny dla wzrostu i rozwoju wszystkich roślin uprawnych, to przyjmuje się, że wysokopienne rośliny odznaczające się szybkim wzrostem i rozwojem mają większe wymagania pokarmowe w stosunku do tego składnika (27). Dotyczy to zwłaszcza kukurydzy, lucerny, intensywnie użytkowanych traw oraz ziemniaka i buraka cukrowego. Fosfor jest też szczególnie ważny dla roślin bobowatych uprawianych w zasiewach czystych i w mieszanych za zbożami.

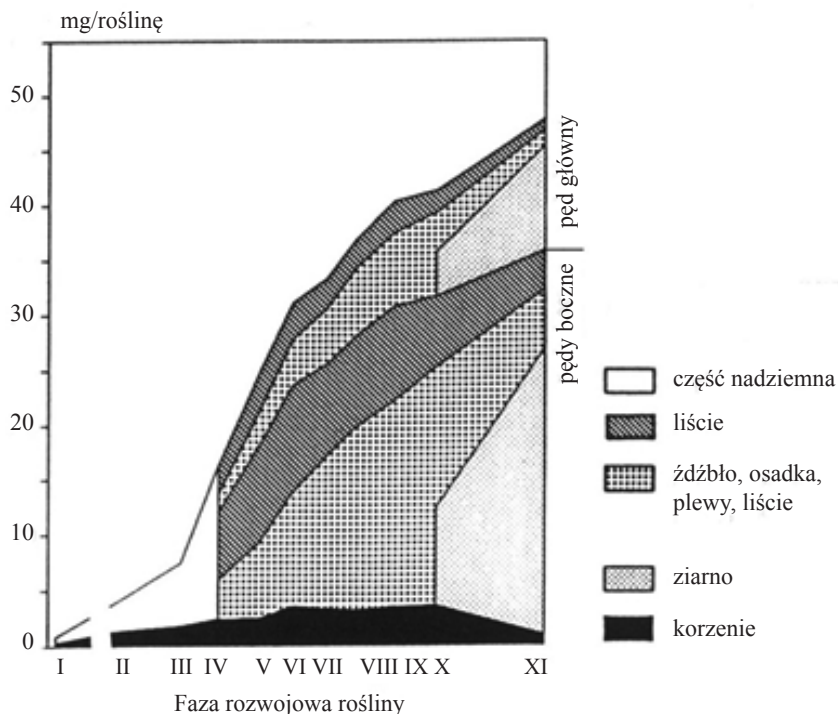
Pobieranie fosforu przez rośliny

Chociaż całkowita ilość fosforu obecna w glebie może być wysoka, to często nawet 80% jego puli glebowej znajduje się w formach niedostępnych dla roślin tj. związki organiczne – Po (ang. *organic P*) jako kwas fitynowy oraz resztki roślin i zwierząt lub związki nieorganiczne obecne w minerałach glebowych (39, 45). Formą fosforu, bezpośrednio dostępną dla roślin jest forma nieorganiczna w postaci obecnych w roztworze glebowym jonów fosforanowych ($\text{H}_2\text{PO}_4^{-2}$ lub HPO_4^{-2}), określanych jako Pi (ang. *inorganic P*). Pobieranie tych jonów odbywa się głównie przez komórki strefy włośnikowej korzenia. Z roztworu glebowego fosforany przemieszczają się drogą dyfuzji do ścian komórkowych włośników, skąd są transportowane do wnętrza komórki. Po przekroczeniu błony komórkowej komórek skórki fosforany mogą

dalej przemieszczać się swobodnie w kierunku walca osiowego. Jednak zawartość fosforanów w wielu glebach wynosi na ogół 2-10 μM i rzadko przekracza 10 μM co oznacza, że jest ona około 1000-10 000 razy niższa niż stężenie fosforu w komórkach roślinnych (ponad 10mM); (3,45). W tej sytuacji transport jonów fosforanowych przez błonę komórkową musi odbywać się w procesie aktywnego pobierania, wbrew gradientowi stężeń a ujemnie naładowane jony Pi muszą przewyciężyć barierę ujemnego potencjału błony komórkowej. To sprawia, że transport tych jonów wymaga nakładu energii i udziału transbłonowych transporterów białkowych. W wyniku zastosowania nowych technik molekularnych wykazano, że w transporcie fosforanów do komórki roślinnej biorą udział dwa systemy transportu Pi: transportery o wysokim i niskim powinowactwie do fosforanów. System z udziałem transporterów o niskim powinowactwie do fosforanów wydaje się być zawsze aktywny, podczas gdy transportery o wysokim powinowactwie są aktywowane tylko w warunkach deficytu fosforu. Należy dodać, że w warunkach typowego dla większości gleb uprawnych stężenia Pi poniżej 20 μM transport fosforanów zachodzi głównie z udziałem transporterów o wysokim powinowactwie (45). Pobieranie fosforu przez roślinę trwa na ogół przez cały czas wzrostu roślin, chociaż nie jest równomierne w ciągu wegetacji w związku z tym są okresy słabszego i większego pobierania tego składnika (11); (rys. 1). Zwykle jednak pobieranie P wyprzedza przyrost masy rośliny. Początkowo fosfor jest akumulowany w częściach wegetatywnych roślin (łodygi i liście) a w fazie generatywnej jest przenoszony do ziarna, nasion lub owoców dzięki zdolności do sprawnej remobilizacji.

Rola czynników glebowych i pogodowych w uwalnianiu fosforu z gleb i jego pobieraniu przez rośliny

Ze względu na różnorodność i wielość czynników oddziałujących na pobieranie składników pokarmowych przez roślinę, w tym pobieranie fosforu, szuka się tych, które oddziałują na proces pobierania w stopniu największym. Z modelu matematycznego, przedstawionego przez Grzebisza i Potarzyckiego (13) wynika, że pobieranie fosforu przez rośliny określają przede wszystkim warunki wzrostu systemu korzeniowego w glebie. To wskazuje, że warunkiem pierwszego rzędu w praktyce rolniczej powinno być ograniczanie wpływu czynników zakłócających wzrost korzeni. Jak wykazano bowiem rośliny wytwarzające duży, rozwinięty system korzeniowy intensywnie pobierają fosfor z gleby. Dzieje się tak za pośrednictwem włośników, które od 5 do 18 razy zwiększają wielkość powierzchni korzenia. Ragnothama (32) podaje, że w warunkach niedoboru fosforu włośniki w 63% odpowiadają za absorpcję fosforanów.



Rysunek 1. Dynamika pobierania fosforu przez pszenicę ozimą

Źródło: Giza –Podleśna, 1993 (11), zmodyfikowane

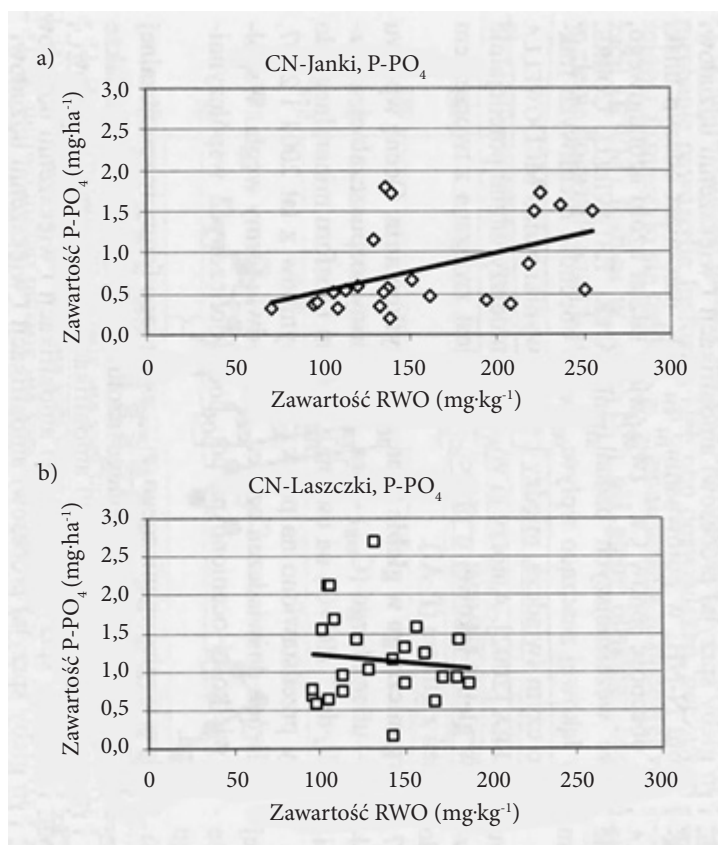
Zdaniem Sapek (38) zarówno procesy i mechanizmy nagromadzania fosforu, jak również jego uwalniania i wymywania z gleby są złożone i zależą od wielu czynników. Do najważniejszych należą; zawartość materii organicznej (zwłaszcza jej formy rozpuszczalnej), odczyn, zawartość żelaza i glinu oraz gospodarowanie azotem.

Jak wcześniej wspomniano, fosfor występuje w glebach w formie nieorganicznej (jako ortofosforany $H_2PO_4^{-2}$ i HPO_4^{-2}) oraz w formie organicznej w postaci związków z materią organiczną (szczególnie z rozpuszczalnym węglem organicznym). Fosfor nieorganiczny stanowi połowę w całkowitej puli rezerwy fosforu, ale ta forma jest związana z cząstkami gleby, przez co wykazuje małą mobilność. Natomiast druga połowa tej rezerwy to fosfor zakumulowany w glebowej materii organicznej - GMO (38). Glebowa materia organiczna podlega procesowi mineralizacji, w wyniku czego następuje uwalnianie się fosforu. Jest to skomplikowany proces, przebiegający z udziałem mikroorganizmów glebowych, w czasie którego zachodzą reakcje chemiczne. Na proces mineralizacji GMO wpływają właściwości fizykochemiczne gleby, w tym zawartość węgla organicznego. Sapek (38) podaje, że wzrost rozpuszczalnego węgla organicznego w warunkach chemicznej redukcji w glebach sprzyja zwiększeniu rozpuszczalności i zmniejsza retencję (magazynowanie) fosforanów w glebach. Jednocześnie w doświadczeniach wcześniejszych (37)

wykazano, że zwiększanie uwalniania mineralnego fosforu ($P-PO_4$) z 10 cm, wierzchniej warstwy gleby zależało w największym stopniu od węgla organicznego, a zwłaszcza, jego formy rozpuszczalnej (tj. rozpuszczalnego węgla organicznego - RWO). Z kolei w warunkach gleby zasobniejszej w Corg, wraz ze wzrostem RWO następowało ubożenie wierzchniej warstwy gleby w rozpuszczalny fosfor (Rys. 2). Autorka przypisuje ten proces wymywaniu fosforu do głębszych warstw gleby (37). W tym przypadku ważny jest stosunek C:P, ponieważ uwalnianie P następuje przy stosunku C:P węższym niż 200:1, a immobilizacja przy szerszym niż 300:1.

Przyjmuje się, że główną rolę w uwalnianiu fosforu, na drodze mineralizacji GMO, odgrywają opady atmosferyczne i powiązane z nimi warunki wilgotnościowe gleby. W badaniach Sapiek (37) nie stwierdzono jednak istotnego wpływu ilości opadów na średnie zmiany uwalnianego fosforu w glebie z doświadczenia. Natomiast na glebie zasobniejszej w Corg (wapnowanej i nie wapnowanej) wykazano sprzyjający wpływ opadu na uwalnianie fosforu. Warunki słabszego uwilgotnienia gleby, wynikające z mniejszych opadów oraz wzrost temperatury powietrza na ogół skutkowały zwiększeniem intensywności mineralizacji organicznych związków fosforu, a zwiększona zasobność gleby w Corg i mniejsze jej zakwaszenie sprzyjało uwalnianiu w glebie mineralnych form fosforu.

Pod wpływem niedoboru lub nadmiaru wody w glebie zmienia się także dynamika pobierania fosforanów. Nadmiar wody w glebie powoduje wypieranie tlenu z przestrzeni glebowych co wpływa na zmniejszenie pobierania fosforu (13). Również w warunkach deficytu wilgoci proces pobierania tego składnika ulega znacznej redukcji. Zmniejszenie uwilgotnienia gleby powoduje wzrost porów wypełnionych powietrzem, przez co ruch wody i składników pokarmowych jest utrudniony. Nawet stosowanie większych dawek nawozów fosforowych nie może powstrzymać redukcji plonów roślin uprawnych spowodowanej zaburzeniami pobierania fosforu w wyniku deficytu wody. Khan i in. (21) również stwierdzili, że odpowiednie do potrzeb zaopatrzenie w wodę wspiera pobieranie fosforu. W sytuacji niedostatecznej ilości opadów rośliny mogą pobrać zbyt mało wody potrzebnej do wzrostu. Ten stres wpływa bezpośrednio na wzrost korzeni i ich funkcjonowanie, a także na dostępność i transport fosforu oraz innych składników pokarmowych w glebie, w wyniku czego następuje obniżenie wielkości jego pobierania i efektywności wykorzystania.



Rysunek 2. Zależność zawartości fosforu od rozpuszczalnego węgla organicznego (RWO) w wyciągu warstwy gleby 0-10 cm nawożonej saletrą wapniową (średnie z lat 2004-2007)

Źródło: Sapek, 2010 (37)

Według Dibba i in. (5) dominującą rolę w dostępności fosforu ma także odczyn gleby, który oddziałuje zarówno na ilość, jak i na sposób jego wiązania. Dostępność fosforu dla roślin jest w większości gleb najwyższa przy odczynie 6-7, a po obu stronach tego przedziału zmniejsza się. W glebach alkalicznych ($\text{pH} > 7$) w reakcjach z fosforem dominuje wapń i wówczas następuje uwstecznianie fosforu (38). Z kolei w glebach kwaśnych ($\text{pH} < 5,5$) w reakcjach z fosforem dominuje glin (Al) i żelazo (Fe), które łącząc się z anionem fosforanowym tworzą związki trudno rozpuszczalne co powoduje, że są one niedostępne dla roślin. Odczyn gleby jest także modyfikowany przez stosowane nawozy mineralne i wapnowanie. Zmniejszenie uwalniania fosforu mineralnego w glebie stwierdzono pod wpływem jej zobojętnienia (i związane z nim wzbogacenie gleby w wapń) oraz nawożenia saletrą wapniową (37). Według Grzebisza i Potarzyckiego (13) niski odczyn gleby wpływa na pobieranie jonów fosforanowych przez roślinę poprzez: 1) wzrost zawartości toksycznego glinu, który redukuje szybkość wzrostu systemu korzeniowego rośliny, 2) spadek zawartości rozpuszczalnego P w roztworze glebowym i 3) spadek dostępności innych składników

pokarmowych, które wpływają na metabolizm rośliny w wyniku czego pojawiają się niedobory Ca, Mg, K i Mo.

Zdaniem Grzebisza i Potarzyckiego (13) wykorzystanie potencjału plonotwórczego roślin zależy w praktyce m.in. od czynników fizycznych i chemicznych, warunkujących pobieranie składników pokarmowych podanych w formie nawozów organicznych i mineralnych. Jednym z ważniejszych czynników fizycznych w procesie pobierania fosforu jest temperatura. Grzebisz i Potarzycki (13) oraz Dibb i in. (5) utrzymują, że niska temperatura gleby i powietrza zmniejsza dostępność fosforu dla roślin, co jest jedną z przyczyn zaburzeń w pobieraniu fosforu przez rośliny wczesną wiosną, nawet w stanowiskach zasobnych w ten składnik pokarmowy. Zdaniem wymienionych autorów wynika to z: 1) wolniejszego tempa mineralizacji fosforu organicznego, 2) mniejszej aktywności mikroorganizmów biorących udział w udostępnianiu fosforu dla roślin, 3) zwolnionego metabolizmu roślin i 4) mniejszej rozpuszczalności mineralnych związków fosforu. Dibb i in. (5) powołują się na badania, w których wykazano, że niskie temperatury gleby podnoszą lepkość roztworu glebowego i zmniejszają wskaźnik dyfuzji, co powoduje zmniejszenie ilości P mających styczność z powierzchnią korzenia dla zajścia procesu absorpcji. Według tych badań wzrost temperatury gleby o każdy 1°C powoduje wzrost ilości P w roztworze glebowym o 1-2 %. Jednakże badania prowadzone w Polsce w latach 1998-2006 (37) nie wykazały istotnego wpływu temperatury powietrza na uwalnianie fosforu w warunkach inkubacji gleby *in situ*. Natomiast w glebie spod roślin uprawianych w doświadczeniu stwierdzono zmniejszanie się zawartości P-PO₄ w miarę wzrostu temperatury, co mogło wynikać ze zwiększonego pobierania jonów fosforanowych w tych warunkach. Potwierdzają to zjawisko wcześniejsze badania zagraniczne (28), w których wzrost temperatury z 5 do 27 °C spowodował wzrost części nadziemnej kukurydzy o 400% i znaczny przyrost masy korzeni. W tych korzystniejszych warunkach pobranie P wzrosło o 275%.

Wykorzystanie fosforu nawozowego przez rośliny uprawne

Pobieranie składników pokarmowych z gleby przez rośliny uprawne jest skomplikowanym procesem uzależnionym od wielu czynników, co sprawia, że na ogół nie przebiega z oczekiwaną intensywnością i skutecznością. Dlatego zdarza się, że dawki składników pokarmowych zastosowane w nawozach nie są w pełni wykorzystane dla wzrostu i rozwoju roślin. Podobnie sytuacja wygląda z obecnym w glebach fosforem przyswajalnym pochodzącym z mineralizacji materii organicznej. Często w glebie pozostaje duża pula tego składnika niepobrana przez rośliny i drobnoustroje glebowe. W literaturze pojawiają się informacje, że wykorzystanie fosforu z nawozów wynosi zaledwie 4-15% (29). Natomiast zdaniem Hasana i in. (15) w sezonie wegetacyjnym rośliny pobierają około 50% zastosowanego fosforu nawozowego. Z badań Tujaki i Goska (42) prowadzonych w warunkach ścisłych doświadczeń polowych wynika, że przy optymalnym nawożeniu wykorzystanie fosforu z nawozów wahało się od 8,4 do 37%. Autorzy wykazali ponadto, że wykorzystanie

fosforu jest zależne od gatunku rośliny (pszenżyto wykorzystywało P z nawozów najslabiej a najlepiej kukurydza). Te obserwacje zostały potwierdzone również w badaniach prowadzonych przez Gaj (9), w których najlepsze wykorzystanie P wykazano w przypadku buraka cukrowego. Jednakże z badań tych wynika, że średnie roczne wykorzystanie fosforu z nawozów na obiektach optymalnie nawożonych było niskie i wynosiło tylko 1%. Zdaniem autorki (9), poziom wykorzystania P z nawozów wskazuje, że gleba zawierała dostatecznie dużą ilość składnika w formie przyswajalnej dla roślin uprawnych, a fosfor stosowany w nawozach równoważył jego pobranie przez rośliny.

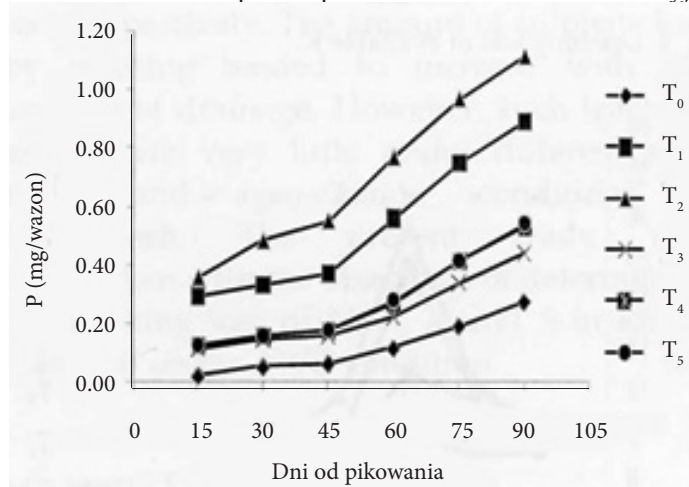
Straty fosforu w wyniku wymycia

Ze względu na małą mobilność, fosfor stosowany w dużych dawkach, zwłaszcza w formie nawozów naturalnych, nagromadza się w glebie głównie w warstwie, do której jest wprowadzany (7). Po przekroczeniu pojemności sorpcyjnej gleby w stosunku do tego składnika mogą następować jego straty do wód, zarówno w formie rozpuszczalnych, reaktywnych związków P (wymywanie, spływ powierzchniowy i podpowierzchniowy), jak i w formie związków zawieszonych na cząstkach stałych gleby (spływ powierzchniowy i podpowierzchniowy, odpływ szczelinowy). Nagromadzone w glebie rozpuszczalne i aktywne formy fosforu mogą uwalniać się do roztworu glebowego i wody gruntowej, a następnie przemieszczać, w procesie wymywania, w głąb profilu gleby oraz podlegać procesowi zmywu do pobliskich cieków i innych wód powierzchniowych (38). Badania wskazują jednak, że główną drogą eksportu fosforu do wód jest jego uruchamianie z gleb wraz ze spływem powierzchniowym w wyniku erozji (23). Jest to spowodowane faktem przeważającego udziału w glebach form fosforu związanych z materią organiczną (do 70% ogólnej ilości fosforu) oraz trudno rozpuszczalnych form mineralnych w postaci sorbowanych na koloidach glebowych. Badania modelowe wykazały, że fosfor zastosowany w formie nawozów mineralnych jest także narażony na straty w wyniku spływu powierzchniowego (18).

Gondek i Kopec (12) oraz Ruszkowska i in. (36) badali wymywanie fosforu i stwierdzili, że ani zastosowane nawożenie ani wapnowanie nie różnicowało istotnie zawartości fosforu w odciekach glebowych, co potwierdzało niewielkie straty tego składnika na drodze wymycia. Również Ulén i in. (44) ocenili, że wymycie całkowitego fosforu z hektara pszenicy ozimej było niskie i wynosiło 0,08 kg. Problem ten wyjaśniają Islam i in. (17) twierdząc, że fosfor jest mniej ruchliwy i dlatego straty przez wymycie są mniejsze w porównaniu z innymi składnikami. Oprócz tego fosfor łączy się silnie z glinem, żelazem, manganem, wapniem i innymi pierwiastkami obecnymi w glebie a główna część P jest wiązana zaraz po dodaniu do gleby. Z innych badań wynika (43), że z gleb uprawnych mogą być wymywane duże ilości fosforu - średnio $6 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ w ciągu roku, nawet jeśli rośliny pobierają znaczne ilości tego składnika, o czym świadczy wysoka zawartość jonów fosforanowych w odciekach glebowych. Wynoszą one, w zależności od gleby, od 0,48 do $3,54 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ i jednocześnie wskazuje to na poważne

ryzyko pogorszenia jakości wód gruntowych na obszarze tych gleb. Cwojdzinski i Majcherczak (4) badali dynamikę uwalniania składników pokarmowych z gleby na drodze wymycia i stwierdzili, że najczęściej składników ulega stratom z gleby nawożonej wysokimi dawkami NPK, stosowanymi łącznie z obornikiem. W tych warunkach wymywa się około 3- 4 razy więcej fosforu w porównaniu do obiektu bez nawożenia. Większe wymycie P i mniejsze jego wykorzystanie obserwowano po aplikacji dużej dawki obornika zabezpieczającej potrzeby pszenicy względem fosforu na kilka lat (44). Najwyższe wymycie fosforu w obiekcie z wysokimi dawkami nawozów mineralnych, w tym także P, stwierdzili również Islam i in. (17), ale w warunkach omawianego w obiektach z niższymi dawkami P w nawozach mineralnych, nawet przy dodatku obornika, stwierdzono mniejsze jego wymycie (Rys. 3).

W oparciu o dane z lat 1998-2002 przeprowadzono analizę składu wód drenarskich i z rowów melioracyjnych pobranych w ramach badań monitoringowych z gospodarstw kontrolnych rozmieszczonych na terenie całej Polski (16). Na tej podstawie stwierdzono, że wody z drenów wykazywały 2-krotnie mniejsze stężenia fosforanów niż wody z rowów melioracyjnych, niezależnie od terminu pobierania próbek. Jednak wody z drenów pobrane w okresie jesieni wykazywały większe stężenia fosforanów niż wody pobrane w okresie wiosny. Przeciętne stężenia fosforanów zmniejszały się według kolejności: wody z rowów – jesień > wody z rowów – wiosna > wody z drenów – jesień > wody z drenów – wiosna. Co ważne, większość próbek wód z drenów (73% z terminu wiosennego i 67% z terminu jesienno) nie przekraczała granicznej wartości stężeń fosforanów biorąc pod uwagę zagrożenie eutrofizacją, tj. wartości $0,7\text{mg PO}_4 \cdot \text{dm}^{-3}$. Pod tym względem stan wód z rowów melioracyjnych był gorszy ponieważ tylko połowa próbek wód pobranych w obu terminach spełniała to kryterium. Natomiast do wód o złej jakości zaliczało się około 30% próbek wód z drenów i prawie połowa wód z rowów melioracyjnych.



Rysunek 3. Łączne straty dostępnego fosforu w wyniku wymycia w zależności od nawożenia: T₀ – kontrola, T₁ – NPKS (120, 25, 60 i 20 kg · ha⁻¹), T₂ = NPKS (180, 37, 90 i 30 kg · ha⁻¹), T₃ = NPKS (90, 5, 28 i 17 kg · ha⁻¹) + obornik (2,5 t ha⁻¹), T₄ = NPKS (109, 25, 60 i 20 kg · ha⁻¹), T₅ = jak T₁ ale N podano w oprysku dolistnym.

Źródło: Islam i in., 2016 (15) zmodyfikowane

Zanieczyszczenie wód fosforanami a jakość wody pitnej

Zdaniem Igrasa (16) zdecydowana większość gleb użytkowanych do produkcji roślinnej jest narażona zarówno na wpływ czynników siedliska, jak i antropopresji. Również wody znajdujące się na tym terenie podlegają działalności człowieka. Największe znaczenie na użytkach rolnych mają zanieczyszczenia obszarowe, spływające wraz z wodą z pól uprawnych. Zanieczyszczenia te powstają na skutek niepełnego wykorzystania składników mineralnych wprowadzonych jako element produkcji na poziomie pola. Niewykorzystane składniki ulegają nagromadzeniu w glebie lub są rozpraszane do środowiska, stwarzając zagrożenie dla hydrosfery, w tym wód drenarskich (tj. wód z drenów i rowów melioracyjnych). Jest to zjawisko niepokojące ponieważ wody drenarskie znajdują się na początku szlaku migracji składników pokarmowych w zlewni. Przenoszą one składniki pokarmowe, w tym fosfor, zarówno do wód powierzchniowych, jak i wgłębnych, biorąc udział w pionowym (przez profil glebowy) lub poziomym (ze spływami podpowierzchniowymi) transporcie jonów.

Związki fosforu, podobnie jak azotu, są stymulatorem życia biologicznego w wodzie (6). Już stosunkowo małe stężenia fosforanów w wodach otwartych sprzyjają rozwojowi glonów i powodują pogorszenie właściwości użytkowych wody tj. mętność oraz zmiana barwy, smaku i zapachu a także obecność substancji toksycznych wytwarzanych przez glony (7, 10). Wzbogacenie wód w związki biogenne (głównie azot i fosfor) inicjuje ich eutrofizację czyli proces niekorzystny z ekologicznego punktu widzenia. Ma on ogromny wpływ na jakość wody wynikającą ze zmian stosunków tlenowych, życia roślin i zwierząt oraz gromadzenia substancji organicznej. Problem eutrofizacji wód powierzchniowych (wywołany dodatkowo ściekami komunalnymi dostającymi się do cieków wodnych) ma szerszy zasięg jeśli wody te stanowią jednocześnie źródło wody pitnej dla aglomeracji miejskich. Ze względu na to, że jakość wód powierzchniowych ma duże znaczenie dla gospodarki, istnieją unormowania prawne określające zarówno sposób ich monitorowania jak i ochrony (np. Ustawa z dnia 20 lipca 2017 - Prawo wodne). Zawartość fosforanów w wodach rzeki Wisłoki, pochodzących z ujęcia dla miasta Mielca, badali w latach 1997-2010 Kaniuczak i Augustyn (19). Z analizy uzyskanych danych wynika, że zawartość fosforanów (V) stopniowo obniżała się w okresie badań ponieważ w roku początkowym średnia ich zawartość wynosiła $0,318 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ a w roku końcowym $0,166 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$. Według autorów jest to wynik systematycznego rozwijania działań proekologicznych na terenie zlewni Wisłoki tj. kanalizowanie terenów wiejskich oraz budowa i modernizacja oczyszczalni ścieków. Średnia zawartość z okresu 14 lat badań wynosi $0,206 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$, co pozwala zaklasyfikować wody Wisłoki do kategorii A2/II ($0,4 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$). W ciągu tego okresu autorzy stwierdzili także występowanie maksymalnych zawartości fosforanów (V) powyżej $0,6 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$, które jednak nie wykaczały poza graniczną wartość kategorii A3/III wód powierzchniowych – $0,7 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$. Najniższe zawartości tych jonów obserwowano wiosną ($0,171 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$),

a najwyższe latem i jesienią (odpowiednio 0,208 i 0,203 mg·dm⁻³). Zdaniem autorów (19) większe zawartości fosforanów latem (i jesienią) w Wisłocie mogły być spowodowane opadami atmosferycznymi, z którymi wraz ze spływem powierzchniowym z pól spłynęło więcej tego składnika. Stwierdzono ponadto dużą zmienność zawartości fosforanów w zależności od odczynu wód Wisłoki. Na ogół wraz ze wzrostem wartości pH wody średnia zawartość fosforanów (V) obniżała się.

Fosforany a jakość wód powierzchniowych w Polsce

Z drugiej strony na obszarze Polski istnieją tereny objęte różnymi formami ochrony przyrody do których należy Dolina Biebrzy (33). Chociaż teren ten jest uznawany za czysty, to coraz więcej badań wskazuje, że wody Biebrzy okresowo zawierają podwyższone stężenia związków azotowych i fosforowych, które pochodzą zarówno ze źródeł naturalnych (torfowiska), jak i antropogenicznych (spływy powierzchniowe z obszarów rolniczych); (8). Na podstawie badań przeprowadzonych w okresie XI 2014- VI 2015 stwierdzono, że w całym sezonie badawczym najwyższymi stężeniami we wszystkich punktach pomiarowo-kontrolnych odznaczał się fosfor fosforanowy (V) (33). Zawartość P-PO₄ w wodach wahała się w przedziale od 0,07 do 2,31 mg·dm⁻³, przez co zostały przekroczone wartości graniczne przyjęte dla jakości wód (tab.1). Raube i Dembowska (33) upatrują przyczyn tej sytuacji w kilku głównych elementach, zwłaszcza w rodzaju gleby. Dolina Biebrzy charakteryzuje się glebami organicznymi, na których obserwuje się zwykle największe stężenia związków fosforu.

Tabela 1.
Wartości graniczne wskaźników jakości wody w klasach jakości wód powierzchniowych w Polsce dla PO₄ (mg·dm⁻³)

Wskaźnik jakości	Graniczne wartości w klasach I-V				
	I	II	III	IV	V
Fosforany	0,2	0,4	0,7	1,0	>1,0

Źródło: Rozporządzenie 2004 (35), zmodyfikowane

Część z tych związków przedostaje się do wód rzeki wraz z opadami atmosferycznymi i spływami. W okresie letnim, kiedy trwa wegetacja, fosfor jest pobierany przez rośliny wodne, co powoduje obniżenie jego stężenia, ale w okresie zimy na dno rzeki opada obumarła biomasa, która ulega rozkładowi, w wyniku czego stężenie fosforu w wodzie wzrasta. Kolejną przyczyną wysokiego stężenia fosforu w wodach Biebrzy jest zagospodarowanie terenów sąsiadujących z rzeką. W tym przypadku są to łąki i pastwiska dostarczające pewnych ilości nawozów naturalnych, a także zabudowa wiejska generująca dopływ do rzeki ścieków bytowych.

Udział rolnictwa w emisji fosforu do Bałtyku

Fosfor obecny w wodach użytków rolnych przedostaje się do wód powierzchniowych, stanowiących zlewnie Wisły i Odry, a z nimi przemieszcza się do wód Morza Bałtyckiego. Jak podają Kęsik i in. (20), roczny odpływ z terenu Polski fosforu całkowitego wszystkimi rzekami do Bałtyku w okresie od 1995 do 2015 r. jest szacowany na 11 445 t rocznie. Odniesienie tej wartości ładunku fosforu do powierzchni użytków rolnych w dobrej kulturze i przypisanie rolnictwu całkowitego wpływu na zanieczyszczenie wód fosforem wskazywałoby, że straty fosforu z produkcji roślinnej mogą wynosić około 0,7 kg P z 1 ha rocznie. Według literatury cytowanej przez Igrasa (16), roczne ładunki fosforu wymywane z gleb mineralnych nie są wyższe niż 1 kg P · ha⁻¹. Natomiast Koc i in. (24) przedstawili ładunki fosforu ogólnego i fosforanowego dla zróżnicowanych warunków środowiskowo- agrotechnicznych, których wartości są znacznie niższe i nie przekraczają odpowiednio 0,49 oraz 0,33 kg · ha⁻¹ · rok⁻¹ (tab. 2).

Tabela 2.

Odpływ fosforu z gleb (kg·ha⁻¹·rok⁻¹)

Obiekt	Gleba	Wyszczególnienie	P og.	P-PO ₄
Rowy (źródła)	Las	Rok wilgotny	0,19	0,14
		Rok bardzo suchy	0,16	0,10
	Pola uprawne	Rok wilgotny	0,14	0,07
		Rok bardzo suchy	0,17	0,08
	Pola uprawne i osiedla	Rok wilgotny	0,22	0,12
		Rok bardzo suchy	0,20	0,14
Dreny	Gleba lekka	Średnio	0,35	0,24
		Rolnictwo przeciętne	0,27	0,21
		Rolnictwo intensywne	0,49	0,33
		Rok wilgotny	0,36	0,25
		Rok bardzo suchy	0,31	0,18
	Gleba ciężka	Średnio	0,12	0,08
		Rolnictwo przeciętne	0,07	0,05
		Rolnictwo intensywne	0,22	0,15
		Rok wilgotny	0,15	0,10
		Rok bardzo suchy	0,03	0,02

Źródło: Koc i in., 1999 (24), zmodyfikowane

Chociaż wymywanie fosforu z gleb nie jest duże w przeliczeniu na hektar, to biorąc pod uwagę fakt, że przemieszczanie się tego pierwiastka zachodzi ciągle i dotyczy całego kraju, to sumaryczne wartości mogą być znaczące (6). Przedstawiony przez Kęsika i in. (20) dopływ fosforu z obszaru Polski do Bałtyku jest oceniany jako zbyt wysoki i stwarzający potencjalne zagrożenie dla życia biologicznego tego akwenu. Cytowani autorzy podają, że Komisja Helsińska (HELCOM) przypisuje Polsce około 36%

całkowitego ładunku fosforu wnoszonego w latach 2000-2006 drogą wodną do Morza Bałtyckiego przez wszystkie kraje nadbałtyckie (20). Choć szacowanie udziału rolnictwa w całkowitej emisji fosforu do Bałtyku z terenu naszego kraju jest trudne i skomplikowane, to jednak ostatnie analizy wskazują (20), że może on nadal wynosić 38%. Jest to wielkość znaczna o tendencjach do relatywnego wzrostu ze względu na działania ograniczające udział w tym procesie źródeł komunalnych w ogólnej ilości fosforu rozpraszanego do wód. W związku z tym Komisja Helsińska sugeruje obniżenie do roku 2021 o 51% ładunku fosforu odprowadzanego do Bałtyku z obszaru Polski (Krajowy Zarząd Gospodarki Wodnej, 2017, za: Kęsik i in. 2018 (20)).

Czynniki zwiększające wykorzystanie fosforu i metody ograniczające jego straty

Fosfor jest składnikiem niezbędnym dla wzrostu i rozwoju roślin dlatego musi być uwzględniany w planie nawożenia, jednak jego dawki powinny być dostosowane do zasobności gleby i potrzeb uprawianych roślin. Oprócz ograniczonych zasobów fosforu nawozowego, zasada ta wynika z niekorzystnego oddziaływania jego nadmiaru na jakość wód. Ponieważ wykorzystanie fosforu, w stosunku do stosowanych dawek, wciąż jest zbyt małe a straty tego składnika do środowiska są uciążliwe ekonomicznie i ekologicznie, nadal potrzebne jest poszukiwanie rozwiązań ograniczających ten problem. W dostępnej literaturze krajowej i zagranicznej kładzie się nacisk na zwiększenie wykorzystania fosforu obecnego w glebie przez rośliny uprawne, które zmniejszają pulę składnika dostającego się do wód glebowych. Do najważniejszych czynników wspomagających ten proces należy zaliczyć:

- nawożenie fosforem

Dibb i in. (5) twierdzą, że pomiędzy fosforem nawozowym, a jego koncentracją w roztworze glebowym zachodzi podstawowa zależność. Ich zdaniem niskie dawki fosforu mają niewielki wpływ na P przyswajalny w roztworze glebowym, ponieważ P nawozowy reaguje ze składnikami gleby, co czyni go mniej dostępnym dla roślin. Natomiast, aby zwiększyć dostępność P w glebie, są potrzebne znacznie większe dawki fosforu nawozowego. Jednak w obiektach ze zwiększonymi dawkami fosforu obserwowano znaczne obniżenie procentowego wykorzystania tego składnika przez rośliny.

- sterowanie efektywnością wykorzystania fosforu z nawozów

Jednym z tych działań powinno być zwiększenie efektywności wykorzystania przez rośliny fosforu z nawozów (ang. *phosphorus use efficiency* – PUE). Współczynnik ten umożliwia zarówno ocenę plonotwórczego działania nawozu fosforowego, jak i możliwą skalę jego akumulacji w glebie i wielkość strat.

Pobieranie fosforu z nawozów i jego wykorzystanie przez rośliny zależy w dużej mierze od nawożenia azotem ponieważ zależność między zawartością fosforu i azotu w glebie zalicza się do najważniejszych interakcji fosforu z innymi składnikami pokarmowymi (25). Koper i Lemanowicz (25) uważają, że stan odżywienia

rośliny azotem decyduje o pobieraniu fosforu, ponieważ związki fosforu biorą udział prawie we wszystkich etapach przemian substancji azotowych w roślinie. Powyższe stwierdzenie potwierdzają wyniki doświadczenia polowego, w którym wykazano, że wzrastające dawki azotu powodowały wzrost akumulacji fosforu w ziarnie i słomie kukurydzy, co w efekcie wpłynęło na wzrost pobrania tego składnika o około 8 kg z hektara (31).

Wielu autorów donosi także o korzystnym wpływie siarki nawozowej na zawartość fosforu przyswajalnego w glebie (30) oraz na wielkość jego pobrania i wykorzystania przez rośliny (22, 31, 43). Kukurydza nawożona dodatkowo siarką pobrała z gleby średnio 9 kg fosforu z hektara więcej niż nawożona tylko NPK (31). Dodatek siarki do nawożenia NPK, w uprawie pszenżyta jarego, spowodował także wzrost średniego pobrania fosforu przez ziarno w ilości 1,6 oraz 3,2 kg·ha⁻¹, odpowiednio dla tradycyjnej i uproszczonej uprawy gleby (22). Korzystnemu wpływowi siarki na wykorzystanie fosforu przez kukurydzę i pszenżyto ozime przypisuje się także zastosowanie superfosfatu pojedynczego w porównaniu do działania superfosfatu potrójnego (42).

Wykorzystanie fosforu z nawozów zwiększa także stosowanie preparatów zawierających kwasy humusowe, których działanie opiera się na silnych właściwościach chelatujących (26). Pozwalają one zabezpieczyć wolne wiązania jonów fosforanowych przed uwstecznianiem z jonami glinu, żelaza i wapnia. Przykładem takiego preparatu jest ROSAHUMUS. Preparat ten ulepsza wiele cech gleby, które wpływają na udostępnianie fosforu roślinom uprawnym. Należy do nich poprawa struktury, warunków wodno-powietrznych, pobierania i wykorzystania składników pokarmowych, zwiększanie pojemności wodnej gleby i pobudzanie aktywności mikrobiologicznej.

- utrzymanie aktywności mikrobiologicznej gleby

Istotnym elementem wpływającym na dostępność fosforu dla roślin jest aktywność mikrobiologiczna. Zdaniem Kozery (26) zawartość fosforu organicznego w glebach wynosi od 25 do 50 %, a według Adesemoye i Kloepper (1) nawet 30-65 % ogólnej zawartości składnika. Jednak zanim fosfor w formie organicznej będzie mógł być pobrany przez rośliny, musi przejść proces zamiany w formę nieorganiczną lub kwas organiczny o niskiej masie molekularnej. Zatem jego dostępność dla roślin zależy od tempa mineralizacji czyli szybkości procesu uwalniania składników pokarmowych z glebowej materii organicznej na drodze utleniania związków węgla. Jest on katalizowany przez enzymy produkowane przez bakterie z grupy: *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Rhizopus*, *Penicillus* i *Aspergillus*. Obecnie dostępne są preparaty stymulujące rozwój bakterii *Pseudomonas putida* (np. DELSOL), które powodują rozwój systemu korzeniowego oraz aktywizują życie biologiczne gleby (26).

- Zdaniem Hasana i in. (15) zdolność do poprawy PUE wymaga przejścia od wiedzy o mechanizmach molekularnych i architekturze roślin do strategii praktycznych. Muszą one zawierać:

1. wykorzystanie symbiozy grzybów mikoryzowych AMF (ang. *Arbuscular Mycorrhizal Fungi*) dla efektywnego pobierania fosforu, która może poprawić dostępność P przez zwiększenie powierzchni absorpcji składnika dzięki tworzeniu strzępek grzybni (40). W tej symbiozie składniki pobrane ze środowiska glebowego przez AMF są przenoszone do roślin, a w zamian grzyby otrzymują od rośliny węgiel. Mikoryza występuje u 60-80% roślin a więc u większości gatunków (15). Wykazano, że rośliny zainfekowane przez grzyby wykazują dużo większe zdolności przyswajania wody i składników pokarmowych, w tym głównie fosforu. W efekcie oceniono, że dopływ fosforu w korzeniach roślin skolonizowanych przez grzyby mikoryzowe może być od 3 do 5 razy większy niż w korzeniach roślin bez mikoryzy (39).
 2. uprawę współrzedną z odpowiednim gatunkiem aby osiągnąć aktywację fosforu i jego mobilizację w glebie. Do roślin o dużym systemie korzeniowym, który ma silne właściwości stymulujące pobieranie fosforu poprzez wydzielanie enzymu kwaśnej fosfatazy, protonów i/albo karboksylanów w rizoferze należy np. kukurydza. Z kolei rośliny strączkowe wydzielają więcej kwasów organicznych w celu zwiększenia rozpuszczalności fosforu w rizoferze, tj. cytryniany wydzielane przez łubin biały czy maloniany wydzielane przez ciecierzycę.
 3. hodowlę genotypów bardziej wydajnych pod względem zaopatrzenia w fosfor (40). Według Shena i in. (40) w Chinach dokonał się wielki rozwój w kierunku selekcji odmian roślin zdolnych do wysokiej efektywności wykorzystania fosforu. Jako przykład podawana jest pszenica odmiany Xiaoyan54, która wydziela z korzeni do rizoferu więcej kwasów organicznych (tj. jabłczan) niż genotypy nieefektywne. Integracja genetycznie ulepszonych P-efektywnych roślin z zaawansowanym zarządzaniem fosforem w systemie gleba-roślina jest ważna dla poprawy efektywności wykorzystania składnika pokarmowego i integrowanej produkcji roślinnej.
- stosowanie najlepszych praktyk zarządzania składnikiem – BMPs (ang. *best management practices*).

Według Robertsa i Johnstona (34) poprawa wykorzystania nawozowego P jest najbardziej możliwa do osiągnięcia po wprowadzeniu najlepszych praktyk zarządzania fosforem w odniesieniu do czterech zasad zarządzania składnikiem (ang. *4R Nutrient Stewardship*). Najlepsze praktyki zarządzania są opisywane jako naukowo udowodnione badania i praktyki testowane w gospodarstwach, które optymalizują potencjał produkcyjny, efektywność nakładów i ochronę środowiska. Nie ma jednak jednego zbioru uniwersalnych praktyk BMPs ponieważ są one specyficzne dla danego miejsca i rośliny przez co mogą się różnić w zależności od regionu, gospodarstwa, typu gleby, warunków klimatycznych, rośliny i historii uprawy oraz w zależności od doświadczenia rolnika. Natomiast zasady zarządzania składnikiem obejmują najlepsze nawozowe praktyki zarządzania (BMPs) i mają na celu zachęcać rolników do stawiania pytań czy w odniesieniu do systemu uprawy używają właściwego nawozu, stosują go we właściwej dawce, we właściwym czasie i właściwym miejscu (tj. umiejscowieniu).

Podsumowanie

Fosfor, obok azotu i potasu, należy do głównych składników pokarmowych warunkujących nie tylko prawidłowy wzrost i rozwój roślin ale także wysokość i jakość ich plonu. Jednak z licznych badań oraz ekspertyz naukowych wynika, że zarządzanie tym składnikiem w rolnictwie jest trudne i często niewłaściwe co powoduje straty ekonomiczne oraz zagrożenia środowiskowe. Wyniki badań przedstawione w niniejszej pracy wskazują, że proces pobierania fosforu, od poziomu komórki do całej rośliny, napotyka wiele utrudnień natury energetycznej i glebowo-klimatycznej, a także problemów wynikających z działalności człowieka. W celu poprawy efektywności pobierania i wykorzystania tego składnika przez rośliny są podejmowane różnorodne działania wynikające z najnowszych badań naukowych. W sytuacji zmniejszających się zasobów fosforu nawozowego oraz wciąż utrzymującego się niedopuszczalnie wysokiego zanieczyszczenia wód powierzchniowych fosforem pochodzącym z rolnictwa, takie podejście jest konieczne i właściwe.

Literatura

1. Adesemoye A.O., Kloepper J.W.: Plant-microbes interactions in enhanced fertilizer-use efficiency. *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 2009, **85**: 1-12.
2. Boratyński K., Czuba R., Goralski J.: *Chemia rolnicza*, PWRiL, 1988.
3. Ciereszko I.: Czy można usprawnić pobieranie fosforanów przez rośliny? *Kosmos*, 2005, **54**, **4**: 391-400.
4. Cwojdzński W., Majcherczak E.: Badania dynamiki uwalniania składników pokarmowych z gleby na drodze wymywania. *Zesz. Probl. Post. Nauk Roln.*, 1993, **411**: 107-112.
5. Dibb D.W., Fixen P.E., Murphy L.S.: Balanced fertilization with particular reference to phosphates: interaction of phosphorus with other inputs and management practices. *Fertilizer Research*, 1990, **26**: 29-52.
6. Filipek T.: Zarządzanie zasobami fosforu w środowisku rolniczym. *Nawozy i Nawożenie*, 2002, **4(13)**: 247-258.
7. Fotyma M.: Zrównoważona gospodarka fosforem w rolnictwie polskim. *Nawozy i Nawożenie*, 2002, **4(13)**: 160-172.
8. Frąk M.: Zanieczyszczenia bakteriologiczne w ocenie jakości wód Biebrzy. *Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie*, 2010, **10(2)**: 73-82.
9. Gaj R.: Zrównoważona gospodarka fosforem w glebie i roślinie w warunkach intensywnej produkcji roślinnej. *Monografia, Nawozy i Nawożenie*, 2008, **33**, ss. 143.
10. Gałczyńska M., Wybieralski J., Siwek H.: Wpływ zawartości związków fosforu i azotu na proces eutrofizacji wód powierzchniowych na terenach rolniczych Zachodniego Pomorza. *Nawozy i Nawożenie*, 2002, **4(13)**: 262-269.
11. Giza-Podleśna A.: Dynamika przyrostu masy i pobierania składników pokarmowych przez pszenżyto ozime w porównaniu z pszenicą i żytem. *Praca doktorska – maszynopis*, 1993, IUNG Puławy.
12. Gondek K., Kopeć M.: Wpływ nawożenia na wymywanie wybranych składników pokarmowych roślin w doświadczeniu wazonowym. *Acta Agrophys.*, 2008, **12(1)**: 79-89.
13. Grzebisz W., Potarzycki J.: Czynniki kształtujące pobieranie fosforu przez roślinę. *J. Element.*, 2003, **8(3) Suppl.**: 47-59.
14. Grzebiesz W., Potarzycki J., Biber M., Szczepaniak W.: Reakcja roślin uprawnych na nawożenie fosforem. *J. Element.*, 2003, **8(3) Suppl.**: 83-93.

15. Hasan Md. M., Hasan Md. M., Teixeira da Silva J.A., Li X.: Regulation of phosphorus uptake and utilization: transitioning from current knowledge to practical strategies. *Cellular & Molecular Biology Letters*, 2016, **21(7)**, DOI 10.1186/s11658-016-0008-y.
16. Igras J.: Zawartość składników mineralnych w wodach drenarskich użytków rolnych w Polsce. Monografie i Rozprawy Naukowe, 2004, **13**, IUNG Puławy.
17. Islam M.N., Rahman M.M., Mian M.J., Ali M.H.: Effect of fertilizer management on NPKS leaching loss from sandy loam soil under alternate wetting and drying condition. *Bangladesh Rice J.*, 2016, **20 (1)**: 59-64.
18. Jadczyzsyn J., Mroczkowski W., Gosek S.: Erozyjne straty fosforu w doświadczeniu modelowym. *Inżynieria i Ochrona Środowiska*, 2014, **17(1)**: 89-103.
19. Kaniuczak J., Augustyn Ł.: Zawartość związków azotowych i fosforanów w wodach powierzchniowych przeznaczonych do zaopatrzenia ludności w wodę do spożycia. *Inżynieria Ekologiczna*, 2011, **27**: 46-59.
20. Kęsik K., Jadczyzsyn T., Jurga B., Kopiński J.: Poziom szacowanego odpływu fosforu do Bałtyku a krajowy bilans tego składnika w rolnictwie polskim. W: Aktualne problemy nawożenia, *Studia i Raporty IUNG-PIB*, 2018, **56(10)**: 21-33 .
21. Khan A., Lu G., Zhang H., Wang R., Lv F., Yang X., Sun B., Zhang S.: Phosphorus efficiency, soil phosphorus dynamics and critical phosphorus level under long-term fertilization for single and double cropping system. *Agriculture, Economics and Environment*, 2018, **256**: 1-11.
22. Klikocka H., Szostak B., Gaj R., Głowacka A., Narolski B.: Pobranie fosforu z ziarnem pszenżyta jarego na tle uprawy roli i nawożenia mineralnego oraz właściwości chemicznych gleb. *Polish Journal of Agronomy*, 2015, **21**: 3-10.
23. Koc J., Skwierawski A.: Wskaźniki ilościowe i uwarunkowania przemieszczania się fosforu ze zlewni rolniczych do wód powierzchniowych. *Prace Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu, Chemia*, 2008, **4(1204)**: 122-140.
24. Koc J., Szymczyk S., Procyk Z.: Czynniki kształtujące wymywanie azotu, fosforu i potasu z gleb uprawnych. *Zesz. Probl. Post. Nauk Roln.*, 1999, **467**: 119-125.
25. Koper R., Lemanowicz J.: Wpływ zróżnicowanego nawożenia azotem mineralnym na zmiany zawartości fosforu w glebie i roślinie. *Proceedings of ECOpole* , 2007, **1, 1/2**: 153-157.
26. Kozera A.: System ochrony fosforu w glebie. *Portal Agrotechnika, Hortpress*, <http://agro-technika.pl/system-ochrony-fosforu-w-glebie>.
27. Mengel K., Kirkby E.A.: *Podstawy żywienia Roślin*. PWRiL, 1983, Warszawa.
28. Nielsen K.F., Halstead R.L., MacLean A.J., Bourget S.J., Holmes R.M.: The influence of soil temperature on the growth and mineral composition of corn, bromegrass and potatoes. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* **25**: 369-372.
29. Nowotny-Mieczyńska A.: Fosfor W: *Fizjologia mineralnego żywienia roślin*. A. Nowotny-Mieczyńska (red.). PWRiL, Warszawa, 1976: 78-124.
30. Podleśna A.: Changes of phosphorus concentration in soils under the influence of fertilization with sulfur and farmyard manure. *Conf. Materials "Protection of soil functions – challenges for the future"* 15-18.10.2013, Puławy, Poland: 228-230.
31. Podleśna A., Podleśny J., Klikocka H.: Wpływ nawożenia siarką i azotem na azotowo-fosforową gospodarkę kukurydzy. *Przem. Chem.*, 2017, **96/6**: 1374-1377.
32. Ragnothama K.G.: Phosphate transport and signaling. *Curr. Opin. Plant Biol.*, 2000, **3**:182-187.
33. Rauba M., Dembowska D.: Ocena stężeń związków azotu i fosforu w wodach środkowego basenu rzeki Biebrza. *Inżynieria Ekologiczna*, 2018, **19(3)**: 62-68.
34. Roberts T.L., Johnston A.E.: Phosphorus use efficiency and management in agriculture. *Resources, Conservation and Recycling*, 2015, **105**: 275-281.
35. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 11 lutego 2004 r. w sprawie klasyfikacji dla prezentowania stanu wód powierzchniowych i podziemnych, sposobu prowadzenia monitoringu oraz sposobu interpretacji wyników i prezentacji stanu tych wód. <https://www.prawo.pl/akty/dz-u-2004-32-284,17079154.html>
36. Ruzkowska M., Rębowska Z., Gliński J., Baran S.: Dynamika i bilans składników pokarmowych w doświadczeniu lizymetrycznym. *Rocz. Nauk Roln., Seria Monografie*, 1979, **t. 173**.

-
37. Sapek B.: Uwalnianie azotu i fosforu z materii organicznej gleby. Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie, 2010, **T.10, Z.3 (31)**: 229-256.
 38. Sapek B.: Nagromadzenie i uwalnianie fosforu w glebach – źródła, procesy, przyczyny. Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie, 2014, **T.14, Z.1 (45)**: 77-100.
 39. Schachtman D.P., Reid R., Ayling S.M.: Phosphorus uptake by plants: From Soil to Cell. *Plant Physiol.*, 1998, **116**: 447-453.
 40. Shen J., Yuan L., Zhang J., Li H., Bai Z., Chen X., Zhang W., Zhang F.: Phosphorus dynamics: From soil to plant. *Plant Physiol.*, 2011, **156**: 997-1005.
 41. Sztuder H.: Produkcyjna i ekologiczna ocena różnych sposobów aplikacji nawozów w uprawie pszenicy ozimej. *Inż. Roln.*, 2007, **3(91)**: 167-172.
 42. Tujaka A., Gosek S.: Wykorzystanie fosforu w zależności od wielkości dawki i formy nawozu fosforowego. *Fragm. Agron.*, 2009, **26(2)**: 158-164.
 43. Ulén B.: Leaching and balances of phosphorus and other nutrients in lysimeters after application of organic manures or fertilizers. *Soil Use and Management*, 1999, **15**: 56-61.
 44. Ulén B., Wesstrom I., Johansson G., Forsberg L.S.: Recession of phosphorus and nitrogen concentrations in tile drainage water after high poultry manure application in two consecutive years. *Agric. Water Manage.*, 2014, **146**: 208-217.
 45. Żebrowska E., Ciereszko I.: Pobieranie i transport fosforanów w komórkach roślin. *Postępy Biologii Komórki*. 2007, **34(2)**: 283-298.
-

Adres do korespondencji:

dr hab. Anna Podleśna, prof. IUNG-PIB
Zakład Żywienia Roślin i Nawożenia
IUNG-PIB
ul. Czartoryskich 8, 24-100 Puławy
tel. 81 4786 835
e-mail: ap@iung.pulawy.pl

AUTOR

Anna Podleśna

ORCID

0000-0001-5652-8881