

Wpłynęło 02.10.2013 r.
Zrecenzowano 11.12.2013 r.
Zaakceptowano 10.01.2014 r.

A – koncepcja
B – zestawienie danych
C – analizy statystyczne
D – interpretacja wyników
E – przygotowanie maszynopisu
F – przegląd literatury

NAGROMADZANIE I UWALNIANIE FOSFORU W GLEBACH – ŹRÓDŁA, PROCESY, PRZYCZYNY

Barbara SAPEK^{ABDEF}

Instytut Technologiczno-Przyrodniczy w Falentach, Zakład Ochrony Jakości Wody

Streszczenie

Na podstawie przeglądu literatury przedmiotu przedstawiono źródła, procesy oraz ich mechanizmy, a także przyczyny i skutki nagromadzania i uwalniania fosforu w glebach, ze szczególnym uwzględnieniem gleb użytkowanych łąkowo. Celem opracowania było pogłębianie wiedzy o zachowaniu się fosforu w glebach i jego dalszych losach w środowisku, zwłaszcza w aspekcie jego przenikania do wód w zmieniających się warunkach gospodarki na świecie, również w Polsce. Omówiono propozycje zrównoważonego gospodarowania tym składnikiem w środowisku. Z dokonanego przeglądu wynika konieczność ograniczenia nawożenia fosforem tylko do gleb ze swej natury mało zasobnych oraz zubożałych w ten składnik. Wymaga to weryfikacji i dalszego rozwoju testów oceny dostępności dla roślin rezerw fosforu w glebach spod różnych upraw oraz z terenów łąkowych. W tym celu niezbędne jest prowadzenie badań podstawowych, między innymi w zakresie możliwości dostosowania mechanizmów pobierania przez rośliny fosforu z gleby z uwzględnieniem wpływu drobnoustrojów oraz mikrofauny glebowej. Ponadto istnieje potrzeba rozwoju badań stosowanych w zakresie wykorzystania fosforu z recyklingu materiałów organicznych do wzbogacenia gleb ubogich w ten składnik.

Słowa kluczowe: mechanizm procesu, nagromadzenie i uwalnianie fosforu w glebach, wymywanie do wód, zrównoważone gospodarowanie fosforem w środowisku

WSTĘP

Oddziaływanie fosforu jako czynnika powodującego eutrofizację wód jest zagadnieniem szeroko opisywanym od wielu lat i wciąż aktualnym [DOMAGALSKI, JOHNSON 2012; HAYGARTH 2000; MCDOWELL i in. 2011; RIEMERSMA i in. 2006;

Do cytowania For citation: Sapek B. 2014. Nagromadzenie i uwalnianie fosforu w glebach – źródła, procesy, przyczyny. Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie. T. 14. Z. 1(45) s. 77–100.

SAPEK A. (red.) 1998; SAPEK, SAPEK 2005; STEINECCK i in. 2000; TUNNEY 2000]. Intensyfikacja produkcji rolniczej i zwiększenie zużycia nawozów fosforowych, mimo znacznego ograniczenia w ostatnim 20-leciu, spowodowały szeroką dyskusję odnośnie do zachowania się fosforu w środowisku, bowiem zaobserwowano w nim nadmierne rozproszenie tego składnika [SAPEK A. 2008; SAPEK, SAPEK 2004; STEINECCK i in. 2000]. Fosfor jako jeden z podstawowych składników pokarmowych organizmów żywych, obok azotu i potasu, okazał się czynnikiem wpływającym na środowisko również ujemnie [SAPEK A. 2007; 2008; TIESSEN i in. 2011]. Jednym z głównych źródeł rozproszenia fosforu jest jego nadmierne nagromadzenie w glebach, w tym również użytków zielonych, a zwłaszcza pastwisk [DAO, SHWARTZ 2011; RIEMERSMA i in. 2006; SAPEK A. 2007; SAPEK, SAPEK 2004]. Proces ten zależy od właściwości fizyczno-chemicznych gleby, związanych z obszarem geograficznym i budową geologiczną, rodzajem gleby oraz sposobem jej użytkowania [GAJ 2008; JOUANY i in. 2011; KALEMBASA, BECHER 2010; LIU i in. 2012; WESOŁOWSKI, DURKOWSKI 2004]. Opad atmosferyczny i zawarty w nim ładunek fosforu jest dodatkowym źródłem wzbogacania gleb w ten składnik [RIEMERSMA i in. 2006; SAPEK, SAPEK 2011]. Obecnie nie bez znaczenia staje się wzbogacanie gleby w fosfor wprowadzany do niej w postaci różnego rodzaju odpadów, zarówno z produkcji rolnej, jak i przemysłowej oraz ścieków i osadów [RIEMERSMA i in. 2006; SAPEK A. 2013]. Na tym tle gospodarowanie fosforem nagromadzonym w glebie i procesy jakim ten składnik ulega, zarówno w aspekcie wykorzystania przez rośliny, jak i zrównoważonej produkcji plonów dobrej jakości, jest nadal jednym z podstawowych problemów środowiskowych [BUENEMANN i in. (red.) 2011; DOMAGALSKI, JOHNSON 2012; RIEMERSMA i in. 2006; SIMS i in. 2000; University of Hawaii 2007].

Fosfor nagromadzony w glebie, w zależności od natury jego wiązania (fizycznej czy chemicznej) oraz warunków glebowo-wodnych, może ulec w niej uwolnieniu i przekształceniu do form, które mogą być z niej wymywane w głąb profilu lub – w wyniku spływu powierzchniowego i podpowierzchniowego – do wód glebowych i otwartych [DJODJIC i in. 2004; DOMAGALSKI, JOHNSON 2012; HAYGARTH 2000; MCDOWELL i in. 2011; RIEMERSMA i in. 2006; SAPEK 2012; TUNNEY 2000; VADAS i in. 2005]. Procesy i mechanizmy nagromadzania fosforu oraz jego uwalniania i wymywania z gleby są złożone i zależą od wielu czynników [RIEMERSMA i in. 2006; SAPEK B. 2012]. Jednymi z najważniejszych są: odczyn, zawartość materii organicznej, zwłaszcza jej formy rozpuszczalnej, oraz zawartość form żelaza i glinu w glebie, a także gospodarowanie azotem [HAYGARTH 2000; LI i in. 2009; MORRIS, HESTERBERG 2010; SAPEK B. 2010; TATE, SALCEDO 1988].

Intensywne przemiany przebiegające w środowisku wskutek zmieniających się warunków gospodarki na świecie, również w Polsce, wymagają ciągłego pogłębiania wiedzy o zachowaniu się fosforu w glebach i jego dalszych losach w środowisku, zwłaszcza w aspekcie jego przenikania do wód, oraz inspirują badania i dyskusje w zakresie tego zagadnienia. W niniejszej pracy, na podstawie przeglądu lite-

ratury przedmiotu, przedstawiono i omówiono źródła, procesy oraz ich mechanizmy, a także przyczyny i skutki nagromadzania i uwalniania fosforu w glebach, ze szczególnym uwzględnieniem gleb użytkowanych łąkowo.

Na tym tle zaprezentowano propozycje zrównoważonego gospodarowania tym składnikiem w środowisku.

NAGROMADZANIE FOSFORU W GLEBACH

ŹRÓDŁA I PRZYCZYNY NAGROMADZANIA FOSFORU W GLEBACH

Podstawowym, naturalnym źródłem fosforu w glebie jest skała macierzysta i zawarte w niej minerały fosforowe. Do najważniejszych z nich zalicza się fluoroapatyt – $3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot \text{CaF}_2$ i hydroksyapatyt – $3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot \text{Ca}(\text{OH})_2$ [GORLACH 2002; POLAŃSKI, SMULIKOWSKI 1969]. O naturalnej zasobności gleby w fosfor w głównej mierze stanowi zawartość tego składnika w skale macierzystej, z której gleba została wytworzona. Ten wpływ ilustrują przykłady gleb, takich jak np. rędzina wytworzona z trawertynu o około rząd wielkości uboższa w fosfor ($0,192 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) w porównaniu z rędziną wytworzoną z utworu dewońskiego ($2,799 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) lub czarnoziem wytworzony z lessu ($0,655 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) i z gliny zwałowej moreny dennej ($0,170 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) (tab. 1). Przykładem wpływu naturalnych zasobów tego składnika może być również zróżnicowanie jego rezerw w glebie wyróżnionych stref Ukrainy. Najmniej zasobne w fosfor rozpuszczalny w $0,2 \text{ M HCl}$ są gleby darniowo-bielicowe, zawierające w warstwie $0\text{--}20 \text{ cm}$ średnio $5,67 \text{ mg P} \cdot \text{kg}^{-1}$, a najzasobniejsze – czarnoziemy typowe i gleby kasztanowe ($19,67 \text{ mg P} \cdot \text{kg}^{-1}$) [TCYMBALUK 1998].

Tabela 1. Zawartość fosforu w glebach Polski wytworzonych z różnych skał macierzystych¹⁾

Table 1. Phosphorus content in Polish soils generated from different parent rocks¹⁾

Gleba Soil	Skała macierzysta Parent rock	Warstwa gleby Soil layer cm	pH _{KCl}	Zawartość P ²⁾ Content of P ²⁾ g·kg ⁻¹
1	2	3	4	5
Ranker Leptosol	łupek kambryjski Cambrian shale	5–15	3,9	0,742
Ranker Leptosol	piaskowiec permski Permian sandstone	0–20	4,7	0,306
Rędzina Leptosol	utwór trzeciorzędowy Tertiary formation	5–15		1,000
Rędzina Leptosol	utwór kredowy Cretaceous formation	0–10		0,415
Rędzina Leptosol	utwór jurajski Jurassic formation	10–20		0,699

cd. tab. 1

1	2	3	4	5
Rędzina	utwór dewoński			
Leptosol	Devonian formation	0–15		2,799
Rędzina	opoka kredowa			
Leptosol	Cretaceous rock	0–20	6,8	0,524
Rędzina	trawertyn			
Leptosol	travertine	4–9	7,2	0,192
Czarnoziem leśno-stepowy	less			
Forest-steppe chernozem	loess	5–15		0,655
Czarnoziem leśno-łąkowy	glina zwałowa moreny dennej			
Forest-meadow chernozem	boulder clay of bottom moraine	5–15	5,0	0,170
Gleba brunatna	less	5–15		
Cambisol	loess	frakcja < 2 mm	5,95	0,249
Gleba brunatna	opoka kredowa odwapniona			
Cambisol	decalcified Cretaceous rock	0–10	5,9	0,131
Gleba brunatna, kwaśna	flisz karpacki	10–2		
Cambisol, acidic	Carpathian Flysch	frakcja < 1 mm	3,6	0,306
Gleba płowa (lessivé)	less	5–15		
Luvisol	loess	frakcja < 1 mm		0,231
Gleba płowa	utwór pyłowy ilasty			
Luvisol	silty clayey formation	5–15	4,3	0,262
Czarna ziemia ³⁾	glina zwałowa lekka			
Chernozem ³⁾	light boulder loam	0–20	7,6	0,450
Czarna ziemia ³⁾	ił			
Chernozem ³⁾	clay	3–10	7,1	0,192
Gleba rdzawa właściwa	piasek wydmy			
Proper rusty soil	dune sand	0–15	4,0	0,175
Gleba bielkowa właściwa	piasek wydmy			
Proper podsol	dune sand	3–19	3,3	0,306
Bielica żelazisto-próchniczna	piasek trzeciorzędowy			
Ferric-humic podsol	Tertiary sand	0–15	3,2	0,44
Gleba torfowo-murszowa	torf			
Histosol	peat	0–10	5,6	1,57
Gleba torfowo-murszowa	torf mechowiskowy			
Histosol	moss peat	0–7		2,06
Gleba torfowo-murszowa	torf turzycowiskowy			
Histosol	sedge peat	0–7		2,40

¹⁾ W przypadku gleb torfowo-murszowych miejsce skały macierzystej zajmuje rodzaj torfu, z którego wytworzyła się gleba.

²⁾ Zawartość całkowita fosforu – P, przeliczona z formy tlenkowej P₂O₅.

³⁾ Zawartość rozpuszczalna w 20% HCl.

¹⁾ In the case of peat-muck soils, parent rock is replaced by the kind of peat the soil was made of.

²⁾ Total content of phosphorus – P, recalculated from oxide form – P₂O₅.

³⁾ Content soluble in 20% HCl.

Źródło: opracowanie własne na podstawie ZAWADZKI (red.) [1999]; KRÓLIKOWSKI, ADAMCZYK (red.) [1986]; SAPEK B. [niedatowane].

Source: own studies after ZAWADZKI (red.) [1999]; KRÓLIKOWSKI, ADAMCZYK (red.) [1986]; SAPEK B. [niedatowane].

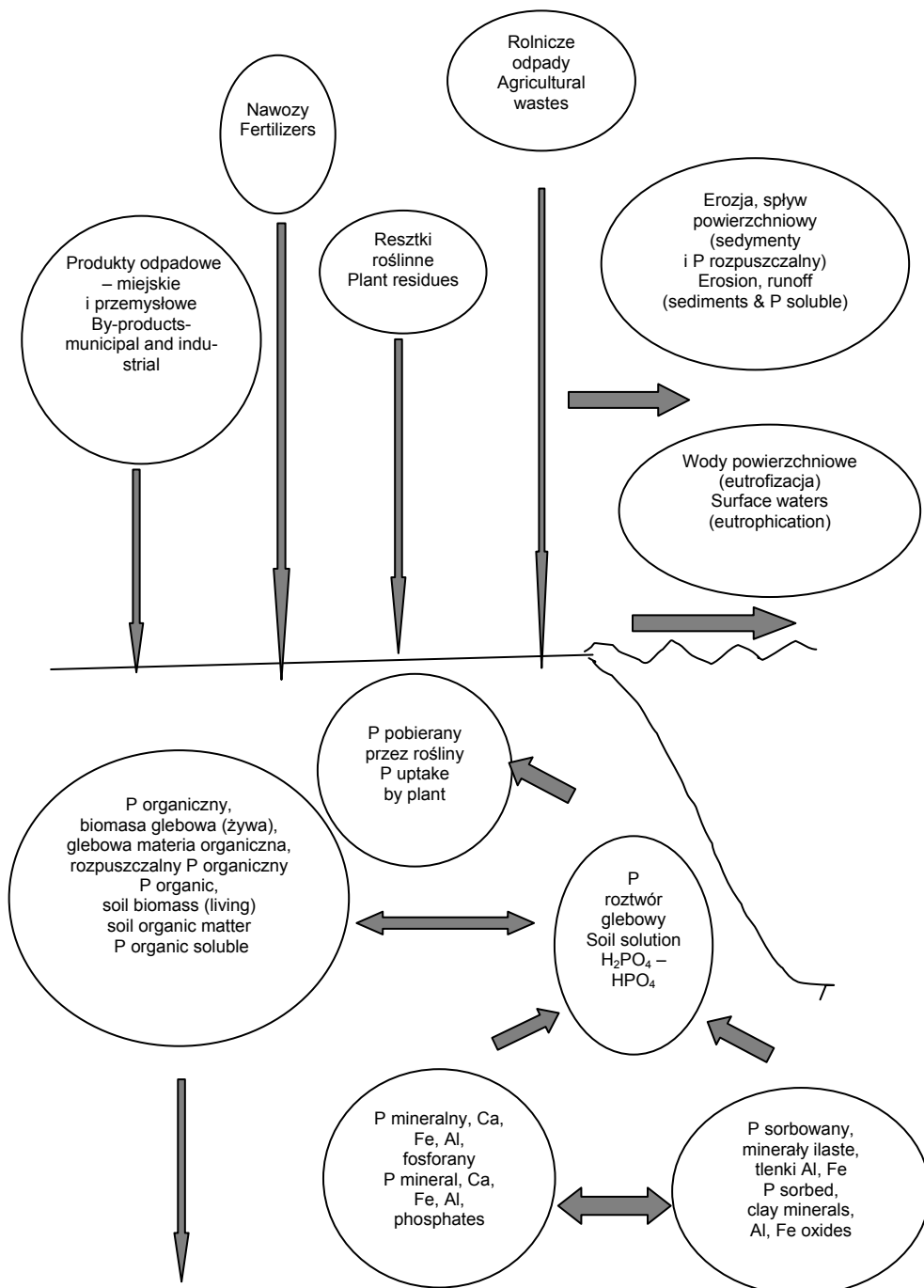
We wszystkich minerałach skorupy ziemskiej fosfor występuje wyłącznie w formie pięciowartościowej, jako fosforany (V) – anion PO_4^{3-} [POLAŃSKI, SMULIKOWSKI 1969]. Spośród skał osadowych najwięcej fosforu zawierają utwory ilaste, a najmniej – piaszczyste (odpowiednio 0,70 i 0,17 g P·kg⁻¹). Najzasobniejsze w ten składnik są osadowe skały fosforanowe. Wśród nich wyróżniają się guano i fosforyty oraz utwory wiwianitowe, które występują wraz z rudami darniowymi na terenach podmokłych i bagnach [KONECKA-BETLEY 1999; POLAŃSKI, SMULIKOWSKI 1969]. Skały te, zwłaszcza fosforyty, są jednocześnie wykorzystywane jako nawozy fosforowe, bowiem zawarty w nich fosfor jest niezbędnym czynnikiem prawidłowego wzrostu roślin i rozwoju żywych organizmów [BALEMIL, NEGISHO 2012; NOWOTNY-MIECZYŃSKA 1976; SYNAL, DE DATTA 1991].

W przedstawionym w pracy MULLINSA [2009] obiegu fosforu w glebie uwzględniono cztery źródła nagromadzania w niej tego składnika – nawozy, resztki roślinne, odpady rolnicze (w tym odchody zwierzęce) oraz miejskie i przemysłowe produkty uboczne (rys. 1).

W warunkach intensyfikacji produkcji rolniczej i konsumpcji głównym źródłem wzbogacania gleb uprawnych w fosfor są nawozy fosforowe [MULLINS 2009; SAPEK A. 2007]. W przeciwieństwie do azotu, fosfor wprowadzony do gleby i wyniesiony z niej z plonem roślin lub w wyniku erozji, spływu powierzchniowego czy wymycia może być uzupełniony jedynie ze źródeł zewnętrznych [SYNAL, DE DATTA 1991]. Ze względu na to, że pokłady fosforytów są intensywnie eksploatowanymi zasobami nieodnawialnymi, gospodarowanie nimi jest strategicznym problemem w produkcji rolniczej [BALEMIL, NEGISHO 2012; SYNAL, DE DATTA 1991; VAN KAWENBERGH i in. 2013].

Kolejnym czynnikiem wzbogacającym gleby jest fosfor zawarty w roślinach, który wraca do niej w postaci resztek poźniwnych, obornika, kompostów oraz różnego rodzaju odpadów produktów rolniczych wchodzących w skład łańcucha pokarmowego [BALEMIL, NEGISHO 2012; MULLINS 2009; SAPEK A. 2007; SAPEK, SAPEK 2004; STEINECK i in. 2000] (rys. 1). Większość fosforu z tych materiałów wchodzi w skład glebowej materii organicznej i w procesie jej przemian, także z udziałem mikroorganizmów glebowych, tworzy organiczne związki już odporne na mikrobiologiczny rozkład (rys. 1). W glebach użytkowanych łąkowo źródłem fosforu jest również warstwa darni ulegająca przemianom, zwłaszcza degradacji. Badania LI i in. [2009] wykazały m.in. złożony mechanizm wpływu degradacji środowiska wywołanej ingerencją człowieka, różnorodności roślin, użytkowania łąkowego, a także podatności gleb na erozję, na akumulację i dynamikę fosforu w wierzchniej 20 cm warstwie gleby ekosystemów łąkowych zlokalizowanych w półpustynnym obszarze Chin.

Przedmiotem badań ZHANGA i in. [2011] był wpływ rodzaju okrywy roślinnej na formy oraz zawartość fosforu w wierzchniej warstwie (0–20 cm) gleby w pobliżu lasów alpejskich, na Płaskowyżu Tybetańskim. Oceniono udział poszczególnych form fosforu w glebach siedlisk lasów szpilkowych, zakrzaceń oraz łąk zakrza-



Rys. 1. Obieg fosforu w glebie; źródło: opracowanie własne na podstawie MULLINS [2009]

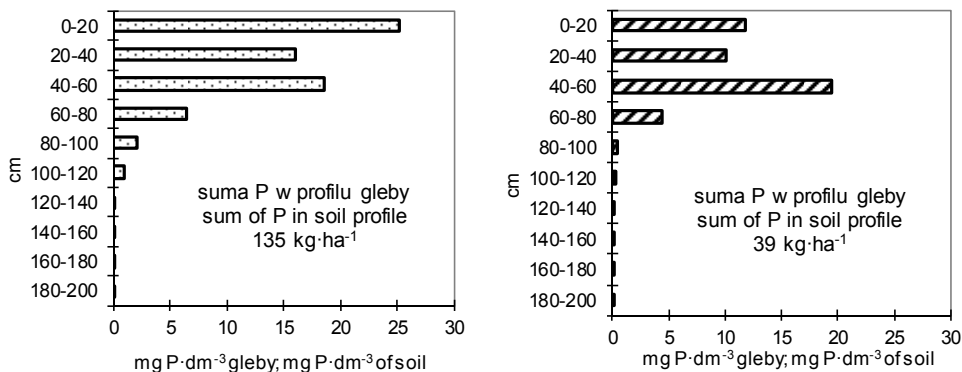
Fig. 1. Phosphorus cycling in soil; source: own elaboration after MULLINS [2009]

zonych. W badaniach stosowano metodę frakcjonowania za pomocą wymienniacza jonowego oraz ekstrakcję roztworami NaHCO_3 , NaOH i HCl . Autorzy wykazali, że w tym alpejskim rejonie zmiana okrywy roślinnej od podalpejskich lasów szpilkowych, przez alpejskie zakrzaczenia, do alpejskich łąk zakrzaczonych może zmniejszyć wiązanie fosforu w glebie, jego dostępność oraz zaopatrzenie gleby w ten składnik.

Złożoność współdziałania układu gleba – roślina w ekosystemach łąkowych wymaga badań biologicznego cyklu fosforu w odniesieniu do cyklu azotu. JOUANY i in. [2011], a także MASSEY [2012] oceniali względną reakcję użytku zielonego na działanie fosforu w odniesieniu do zmian stanu odżywiania roślin fosforem i azotem. Autorzy stwierdzili, że duża różnorodność gatunkowa zbiorowiska łąkowego wpływa na cykl biologiczny składników pokarmowych i reguluje ich biogeochemiczny obieg. W celu uzyskania lepszego rozpoznania złożoności procesów towarzyszących obiegowi fosforu i azotu na spaszanych użytkach zielonych wymagane są dalsze badania wpływu na ten obieg spaszania paszy łąkowej.

Odchody zwierząt, będące od wieków nawozem naturalnym lecz również cennym odpadem rolniczym, są źródłem fosforu w glebie użytkowanej pastwiskowo (rys. 1). Zawarty w nich (zwłaszcza w moczu) azot sprzyja tworzeniu rozpuszczalnej formy fosforu, który przenika do głębszych warstw profilu gleby i zagraża wzbogaceniem wody gruntowej w ten składnik [MULLINS 2009; SAPEK B., WOŁICKA 2006; WESOŁOWSKI, DURKOWSKI 2004] (rys. 1). Odchody zwierząt w formie obornika, gnojówki oraz gnojowicy, magazynowane na terenie zagrody wiejskiej i w jej sąsiedztwie, są źródłem nagromadzania znacznych ilości fosforu w profilach gleb na tych terenach. Jak wykazano, w warunkach gospodarstw demonstracyjnych z terenu województwa toruńskiego, w profilu gleby przy płycie obornikowej zawartość fosforu rozpuszczalnego w 0,5 M HCl w warstwie 0–200 cm wyniosła $9349 \text{ kg P} \cdot \text{ha}^{-1}$, a w glebie w pobliżu rowu w kierunku spływu wody z gospodarstwa – aż $13080 \text{ kg P} \cdot \text{ha}^{-1}$ [SAPEK B. 1998]. W warunkach zagród gospodarstw demonstracyjnych z terenu województwa podlaskiego zawartość fosforu w warstwie gleby 0–200 cm, ekstrahowanego za pomocą 1% roztworu K_2SO_4 z profilu usytuowanego powyżej płyty obornikowej, wyniosła $135 \text{ kg P} \cdot \text{ha}^{-1}$, a w miejscu za dawnym szambem – $39 \text{ kg P} \cdot \text{ha}^{-1}$. W pierwszym z wymienionych profilów najzasobniejsza w fosfor była warstwa wierzchnia 0–40 cm, natomiast w drugim – warstwa głębsza (40–60 cm), co było skutkiem znacznie dłuższego oddziaływania pozostałości po szambie i migracji fosforu w głąb gleby (rys. 2) [SAPEK B. niedatowane].

Wiele gleb w Nowej Zelandii, z natury ubogich w fosfor i o silnej jego retencji, wymagało regularnego stosowania nawozów fosforowych, na co wskazali CONDRON i GOH [1990]. To inspirowało do oceny zmian zawartości fosforu w glebie pod wpływem nawożenia superfosfatem pastwiska rajgrasowo-koniczynowego w 20-letnich badaniach. Autorzy wykazali zwiększenie zawartości organicznego fosforu w glebie wraz ze zwiększeniem stosowania nawozu fosforowego. Ilość fos-



Rys. 2. Zawartość fosforu rozpuszczalnego w 1% K₂SO₄ w profilach gleb z terenu zagrod gospodarstw demonstracyjnych projektu BAAP; a) miejsce powyżej płyty obornikowej i zbiornika na gnojówkę, b) miejsce za dawnym szambem; źródło: opracowanie własne

Fig. 2. The content of phosphorus soluble in 1% K₂SO₄ in soil profiles from demonstration farmsteads in BAAP project; a) the place above manure pad and slurry tank, b) the place behind the old septic tank; source: own study

foru nieorganicznego w corocznie nawożonych glebach zwiększała się w miarę upływu czasu, jednak potencjalne wykorzystanie tej rezydualnej ilości P ograniczała jego trwałość w glebie.

Problem niedoboru fosforu, podstawowego składnika koniecznego do prawidłowego rozwoju i wzrostu roślin i zwierząt, dotyczy szczególnie gleb bardzo ubogich w ten składnik, jakimi były m.in. gleby w Irlandii w latach 50. ubiegłego wieku. Jak wykazały badania CULLETONA i in. [2002], stosowanie nawozów fosforowych na użytki zielone w ilości: 0, 15 i 30 kg P·ha⁻¹, w rotacyjnej uprawie i spaszaniu po każdym sezonie wzrostu traw, w ciągu 30 lat spowodowało zwiększenie jego zawartości z 1 do 9 mg P·dm⁻³ gleby. Wyniesienie tego składnika z mięsem wołowym wynosiło 6–20%. Na tej podstawie autorzy stwierdzili, że większość wprowadzonego fosforu pozostawała w glebie lub była tracona w wyniku spływu powierzchniowego. Ponadto, badania bilansowe wykazały, że 75% fosforu wprowadzonego z nawozem pozostało w glebie, a większa jego część była kumulowana w jej wierzchniej warstwie. FEI i in. [2011] również wykazali, że długotrwałe, ciągłe wprowadzanie fosforu do gleby szklarniowej użytkowanej w produkcji warzyw, zarówno w postaci nawozów mineralnych, jak i naturalnych (obornika), powodowało jego akumulację w glebie i wzbogacenie jej wierzchnich warstw. Autorzy stwierdzili 4-krotne, w porównaniu z wartością początkową, zwiększenie całkowitej zawartości fosforu po 13 latach jej użytkowania. SAPEK B. [1998] i SAPEK A. [2007] stwierdzili ponadto, że znaczącą przyczyną zwiększania się zasobów fosforu w glebach polskich, obok nawożenia fosforem, są importowane dodatki mineralne do pasz stosowane w gospodarstwach rolnych [SAPEK A., WALCZUK 2009]. Mając to na uwadze, wprowadzane do gleby nawozy naturalne, w tym gnojowicę

zawierającą więcej niż $20 \text{ g P} \cdot \text{kg}^{-1}$ suchej masy, należałoby traktować jako nawozy fosforowe.

Przyczyną nagromadzania się fosforu w glebach może być również nieracjonalny sposób stosowania znacznych dawek nawozów fosforowych na gleby z natury zasobne w ten składnik, lecz zubożone w jego formy dostępne dla roślin. Intensywne nawożenie fosforem gleb w celu zwiększenia wydajności oraz jakości plonu zwiększa ryzyko rozproszenia tego składnika do środowiska i jego przenikania do wód [SAPEK B. 1998, SAPEK B. i in. 2000]. Jak wykazali KUTRA i in. [1998], na przykładzie gleb Litwy, takiemu zabiegowi, poza zwiększeniem akumulacji fosforu w glebie i jego wymywaniem, nie zawsze towarzyszy zwiększenie plonu. BUSMAN i in. [2009] stwierdzili, że większość fosforu z nawozów wprowadzonego do gleb nie jest wykorzystywana przez plon w pierwszym sezonie. Dalsze stosowanie fosforu w ilości większej niż wykorzystana przez plony polepszało zasobność gleby w fosfor, lecz był on już związany i niedostępny dla roślin. Z badań FILIPKA i SKOWRONA [2000] wynika, że 20–30% fosforu wprowadzonego do gleby z nawozem w nadmiarze w stosunku do jego pobrania z plonem jest akumulowane w glebie w dostępnej formie fosforu ekstrahowanego roztworem Egnera-Riechma. Ta ilość jest potencjalnym źródłem strat fosforu przez wymycie (rys. 1).

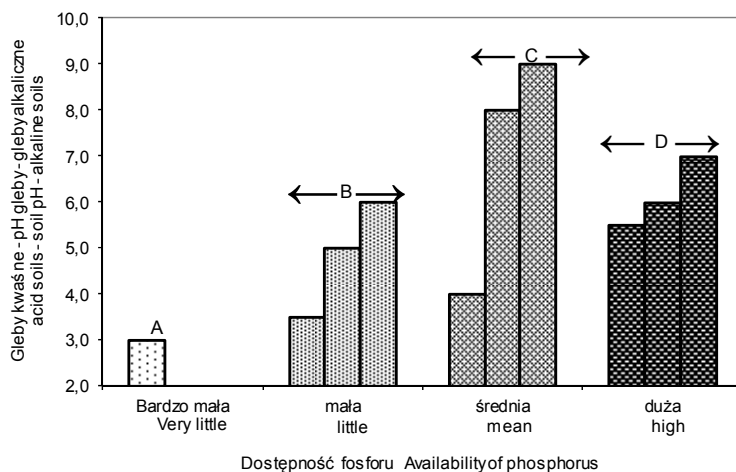
Przeciwnieństwem nadmiernego i nieracjonalnego stosowania fosforu jest „precyzyjne nawożenie” gleb tym składnikiem [KULCZYCKI 2012].

Źródłem fosforu wprowadzanego do gleby jest również opad atmosferyczny, co jest skutkiem obiegu tego składnika w środowisku. Fosfor zawarty w cząstkach materialnych, między innymi również pochodzenia glebowego, dostaje się do atmosfery w wyniku erozji wietrznej. Szacowany współcześnie ładunek tego składnika w skali świata wnoszony z opadem wynosi 1,39 mln t P rocznie. Około 5% fosforu w cząstkach pyłu (PM – ang. particulates matter) i ok. 15% fosforu rozpuszczalnego w opadzie pochodzi ze źródeł antropogenicznych [SAPEK, SAPEK 2011]. Przyjmuje się, że w krajach europejskich oceniany ładunek fosforu jest większy niż $0,31 \text{ kg P} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{r}^{-1}$. Ładunek fosforu wnoszony z opadem mokrym na powierzchnię ziemi w Falentach (woj. mazowieckie) w latach 1995–2000 wyniósł średnio rocznie $0,36 \text{ kg P} \cdot \text{ha}^{-1}$ (współczynnik zmienności $V = 32\%$), co jest zgodne z szacowanym ładunkiem tego składnika pochodzącym z opadu w Europie [SAPEK A. i in. 2003].

PROCESY I MECHANIZMY PRZEMIAN FOSFORU W GLEBACH

Fosfor w glebach występuje w formie nieorganicznej, jako ortofosforany H_2PO_4^- i HPO_4^{2-} i głównie w tej formie jest pobierany przez rośliny, oraz w formie organicznej, w postaci związków z materią organiczną, zwłaszcza z rozpuszczalnym węglem organicznym (RWO) [BUSMAN i in. 2009; MULLINS 2009; NOWOTNY-MIECZYŃSKA 1976; SAPEK 2010; University of Hawai 2007] (rys. 1). Formy

w jakich fosfor występuje w glebie (frakcje) zależą od jej odczynu, zawartości w niej wymiennego wapnia oraz jej pojemności wymiennej w stosunku do kationów [BUSMAN i in. 2009; GAJ 2008; HAYGARTH 1997] (rys. 3). Można wśród nich wyróżnić trzy „pule”, tj. fosfor w roztworze (solution P), fosfor aktywny (active P) i fosfor trwale związany (fixed P). Pierwsza z nich jest zazwyczaj bardzo mała, a fosfor występuje w niej w większości w formie ortofosforanów z niewielką ilością fosforu organicznego. Pula fosforu aktywnego, obecnego głównie w fazie stałej gleby, może być stosunkowo łatwo uwalniana do roztworu glebowego. Jest ona głównym źródłem fosforu dostępnego dla roślin. Zawarty w tej „puli” fosfor nieorganiczny – jony fosforanowe adsorbowane przez małe cząstki gleby – reaguje z innymi składnikami gleby, np. z wapniem (Ca), magnezem (Mg), glinem (Al) i żelazem (Fe), i tworzy formy o różnej rozpuszczalności, a fosfor organiczny łatwo ulega mineralizacji. Mechanizm tworzenia związków z fosforem jest złożony, a ich dostępność dla roślin zależy od odczynu gleby. W glebach alkalicznych ($\text{pH} > 7$) w reakcjach z fosforem dominuje wapń, a w kwaśnych (zwłaszcza $\text{pH} < 5,5$) – glin. Zakres wartości pH , w których dostępność fosforu dla roślin jest największa wynosi od 5,5 do 7,0 (rys. 3). Pula fosforu trwale związanego zawiera jego nieorganiczne, trudno rozpuszczalne związki oraz związki organiczne, które są odporne na mineralizację przez mikroorganizmy glebowe. Tego rodzaju połączenia mogą być obecne w glebie przez wiele lat, nie są jednak dostępne dla roślin i mają bardzo mały wpływ na żyzność gleby [BUSMAN i in. 2009].



Rys. 3. Dostępność fosforu w zależności od pH gleby – zakresy pH , w których: A – dominuje wiązanie fosforu przez żelazo, B – dominuje wiązanie fosforu przez glin, C – dominuje wiązanie fosforu przez wapń, D – dostępność fosforu jest największa; źródło: opracowanie własne na podstawie BUSMAN i in. [2009]

Fig. 3. Phosphorus availability in relation to soil pH at which: A – phosphorus is bound with iron, B – phosphorus is bound with aluminium, C – phosphorus is bound with calcium, D – phosphorus availability is the highest; source: own elaboration after BUSMAN *et al.* [2009]

Okolo połowa całkowitej rezerwy fosforu w glebie jest akumulowana w glebowej materii organicznej. Druga połowa tej rezerwy to fosfor nieorganiczny, o małej mobilności, w większości związany z mineralnymi cząstkami gleby [BUSMAN i in. 2009; GLIŃSKI 1999; SAPEK 2010; STEINECK i in. 2000]. Zwiększone stężenie wapnia w glebie, zwłaszcza w glebach wapiennych, skutkuje silnym uwstecznianiem fosforu aktywnego oraz przyswajalnego dla roślin [GAJ 2008; VON WANDRUSZKA 2006]. Cząstki gleby, takie jak tlenki glinu i żelaza, minerały ilaste i amorficzne, posiadające zdolność do wiązania anionów, sorbuja fosfor w formie ortofosforanów w ilości zależnej od pH i pojemności wymiennej anionów gleby [BUSMAN i in. 2009; VON WANDRUSZKA 2006] (rys. 3). Występują one obficie w większości silnie zwietrzałych gleb, w których silna sorpcja fosforu stanowi problem żywienia roślin, czego przykładem jest m.in. wiele wulkanicznych, bogatych w minerały amorficzne gleb Hawajów. W glebach wapiennych sorpcja fosforu polega na wymianie anionu CO_3^{2-} w węglanie wapnia i tworzeniu nierozpuszczalnego fosforanu wapnia $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ [University of Hawaii 2007; VON WANDRUSZKA 2006]. MORRIS i HESTERBERG [2010] badali mechanizm sorpcji nieorganicznych fosforanów przez tlenki żelaza (III) w torfie i ich rozpuszczania – uwalniania z glebowej materii organicznej – w zależności od pH gleby. Wykazali podobieństwo mechanizmu tego procesu do sorpcji fosforanów przez tlenki minerałów. Jednak w warunkach $\text{pH} > 5$ rozpuszczalności materii organicznej ze stałej fazy torfu towarzyszy zwiększenie rozpuszczalności fosforanów w wyniku konkurencyjności wiązania przez Fe(III). Wzrost pH i zawartości rozpuszczalnego węgla organicznego (RWO) w warunkach chemicznej redukcji w glebach sprzyja zwiększeniu rozpuszczalności i zmniejsza retencję fosforanów w glebach. Ten wpływ pH i zawartości RWO na wiązanie nieorganicznych fosforanów przez materię organiczną jest istotny, pomijając bezpośredni wpływ redukcji Fe(III) na rozpuszczalność fosforanów [BUSMAN i in. 2009; VON WANDRUSZKA 2006].

KALEMBASA i BECHER [2010], w badaniach nad wpływem żelaza na zasobność w fosfor ogólny (całkowity) gleb hydrogenicznych i napływowych trwałych użytków zielonych w dolinie rzeki Liwiec, wykazali największą zawartość fosforu w poziomach genetycznych wyróżniających się dużą akumulacją żelaza. Ilość i udział rozpuszczalnych form fosforu zależały głównie od jego ogólnej zawartości. Ponadto, wykazali dodatni, istotny wpływ procesu murszenia na zawartość badanych form fosforu.

UWALNIANIE FOSFORU W GLEBACH I WYMYWANIE DO WÓD

PRZYCZYNY UWALNIANIA I WYMYWANIA FOSFORU

Jedną z istotnych przyczyn uwalniania fosforu w glebie jest proces mineralizacji glebowej materii organicznej [HAYGARTH 1997; MORRIS, HESTERBERG 2010;

TATE, SALCEDO 1988]. Badania przebiegu i wydajności uwalniania fosforu, a także azotu z materii organicznej gleb łąkowych na długoletnich doświadczeniach prowadziła m.in. SAPEK B. [2010]. Wykazała ona, że główną rolę w uwalnianiu fosforu odgrywają warunki wilgotnościowe gleby i opady atmosferyczne, z którymi są związane. Ponadto na proces ten wpływają temperatura powietrza, zwłaszcza w okresie wegetacyjnym, oraz właściwości fizykochemiczne gleby, w tym zawartość węgla organicznego i odczyn, a także forma stosowanego nawozu azotowego i sposób użytkowania łąki. Uwalnianiu fosforu z gleby, zwłaszcza zasobnej w węgiel organiczny, towarzyszy wymywanie jego rozpuszczalnych form do wody gruntowej. W warunkach dużej wydajności mineralizacji i słabego wykorzystania fosforu przez roślinność, prowadzi to do zanieczyszczenia wód gruntowych związkami fosforu [SAPEK B. 2010].

Nagromadzone w glebie rozpuszczalne i aktywne formy fosforu mogą się uwalniać 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 [BUSMAN i in. 2009; SAPEK B. i in. 2000]. Stężenie fosforu i jego przemieszczanie się w glebach i w wodzie gruntowej badali DOMAGALSKI i JOHNSON [2012] na przykładzie wybranych 5 rolniczych siedlisk, charakteryzujących się zróżnicowaniem geochemicznym gleby, klimatem, stosowaniem nawodnień oraz systemem uprawy w Stanach Zjednoczonych. Wyniki tego rodzaju badań mogą być wykorzystane w formułowaniu najlepszych praktyk gospodarowania w celu ograniczenia transportu fosforu z rolnictwa. Wyniki 2-letnich badań TOORA i in. [2004], dotyczące sezonowych zmian form fosforu i jego strat w wycieku z monolitów gleby łąkowej (gliny pylastej), wykazały zmienność tych strat w różnych sezonach, co sugeruje potrzebę rozwinięcia odpowiednich strategii badań nad stratami fosforu.

DJODJIC i in. [2004] w 3-letnich badaniach pięciu gleb w kolumnach o nienaruszonej strukturze wykazali, że specyficzne czynniki siedliska danej gleby są wskaźnikami strat fosforu w wyniku jego wymycia, nie znaleźli natomiast jednego, uniwersalnego wskaźnika dla wszystkich badanych gleb. SINAJ i in. [2002] badali, z zastosowaniem lizymetrów, sorpcję wymienną fosforu oraz jego straty w wyniku wymycia z mineralnych gleb użytków zielonych nawadnianych zalewowo. Autorzy wykazali mniejsze stężenie fosforu w wodach zalegających głębsze warstwy gleby, co wynikało z większej pojemności sorpcyjnej i silniejszego wiązania tego składnika w tych warstwach. Znacznie większe stężenie fosforu w wodach przenikających wierzchnie warstwy gleby po zalewie było skutkiem większej zdolności do wymiany i większej ruchliwości związków fosforu w tych warstwach. Z badań wynika, że na podstawie zawartości fosforu w wierzchnich warstwach nie można wnioskować o wymyciu i jego stratach z gleb [SINAJ i in. 2002]. SAPEK B. [2012] badała pojemność adsorpcyjną i energię adsorpcji murszu oraz utworów torfowych odwodnionego torfowiska niskiego w dolinie Biebrzy względem fosforu. Gleby tego obszaru cechują się budową warstwową, co jest przyczyną zróżnicowania

właściwości sorpcyjnych zalegających w nich utworów torfowych różnego pochodzenia i stopnia humifikacji oraz przeobrażenia masy organicznej wierzchnich warstw murszu. Autorka wykazała, że skutkiem różnej pojemności sorpcyjnej i siły wiązania fosforu utworów zalegających w profilu gleby torfowo-murszowej jest zróżnicowanie migracji jego związków nieorganicznych i organicznych w profilu gleby i przenikania ich do wody gruntowej. Ryzyko oraz zyski wynikające z ponownego uwadniania zdrenowanych łąk torfowych oceniali RIET VAN DE i in. [2013]. Autorzy wykazali, że ciągle zalewy łąk na takich glebach powodują uwalnianie dużych ilości składników, zwłaszcza fosforu, do roztworu glebowego (wody glebowej), znacznie większych niż w przypadku łąk na glebach mineralnych. Wynika to z większej zawartości fosforu związanego z żelazem w torfach.

Straty fosforu z gleb uprawnych przyczyniają się do eutrofizacji systemów wodnych. Ze względu na zwiększający się poziom zawartości fosforu w glebach należy zwrócić uwagę na zależności między tą zawartością a aktualnym wymyciem tego składnika. Poza stratami fosforu z gleb wskutek jego wymycia w głąb profilu, drugą istotną przyczyną tych strat i zanieczyszczenia wód jest spływ powierzchniowy [MCDOWELL i in. 2011; TUNNEY 2000; VADAS i in. 2005]. Straty w wyniku spływu powierzchniowego wymagają szczególnej uwagi, ponieważ spływ ten jest ważną drogą transportu fosforu do wód powierzchniowych. W Irlandii ponad 90% obszarów rolniczych stanowią użytki zielone, rzadko orane, na których corocznie stosuje się na powierzchnię gleby mineralne nawozy fosforowe oraz nawozy naturalne (obornik) [TUNNEY 2000]. Skutkiem tego jest intensywne wzbogacenie wierzchniej 0–2 cm warstwy gleby w fosfor, co sprzyja jego transportowi do wód powierzchniowych w wyniku spływu powierzchniowego. Straty fosforu z rolnictwa są dobrze udokumentowane ze względu na ich rolę w eutrofizacji wód.

Istotne dla środowiska okazują się również straty fosforu w wyniku spływu podpowierzchniowego na drodze rolniczego drenowania [MCDOWELL i in. 2011]. Wysoki poziom zawartości P w glebie jest znaczącym, potencjalnym źródłem jego strat, jednak w niesprzyjających warunkach hydrologicznych nagromadzone zasoby fosforu nie ulegają łatwo uruchomieniu. MCDOWELL i in. [2011] omawiają znaczący, wzajemny wpływ zarówno zasobów fosforu w glebie, jak i warunków hydrologicznych oraz praktyk gospodarowania na ruchliwość tego składnika w środowisku. Właściwe współdziałanie tych czynników może zmniejszyć straty P do wód powierzchniowych.

Poszukiwano metod (testów glebowych) z zastosowaniem badań modelowych, na podstawie których można określić oraz przewidzieć starty fosforu z gleb. VADAS i in. [2005], porównując w tym celu kilka powszechnie stosowanych testów glebowych (Mehlich-3, Bray-1, wodna ekstrakcja gleby, pojemność wysycenia gleby fosforem oznaczana za pomocą ekstrakcji szczawianem amonu), wykazali największą przydatność i uniwersalność ostatniego z wymienionych, lecz tylko w przypadku gleb bezwęglanowych. W ramach programu Agencji Ochrony Środowiska Stanów Zjednoczonych, dotyczącego czystej wody, podjęto badania nad

przydatnością różnych testów glebowych do oceny potencjalnego uwalniania fosforu z gleb na torfowiskach [MUKHERJEE 2009]. Badania wykonano na 630 próbkach, pobranych z warstwy 0–10 cm, gleb usytuowanych w centrum i na krawędzi torfowisk oraz w pobliżu obszaru wyżyn, pochodzących z 4 południowo-wschodnich stanów. Oceniano stosunek wysycenia fosforem metodami: Mehlich-1 i Mehlich-3 oraz ekstrakcją szczawianową. Na podstawie otrzymanych wyników oraz warunków tła (zawartości P w glebach oraz wartości stosunku wysycenia gleb fosforem) wyznaczono liczby graniczne uwolnienia fosforu do okolicznych wód. Tymczasem SIMS i in. [2000] uważają, że stosowanie nawożenia fosforem w formie odpadów organicznych i nawozów fosforowych na podstawie zasobności gleby wymaga testu zintegrowanego z wymaganiami praktyk rolniczego gospodarowania tym składnikiem oraz uwzględniającego ryzyko środowiskowe. Na tym tle pojawia się pytanie, czy obecna wiedza o zachowaniu się fosforu w glebie jest zgodna z wynikami ekspertyz hydrologów, agronomów i ekologów oraz ekspertów innych dziedzin odnośnie do ryzyka przenikania tego składnika do wód powierzchniowych.

MECHANIZM PROCESU UWALNIANIA I WYMYWANIA FOSFORU

Zdolność sorpcyjna i buforowa gleb w stosunku do fosforu są ważne zarówno z rolniczego, jak i środowiskowego punktu widzenia. Z tej przyczyny EHLERT i in. [2003] podjęli badania nad:

- 1) kinetyką i przemieszczaniem się fosforu z gleby do roztworu glebowego i oceną pojemności buforowej gleb w stosunku do fosforu (PBC – ang. Phosphorus Buffer Capacity), jako funkcją zawartości fosforu w tym roztworze;
- 2) wpływem PBC na status fosforu w glebie ze względu na problemy środowiska i jakości wody;
- 3) wpływem PBC na plony upraw.

Pojemność buforową gleb w stosunku do fosforu wyznaczono metodą laboratoryjną (sorpcyjną i rozcieńczenia izotopowego) w próbkach gleby z poletek doświadczalnych Francji, Szwecji i Danii. Wyniki badań pozwoliły na wykazanie kluczowej roli właściwości sorpcyjnych i buforowych gleb oraz zawartości dostępnego fosforu w glebach w wyznaczaniu agronomicznych i środowiskowych granicznych poziomów zawartości tego składnika, a także tworzenia sytemu zaleceń nawozowych bardziej ukierunkowanych na środowisko.

Jak stwierdził VAN WANDRUSZKA [2006], blokada miejsc sorpcji fosforu przez kwasy organiczne, a także kompleksowanie wymiennego Al i Fe w glebie jest potencjalną przyczyną uruchamiania w niej fosforu. Nawozy naturalne, zwłaszcza obornik świński i drobiowy, bardzo bogate w fosfor, są zarówno źródłem fosforu w glebie, jak i efektywnym czynnikiem jego mobilizacji. Rola materiałów humusowych w uwalnianiu fosforu jest oddzielnym i obiecującym problemem badaw-

czym, któremu jednak poświęca się stosunkowo mało uwagi. Szczególnie interesującym zagadnieniem jest stosowanie humianów jako glebowych dodatków [VAN WANDRUSZKA 2006].

Badania MCDONALDA i REIDA [2003] skupiły się na procesie wymywania różnych form fosforu z gleby w głąb profilu. Autorzy uważają, że nie jest to rzeczywiste (prawdziwe) wymycie, jak w przypadku związków azotu. Proces ten jest rodzajem przepływu związków fosforu przez duże pęknięcia w gruncie, rozpadliny i kanały drażnione przez dżdżownice. Stwierdzili, że fosfor przenika przez profil gleby do drenów i dalej, przez odpływy drenarskie, przemieszcza się do wód powierzchniowych. Wymaga to zwrócenia szczególnej uwagi na wymienione możliwe drogi strat fosforu i sposoby uprawy gleby zmniejszające wpływ czynników sprzyjających tym stratom.

TOOR i in. [2003], w wyniku 2-letnich badań nad formą fosforu w odciekach z gleby łąkowej z zastosowaniem fizykochemicznego frakcjonowania związków fosforu, wykazali że większość fosforu traconego z gleby (55–76%) to fosfor w formie niereaktywnych cząstek. Wyniki oznaczeń P^{31} metodą rezonansu magnetycznego wykazały, że te niereaktywne cząstki składają się głównie z monoestrów i diestrów fosforu organicznego. Stwierdzona przez autorów aktywność enzymów w badanych odciekach stwarza możliwość hydrolizy części tych związków (10–21% całkowitego fosforu niereaktywnego) do form nieorganicznych w czasie ich transportu do wód.

Rozpuszczalności związków fosforu w glebie sprzyjają warunki redukcyjne, lecz mechanizm tego procesu nie jest w pełni poznany. HUTCHISON i HESTERBERG [2004], badając szybkość i mechanizm mikrobiologicznej redukcji gleby, zwłaszcza jej powierzchniowej warstwy, wykazali zwiększanie zawartości rozpuszczalnego fosforu w miarę zwiększania zawartości rozpuszczalnego węgla organicznego (RWO). Jest to spowodowane adsorpcją lub tworzeniem uwodnionych kompleksów RWO-Fe-PO₄ lub RWO-Al-PO₄ [HUTCHISON, HESTERBERG 2004].

Jak wykazali JONES i OBURGER [2011], bionawozy (non-micorrizal), będące mikrobiologicznymi inokulantami, mogą potencjalnie stymulować obieg fosforu w glebie przez rozpuszczanie tego składnika w połączeniach organicznych i mineralnych. Te rozpuszczające fosfor mikroorganizmy zawierają wiele enzymów (actinomycetes), z których wiele znajduje się w rizosferze. Istnieją dwie strategie stosowania mikroorganizmów w formie bionawozów. Jedna z nich to wzmożenie rozpuszczalności związków fosforu obecnych w minerałach przez zakwaszenie gleby oraz uwolnienie czynników kompleksujących metale. Druga to enzymatyczny rozkład fosforu organicznego. Te dwie drogi stymulacji są skuteczne w różnym stopniu, w zależności od warunków glebowych.

Poza mikroorganizmami i związanymi z nimi procesami mikrobiologicznymi, na rozpuszczalność i obieg fosforu w glebach wpływ wywiera także glebowa mikrofauna [CHAPUIS-LARDY 2011; MASSEY 2012]. Osobniki większe niż 2 mm wytwarzają w glebie biogeniczne struktury o swoistej formie, charakterystyczne dla

dżdżownic oraz kopce w przypadku termitów. Ta działalność znacznie zmienia dostępność fosforu w glebach, a uformowane struktury wpływają na przemieszczanie się tego składnika wskutek infiltracji oraz spływu z erodowanej gleby.

LI i in. [2009] badali wpływ degradacji roślinności oraz erozji wietrznej na akumulację węgla, azotu i fosforu w piaszczystych użytkach zielonych we wschodniej Mongolii Wewnętrznej w Chinach Północnych w celu oceny i wyjaśnienia mechanizmów antropogenicznej degradacji środowiska. Wyniki badań sugerują złożoność tego mechanizmu, który w warunkach antropopresji powoduje akumulację i dynamikę C, N i P pod wpływem degradacji środowiska przez istotne oddziaływanie tych składników na bioróżnorodność ekosystemu, produktywność i podatność gleby na erozję.

Badania LIU i in. [2012] dotyczyły wymywania fosforu z wierzchnich warstw mineralnej gleby (piaszczystej i ilastej) po zastosowaniu świńskiej gnojowicy. Badania wykonano w kolumnach glebowych. Oznaczano pojemność sorpcyjną tych gleb w stosunku do fosforu (indeks sorpcji P), stopień wysycenia fosforem (w %), stężenie rozpuszczalnego, reaktywnego fosforu oraz całkowitą zawartość P. Przed zastosowaniem gnojowicy stwierdzono istotnie większe stężenie reaktywnego oraz całkowitego fosforu w odcieku z gliny piaszczystej niż w odcieku z gliny ilastej, lecz istotne jego zwiększenie po aplikacji gnojowicy nastąpiło tylko w glebie ilastej. Umiarkowane stosowanie gnojowicy na glebę piaszczystą, o małym wysyceniu fosforem, nie spowodowało większego ryzyka jego wymycia. Badania wykazały, że – poza właściwościami chemicznymi – duży wpływ na ryzyko wymycia fosforu wywiera tekstura i struktura gleby. Struktura gleby, taka jak gliny ilastej powoduje duże ryzyko wymycia tego składnika [LIU i in. 2012].

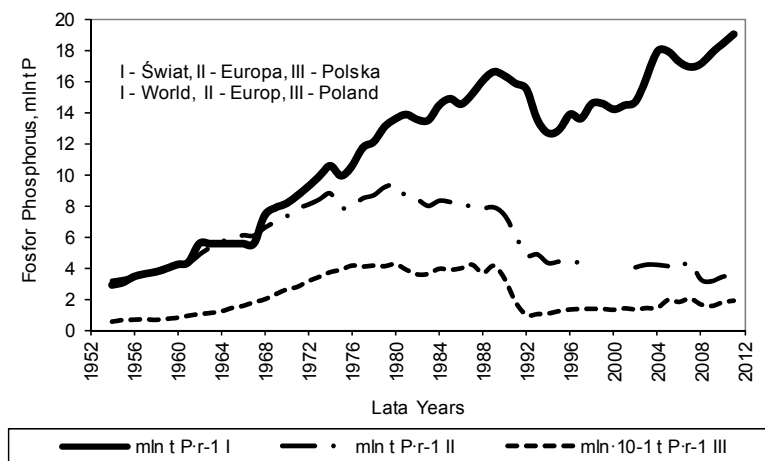
Celem badań HAYGARTHA [2000] była identyfikacja i objaśnienie trzech typów mechanizmów transferu fosforu z gleb do wody. Autor wyróżnił dobrze rozpoznany i opisany w literaturze chemiczny proces rozpuszczania fosforu, ponadto fizyczny mechanizm oddzielania i usuwania cząstek gleby, związany z procesem erozji oraz incydentalne przemieszczanie się fosforu z gleby do wody po zastosowaniu nawozu fosforowego lub obornika w warunkach, które nie sprzyjają wbudowaniu fosforu w glebę. Ten ostatni mechanizm występuje w warunkach nadmiaru wody, umożliwiających wystąpienie jej spływu, zwłaszcza powierzchniowego [HAYGARTH 2000].

ZRÓWNOWAŻONE GOSPODAROWANIE FOSFOREM

TIESSEN i in. [2011] uważają, że obecność fosforu jest zarówno czynnikiem przyczyniającym się do globalnych zmian przez zwiększenie jego ładunku w większości środowisk w wyniku strat z rolnictwa, przemysłu oraz środowisk miejskich, jak i ich skutkiem w wyniku globalnych procesów, takich jak degradacja ziemi lub produkcja biopaliw. Fosfor odgrywa podstawową rolę w ochronie żyzności, a po-

nieważ źródłem nowego fosforu wprowadzanego do rolnictwa są zasoby fosforatów, jest on zasobem strategicznie ograniczonym. BALEMIL i NEGISHO [2012] stwierdzają m.in., że w warunkach obecnego stosowania dużych dawek fosforu, jego globalne zasoby zostaną zużyte i do roku 2050 zabraknie rezerw tego składnika w glebach. Z taką opinią polemizują m.in. VAN KAWENBERGH i in. [2013]. Autorzy uważają, przyjmując obecny stan stosowania nawozów fosforowych, że światowe rezerwy fosforu wystarczą na ponad 300 lat, a jego zasoby na ponad 1400 lat, równocześnie jednak podkreślają konieczność racjonalnego gospodarowania tym składnikiem z uwagi na to, że skały fosforanowe są zasobem nieodnawialnym.

Na przełomie lat 90. ubiegłego wieku nastąpiło pewne zmniejszenie zużycia nawozów fosforowych w świecie, w tym w Europie, również w Polsce (rys. 4). Było to m.in. związane z rozpoznaniem problemu eutrofizacji wód. Jednak w skali globalnej obserwuje się ponowny wzrost tego zużycia, na co składa się intensywne stosowanie fosforu w krajach rozwijających się. Także w Europie, zwłaszcza w Polsce, obserwuje się pewien nieznaczny wzrost zużycia nawozów fosforowych w ostatnich latach [FAO 2013] (rys. 4).



Rys. 4. Zużycie nawozów fosforowych w świecie (I), Europie (II) i Polsce (III) w przeliczeniu na czysty składnik (fosfor – P) w latach 1954–2011; źródło: opracowanie własne na podstawie danych FAO [2013]

Fig. 4. Consumption of phosphorus fertilizers in the world (I), Europe (II) and Poland (III) after recalculation to pure element (phosphorus P) in the years 1954–2011; source: own elaboration after FAO [2013]

Uwolniony do wód fosfor jest przyczyną ich eutrofizacji, co jest obecnie globalnym problemem, kształtującym jakość zasobów wodnych. Dlatego gospodarowaniu fosforem musi obecnie towarzyszyć jego wtórne wykorzystanie oraz strategicznie ochronne stosowanie [TIESEN i in. 2011]. Jakość wody ma dla wszystkich

istotne znaczenie. Wysycenie gleby fosforem i jego nadmiar w glebach jest z tym problemem ściśle związane. Dlatego bilansowanie składników nawozowych, w tym fosforu, oraz ich przemieszczanie się w środowisku i gospodarowanie minimalizujące straty tego składnika w glebach jest długoterminowym celem dla producentów rolnych, właścicieli gospodarstw rolnych oraz hodowców zwierząt [MULLINS 2009]. Jedną z propozycji ograniczenia strat jest „precyzyjne nawożenie” fosforem. KULCZYCKI [2012] wykazał m.in., że w wyniku takiego nawożenia średnia zawartość przyswajalnego fosforu w glebie zmniejszyła się o 23%, a udział próbek gleb o bardzo wysokiej zasobności zmniejszył się, przy jednoczesnym zwiększeniu liczby próbek gleby o zasobności średniej uznanej za optymalną.

Przedmiotem dokonanej przez BALEMILA i NEGISHO [2012] przeglądu literatury była ocena gospodarowania fosforem glebowym w aspekcie mechanizmu adaptacji roślin na stres fosforowy w warunkach niedostatecznej jego dostępności. W takich warunkach zostają uruchomione w roślinie określone mechanizmy, zwiększające wydajność pobierania fosforu, takie jak np. modyfikacja „architektury korzenia”, polegająca na silnym rozwoju systemu korzeniowego, tworzeniu dłuższych włóśników korzeni i zwiększeniu ilości wydzielin, w tym również enzymów sprzyjających pobieraniu fosforu. Wszystkie te morfologiczne, fizjologiczne, biochemiczne oraz molekularne mechanizmy adaptacji rośliny w warunkach stresu wywołanego niedoborem fosforu mogą być wykorzystane w ulepszeniu zbiorów upraw.

Biotransformacja oraz straty fosforu w warunkach produkcji zwierzęcej są m.in. skutkiem niewłaściwego gospodarowania nawozami naturalnymi [DAO, SCHWARTZ 2011]. Bydło i drób wykorzystują fosfor z karmy nieefektywnie. Ilość fosforu wydalanego przez zwierzęta znacznie przewyższa ilość przyswojoną w diecie, dlatego w żywieniu stosuje się dodatki enzymatyczne zwiększające strawność paszy [SAPEK A., WALCZUK 2009]. Skutkiem tego jest zwiększenie udziału fosforu rozpuszczalnego w wodzie w odchodach zwierzęcych. Dlatego związek między systemami produkcji zwierzęcej oraz stosowaniem nawozów naturalnych wymaga badań. Straty fosforu z odchodów zwierzęcych zachodzą początkowo w wyniku transportu przez wodę deszczową i z opadów śniegu oraz wodę przesiąkającą przez glebę. Dlatego identyfikacja drogi transportu fosforu z terenów związanych z produkcją zwierzęcą, takich jak pastwiska i miejsca składowania nawozów naturalnych, oraz określenie bezpiecznych sposobów ich stosowania na polach jest zadaniem strategicznym w odniesieniu do środowiska [SAPEK A. 2002; 2008; SAPEK B. i in. 2000; SAPEK, SAPEK 2005].

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Równowaga między wprowadzaniem fosforu do środowiska w celu utrzymania optymalnej produkcji rolniczej a jego stratami w wyniku nadmiernego wzbogace-

nia gleb jest obecnie jednym z naczelnych celów strategicznych w rolnictwie. Wiąże się to z ciągłym poszukiwaniem odpowiednich form gospodarowania fosforem oraz innymi składnikami nawozowymi, a także rozpoznaniem czynników wpływających na zrównoważenie układu gleba – woda – roślina. Wymaga to ciągłego rozwoju międzydyscyplinarnych prac badawczych, nie tylko stosowanych, lecz również podstawowych. Potwierdzeniem tego może być prezentacja najnowszych trendów badawczych w dziedzinie nauk związanych z badaniem środowiska i żywności oraz wnioski przedstawione na Międzynarodowej Konferencji Agrofizycznej w Lublinie w czerwcu 2013 r. Stwierdzono tam m.in. potrzebę „prowadzenia badań w różnych skalach, od makro do nano, w celu lepszego poznania mechanizmów i procesów zachodzących w tak złożonych układach”. [Czarna ... 2013]. Problem zrównoważonego stosowania fosforu stawia również konsultacyjny Komunikat Komisji do Parlamentu Europejskiego z dnia 8.07.2013 bowiem składnik ten jest rozpraszany na każdym etapie cyklu jego przemian w środowisku [KE 2013]. Nadmierne i często zbędne wzbogacanie gleb w fosfor, które prowadzi do eutrofizacji i zanieczyszczenia wody będącej coraz częściej surowcem deficytowym, jest jednym z istotnych etapów tego rozproszenia.

W wyniku analizy przedstawionych w pracy źródeł, przyczyn oraz mechanizmów i skutków nagromadzania i uwalniania fosforu w glebach sformułowano przedstawione poniżej wnioski, dotyczące postępowania z jego rezerwami oraz kierunku dalszych badań zachowania się tego składnika w środowisku:

1) ograniczenie nawożenia fosforem tylko do gleb ze swej natury mało zasobnych oraz zubożałych w ten składnik;

2) weryfikacja i dalszy rozwój dotychczas stosowanych, znanych testów oceny dostępności fosforu w glebie oraz poszukiwanie nowych, z uwzględnieniem rodzaju uprawy i wykorzystania fosforu przez rośliny;

3) prowadzenie badań w zakresie pogłębiania wiedzy o procesach wykorzystania przez różne rośliny uprawne oraz ruń łąkową rezerw fosforu znajdujących się w glebach;

4) badania podstawowe i stosowane powinny dotyczyć również możliwości dostosowania mechanizmów pobierania fosforu z gleby przez rośliny z uwzględnieniem wpływu drobnoustrojów oraz mikrofauny glebowej, a także tzw. bionawozów zwiększających dostępność rezerw tego składnika w glebie;

5) stosowanie dotychczas znanych metod fitoremediacji gleb o nadmiernych rezerwach fosforu, w celu zapobiegania jego wymyciu do wód oraz recyklingu i ponownego wykorzystania w glebach ubogich w ten składnik.

LITERATURA

BALEMIL T., NEGISHO K. 2012. Management of soil phosphorus and plant adaptation mechanisms to phosphorus stress for sustainable crop production: a review. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. Vol. 12. Iss. 3 s. 547–561.

- BUSMAN L., LAMB J., RANDALL G., REHM G., SCHMITT M. 2009. The nature of phosphorus in soils. W: Phosphorus in the Agricultural Environment. Reviewed July. University of Minesota Extension [online]. [Dostęp 02.10.2013]. Dostępny w Internecie: <http://www.extension.umn.edu/distribution/cropsystems/dc6795.html>
- BÜNEMANN E.K., OBERSON A., FROSSARD E. (red.) 2011. Phosphorus in action. Biological processes in soil phosphorus cycling. Ser. Soil Biology. Vol. 100. Berlin, Heidelberg. Springer-Verlag. ISBN 978-3-642-15271-9 ss. 483.
- CHAPUIS-LARDY L., LE BAYON R.C., BROSSARD M., LÓPEZ-HERNÁNDEZ D., BLANCHART E. 2011. Role of soil macrofauna in phosphorus cycling. W: Phosphorus in action. Biological processes in soil phosphorus cycling. Pr. zbior. Red. E.K. Buenemann, A. Oberson, E. Frossard. Series: Soil Biology. Vol. 100. Berlin, Heidelberg. Springer-Verlag s. 199–213.
- CONDON L.M., GOH K.M. 1990. Implication of long-term superphosphate application on the accumulation and plant availability of soil phosphorus under irrigated pastures. Proceeding of the New Zealand Grassland Association. Vol. 32 s. 191–193.
- CULLETON L., COULTER B., LIEBHARD W.C. 2002. The fate of phosphatic fertilizer applied to grassland. Irish Geography. Vol. 35. Iss. 2 s. 175–184.
- Czarna Ziemia 2013 [online]. R. 3. Nr 7. [Dostęp 02.10.2013]. Dostępny w Internecie: <http://www.ptg.up.lublin.pl/czarna%20ziemia.html>
- DAO T. H., SCHWARTZ R. C. 2011. Effects of manure management on phosphorus biotransformations and losses during animal production. W: Phosphorus in Action. Biological Processes in Soil Phosphorus Cycling. Pr. zbior. Red. E.K. Buenemann, A. Oberson, E. Frossard. Ser. Soil Biology. Vol. 100. Berlin, Heidelberg. Springer-Verlag s. 407–429.
- DJODJIC F., BÖRLING K., BERGSTRÖM L. 2004. Phosphorus leaching in relation to soil type and soil phosphorus content. Journal of Environmental Quality. Vol. 33. Nr 2 s. 678–684.
- DOMAGALSKI J.L., JOHNSON H. 2012. Phosphorus and groundwater: establishing links between agricultural use and transport to streams [online]. U.S. Geological Survey ss. 4. [Dostęp 02.10.2013]. Dostępny w Internecie: <http://pubs.usgs.gov/fs/2012/3004/>
- EHLERT P., MOREL CH., FOTYMA M., DESTAIN J.P. 2003. Potential role of phosphate buffering capacity of soils in fertilizer management strategies fitted to environmental goals. Journal of Plant Nutrition and Soil Science. Vol. 166. Iss. 4 s. 409–415.
- FAO 2013. FertiStat – Fertilizer Use Statistics. FAO Plant Production and Protection Division [online]. [Dostęp 01.09.2013]. Dostępny w Internecie: <http://faostat.fao.org/site/575/default.aspx#cancel>
- FEI L., ZHAO M., CHEN X., SHI Y. 2011. Effects of phosphorus accumulation in soil with the utilization ages of the vegetable greenhouses in the Suburb of Shenyang. 2nd International Conference on Environmental Science and Technology. International Proceedings of Chemical, Biological and Environmental Engineering. Vol. 6 s. 173–176.
- FILIPEK T., SKOWRON P. 2000. New proposals for phosphorus management in Polish agriculture. W: Scientific basis to mitigate the nutrient dispersion into the environment. Pr. zbior. Red. A. Sapek. Falenty. Wydaw. IMUZ s. 151–159.
- GAJ R. 2008. Zrównoważona gospodarka fosforem w glebie i roślinie w warunkach intensywnej produkcji roślinnej. Monografia. Nawozy i Nawożenie. Z. 33. ISSN 1509-8095 ss. 143.
- GLIŃSKI J. 1999. Chemiczne i fizykochemiczne właściwości gleb. W: Gleboznawstwo. Pr. zbior. Red. S. Zawadzki. Warszawa. PWRiL s. 190–192.
- GORLACH E. 2002. Gleba i jej rola w odżywianiu roślin i nawożeniu. W: Chemia rolna. Pr. zbior. Red. E. Gorlach, T. Mazur. Warszawa. Wydaw. Nauk. PWN s. 73–127.
- HAYGARTH P. 1997. Phosphorus losses from grassland soils: new understanding and concepts. IGER Innovations. Iss. 1 ss. 63.

- HAYGARTH P.M. 2000. Mechanisms and mitigation of phosphorus transfer from soil to water. W: Scientific basis to mitigate the nutrient dispersion into the environment. Pr. zbior. Red. A. Sapek. Falenty. Wydaw. IMUZ s. 126–137.
- HUTCHISON K.J., HESTERBERG D. 2004. Dissolution of phosphate in a phosphorus-enriched ultisol as affected by microbial reduction. *Journal Environmental Quality*. Vol. 33. Iss. 5 ss. 1793–802.
- JONES D. L., OBURGER E. 2011. Solubilization of phosphorus by soil microorganisms. W: Phosphorus in action. Biological processes in soil phosphorus cycling. Pr. zbior. Red. E.K. Buenemann, A. Oberson., E. Frossard. Ser. Soil Biology. Vol. 100. Berlin, Heidelberg. Springer-Verlag s. 169–198.
- JOUANY C., CRUZ P., DAUFRESNE T., DURU M. 2011. Biological phosphorus cycling in grasslands: interactions with nitrogen. W: Phosphorus in action. Biological processes in soil phosphorus cycling. Pr. zbior. Red. E.K. Buenemann, A. Oberson, E. Frossard. Ser. Soil Biology. Vol. 100. Berlin, Heidelberg. Springer-Verlag s. 275–294.
- KALEMBASA D., BECHER M. 2010. Zasobność w fosfor gleb użytków zielonych doliny Liwca na Wysockiznie Siedleckiej. *Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie*. T. 10. Z. 3 (31) s. 107–117.
- KE 2013. Komunikat Komisji do Parlamentu Europejskiego, Rady, Europejskiego Komitetu Ekonomiczno-Społecznego i Komitetu Regionów. COM(2013) 517 final. Bruksela ss. 20.
- KONECKA-BETLEY K. 1999. Skały macierzyste gleb. W: *Gleboznawstwo*. Pr. zbior. Red. S. Zawadzki. Warszawa. PWRiL s. 35–55.
- KRÓLIKOWSKI L., ADAMCZYK B. (red.) 1986. *Album gleb Polski*. Warszawa. PWN. ISBN 83010031 70 ss.165
- KULCZYCKI G. 2012. Wpływ precyzyjnego nawożenia fosforem i potasem na zmiany zawartości rozpuszczalnych form tych pierwiastków. *Fragmenta Agronomica*. Vol. 29. No 1 s. 70–82.
- KUTRA G., AKSOMAITIENĖ R., SILNIKA A.S. 1998. 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. Wydaw. IMUZ s. 52–59.
- LI F.-R., ZHAO W.-Z., LIU J.-L., HUANG Z.-G. 2009. Degraded vegetation and wind erosion influence soil carbon, nitrogen and phosphorus accumulation in sandy grasslands. *Plant Soil*. Vol. 317 s. 79–92.
- LIU J., ARONSSON H., BERGSTRÖM L., SHARPLEY A. 2012. Phosphorus leaching from loamy sand and clay loam topsoils after application of pig slurry [online]. Springer Plus. Vol. 1(1) ss. 53. [Dostęp 02.10.2013]. Dostępny w Internecie: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3593004/>
- MASSEY P.A. 2012. Interaction between phosphorus fertilization and soil biota in managed grasslands system. Thesis of dissertation [online]. [Dostęp 02.10.2013]. Dostępny w Internecie: <http://dspace.lib.cranfield.ac.uk./handle/1826/7844>
- MCDONALD D., REID K. 2003. Phosphorus Leaching? W: *Agronomy Guide for Field Crops*. Pr. zbior. Red. Ch. Brown. Toronto. OMAFRA.
- MCDOWELL R.W., SHARPLEY A.N., CONDRON L.M., HAYGARTH P.M., BROOKES P.C. 2011. Processes controlling soil phosphorus release to runoff and implications for agricultural management. W: Phosphorus in action. Biological processes in soil phosphorus cycling. Pr. zbior. Red. E.K. Buenemann, A. Oberson, E. Frossard. Series: Soil Biology. Vol. 100. Berlin, Heidelberg. Springer-Verlag s. 269–284.
- MORRIS A.J., HESTERBERG D. 2010. Mechanisms of phosphate dissolution from soil organic matter [DVD]. W: 19th World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World. 1–6 August 2010, Brisbane, Australia. Warragul. Australian Society of Soil Science Incorporated s. 37–39.
- MUKHERJEE A., NAIR V.D., CLARK M.W., REDDY K.R. 2009. Development of indices to predict phosphorus release from wetland soils. *Journal Environmental Quality*. Vol. 38 s. 878–886.

- MULLINS G. 2009. Phosphorus, Agriculture & the Environment [online]. Virginia Polytechnic and State University. [Dostęp 15.01.2014]. Dostępny w Internecie: www.ext.vt.edu
- NOWOTNY-MIECZYŃSKA A. 1976. Fosfor. W: Fizjologia mineralnego żywienia roślin. Pr. zbior. Red. A. Nowotny-Mieczynska. Warszawa. PWRiL s. 78–125.
- POLANSKI A., SMULIKOWSKI K. 1969. Fosfor – P. W: Geochemia. Warszawa. Wydaw. Geol. s. 531–539.
- RIEMERSMA S., LITTLE J., ONTKEAN G., MOSKAL-HÉBERT T. 2006. Phosphorus sources and sinks in watersheds: A review. W: Alberta soil phosphorus limits project. Vol. 5. Background information and reviews. Lethbridge, Alberta, Canada. Alberta Agriculture, Food and Rural Development ss. 82.
- RIET VAN DE B.P., HEFTING M.M., VERHOEVEN J.T.A. 2013. Rewetting drained peat meadows: risks and benefits in terms of nutrient release and greenhouse gas exchange. *Water Air and Soil Pollution*. Vol. 224.
- SAPEK A. 2002. Rozpraszanie fosforu do środowiska. *Zeszyty Edukacyjne*. Nr 7. Falenty. Wydaw. IMUZ s. 9–24.
- SAPEK A. 2007. Przyczyny zwiększania się zasobów fosforu w glebach polskich. *Roczniki Gleboznawcze*. Vol. 58. No 3/4 s. 110–118.
- SAPEK A. 2008. Nawożenie fosforem a jego skutki w środowisku. Artykuł dyskusyjny. *Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie*. T. 8. Z. 2b (24) s. 127–137.
- SAPEK A. 2013. Rozpraszanie składników nawozowych z żywności traktowanej, jako odpad. *Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie*. T. 13. Z. 1 (14) s. 129–142.
- SAPEK A. (red.) 1998. Phosphorus in agriculture and water quality protection. Falenty. Wydaw. IMUZ. ISBN 83-85735-44-5 ss. 105.
- SAPEK A., NAWALANY P., BARSZCZEWSKI J. 2003. Ładunek składników nawozowych wnoszony z opadem mokrym na powierzchnię ziemi w Falentach w latach 1995–2001. *Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie*. T. 3. Z. spec. (6) s. 69–77.
- SAPEK A., SAPEK B. 2004. Phosphorus. W: Elements and their compounds in the environment: occurrence, analysis and biological relevance. Pr. zbior. Red. E. Merian, M. Anke, M. Ihnat, M. Stoepper. Wiley-Vch Verlag s. 1285–1296.
- SAPEK A., SAPEK B. 2005. Strategia gospodarowania azotem i fosforem w rolnictwie w aspekcie ochrony wód Morza Bałtyckiego. *Zeszyty Edukacyjne*. Nr 10. Falenty. Wydaw. IMUZ s. 27–38.
- SAPEK A., SAPEK B. 2011. Fosfor w opadzie atmosferycznym. *Ochrona Środowiska i Zasobów Naturalnych*. Nr 50 s. 122–133.
- SAPEK A., WALCZUK T. 2009. Bilans składników nawozowych w diecie krowy mlecznej. *Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie*. T. 9. Z. 1 (25) s. 99–110.
- SAPEK B. niedatowane. Projekt BAAP 1993–2002. Program ograniczenia zanieczyszczeń Bałtyku ze źródeł rolniczych (Balic Agriculture run-off Aation Program).
- SAPEK B. 1998. Phosphorus in soil profiles from farmstead and its vicinity. W: Phosphorus in agriculture and water quality protection. Pr. zbior. Red. A. Sapek. Falenty. Wydaw. IMUZ s. 60–65.
- SAPEK B. 2010. Uwalnianie azotu i fosforu z materii organicznej gleby. *Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie*. T. 10. Z. 3 (31) s. 229–256.
- SAPEK B. 2012. Phosphorus sorption properties of deposits from peat-muck soil profile in the Kuwasy object. *Journal of Water and Land Development*. No. 16 s. 61–66.
- SAPEK B., SAPEK A., KALIŃSKA D., PIETRZAK S. 2000. Identifying region of various risk of water pollution by agriculturally derived nitrogen, phosphorus and potassium in Poland. W: Scientific basis to mitigate the nutrient dispersion into the environment. Pr. zbior. Red. A. Sapek. Falenty. Wydaw. IMUZ s. 170–187.
- SAPEK B., WOLICKA M. 2007. Changes in phosphorus in the soil under simulated cattle urine locations in a pasture. *Polish Journal of Soil Science*. Vol. 40 s. 9–18.

- SIMS J.T., EDWARDS A.C., SCHOUMANS O.F., SMARD R.R. 2000. Integrating soil phosphorus testing into environmentally based agricultural management practices. *Journal Environmental Quality*. Vol. 29. No 1 s. 60–71.
- SINAJ S., STAMM C., TOOR G.S., CONDRON L.M., HENDRY T., DI H.J., CAMERON K.C., FROSSARD E. 2002. Vadose zone processes and chemical transport. Phosphorus exchangeability and leaching losses from two grassland soils. *Journal Environmental Quality*. Vol. 31 s. 319–330.
- STEINECK S., JAKOBSSON CH., CARLSON G. 2000. Phosphorus – application, utilization by crops and accumulation in agricultural soils. W: *Scientific basis to mitigate the nutrient dispersion into the environment*. Pr. zbior. Red. A. Sapek. Falenty. Wydaw. IMUZ s. 138–150.
- SYNAL S.K., DE DATTA S.K. 1991. Chemistry of phosphorus transformation in soil. Series: *Advance in Soil Science*. Vol. 16. New York. Springer-Verlag. ISBN 978-1-4612-7812-2 ss. 120.
- TATE K. R., SALCEDO I. 1988. Phosphorus control of soil organic matter accumulation and cycling. *Biogeochemistry*. Vol. 5 s. 99–107.
- TCYMBALUK V. 1998. Phosphorus in soils of different zones of Ukraine. W: *Phosphorus in agriculture and water quality protection*. Pr. zbior. Red. A. Sapek. Falenty. Wydaw. IMUZ s. 39–43.
- TIESSEN H., BALLESTER M. V., SALCEDO I. 2011. Phosphorus and global change. W: *Phosphorus in action. Biological processes in soil phosphorus cycling*. Pr. zbior. Red. E.K. Buenemann, A. Oberson, E. Frossard. Series: *Soil Biology*. Vol. 100. Berlin, Heidelberg. Springer-Verlag s. 459–471.
- TOOR G.S., CONDRON L.M., DIB H.J., CAMERON K.C. 2004. Seasonal fluctuations in phosphorus loss by leaching from a grassland soil. *Soil Science Society of America Journal*. Vol. 68. No. 4 s. 1429–1436.
- TOOR G. S., CONDRON L. M., DIB H. J., CAMERON K. C., CADE-MENUNC B. J. 2003. Characterization of organic phosphorus in leachate from a grassland soil. *Soil Biology and Biochemistry*. Vol. 35 s. 1317–1323.
- TUNNEY H. 2000. Phosphorus loss in overland flow from grassland soil to water. W: *Scientific basis to mitigate the nutrient dispersion into the environment*. Pr. zbior. Red. A. Sapek. Falenty. Wydaw. IMUZ s. 119–125.
- University of Hawai 2007. Soil nutrient management for Maui County [online]. Manoa. [Dostęp 02.10.2013]. Dostępny w Internecie: <http://www.ctahr.hawaii.edu/oc/freepubs/pdf/pnm1.pdf>
- VADAS P. A., KLEINMAN P. J. A., SHARPLEY A. N., TURNER B. L. 2005. Relating soil phosphorus to dissolved phosphorus in runoff: A single extraction coefficient for water quality modeling. *Journal Environmental Quality*. Vol. 34 s. 572–580.
- VAN KAWENBERGH S., STEWARD M., MIKKELSEN R. 2013. World reserves of phosphate rock a dynamic and unfolding story. *Better Crops*. Vol. 97. No 3 s. 18–20.
- VON WANDRUSZKA R. 2006. Phosphorus retention in calcereous soils and the effect of organic matter on its mobility [online]. *Geochemical Transactions*. Vol. 7. No 6. [Dostęp 02.10.2013]. Dostępny w Internecie: <http://www.geochemicaltrasactions.com./content/7/1/6>.
- WESOŁOWSKI P., DURKOWSKI T. 2004. Stężenie składników mineralnych w wodach gruntowych na łąkach torfowych nawożonych gnojowicą i obornikiem. *Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie*. T. 4. Z. 1 s. 139–145.
- ZAWADZKI S. (red.) 1999. *Gleboznawstwo*. Warszawa. PWRiL. ISBN 830901703 ss. 559.
- ZHANG L., WU Y., WU N., LUO P., LIU L., HU H.Y. 2011. Impact of vegetation type o soil phosphorus availability and fractions near the alpine timberline of the Tibetan Plateau. *Polish Journal of Ecology*. Vol. 59. No 2 s. 307–361.

Barbara SAPEK

**SOIL PHOSPHORUS ACCUMULATION AND RELEASE –
SOURCES, PROCESSES, CAUSES**

Key words: *accumulation and release of phosphorus in soils, leaching to waters, mechanisms of processes, sustainable management of phosphorus in the environment*

S u m m a r y

The sources, reasons, mechanisms and results of accumulation and release of phosphorus in soils, especially in grassland soils, are presented on the basis of reviewed literature. The aim of this work was to deepen the knowledge about phosphorus behaviour in soils and its further fate in the environment, particularly in view of its penetration into waters; in conditions of changing world and Polish economy. On this background, propositions of sustainable environmental phosphorus management are discussed. Reviewed literature data indicate that fertilisation with phosphorus should be limited to soils with its naturally low content and to those impoverished in this nutrient. This requires verification and further development of soil tests to estimate the reserves of plant available phosphorus in soils under different cropping systems and in grassland areas. To this goal it is necessary to perform basic studies on a possibility of adjusting the mechanisms of phosphorus uptake by plants regarding the effect of microorganisms and soil microfauna. Moreover, some application studies should be developed on phosphorus recycling from organic materials to improve soils that are poor in this element.

Adres do korespondencji: prof. dr hab. B. Sapek, Instytut Technologiczno-Przyrodniczy w Falentach, Zakład Ochrony Jakości Wody, al. Hrabstwa 3, 05-090 Raszyn; tel. +58 22 735-75-66, e-mail: B.Sapek@itep.edu.pl