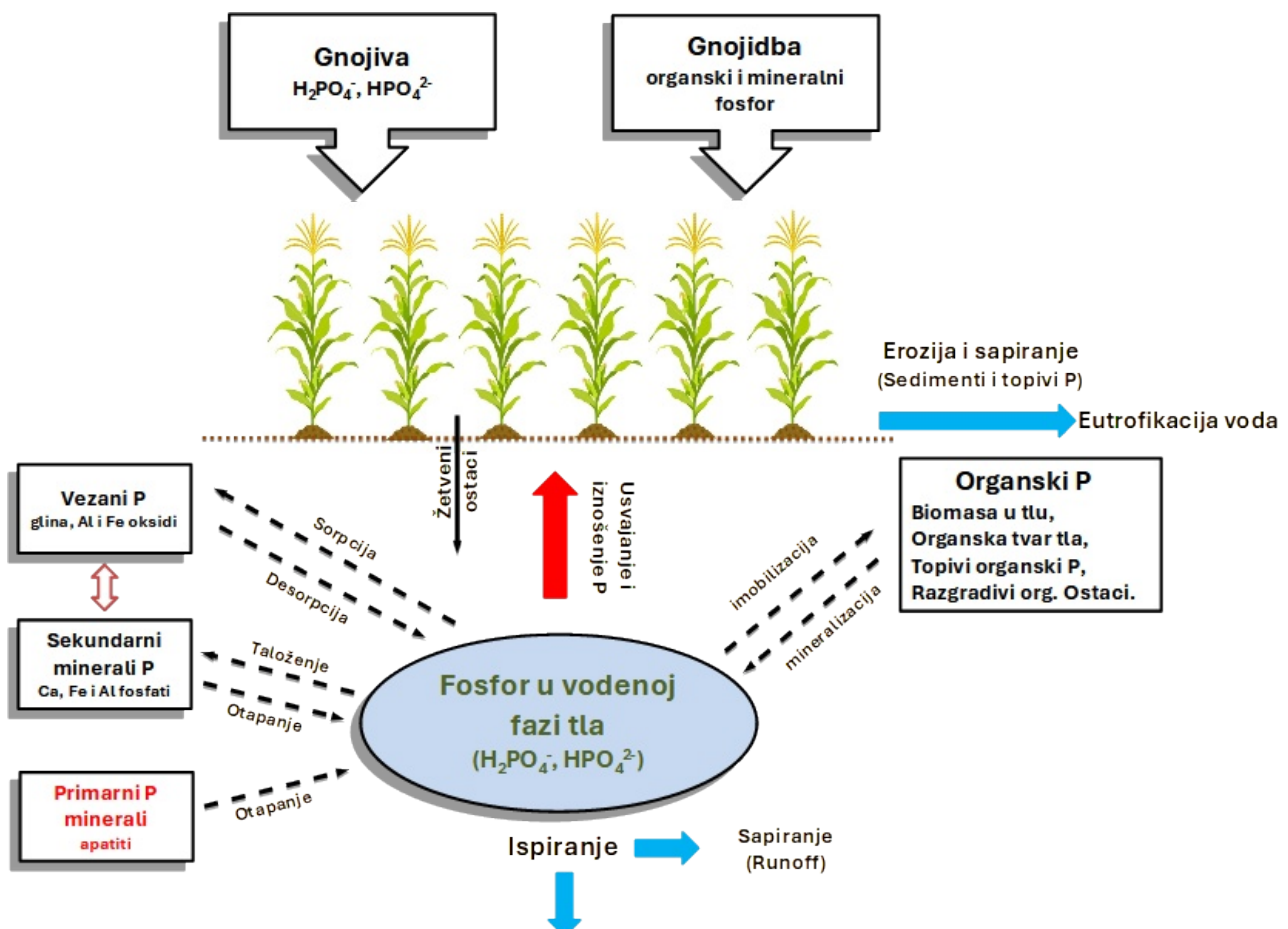


# Značaj organofosforne remineralizacije u tlu

Prof. dr. sc. Vladimir Vukadinović

Fosfor (P) je esencijalni kemijski element potreban svim živim organizmima, neophodan je u prometu tvari kao i energije, gradi vitalnih spojeva i reprodukciji. Zbog velikih potreba biljaka za fosforom, odmah je po potrebi biljaka iza dušika i kalija pa se svrstava u ishrani bilja, zajedno s dušikom (N) i kalijem (K), u primarne ili *glavne makroelemente*. Budući je fosfor neophodan u metabolizmu (prometu tvari i energije) i reprodukciji, neki ga znanstvenici smatraju važnijim od dušika (N) jer su P-spojevi jedinstveni u stvaranju velikih biomolekula ekstremne strukturne stabilnosti i funkcionalne reaktivnosti. Naime, fosfor je ključna komponenta *deoksiribonukleinskih (DNA) i ribonukleinskih kiselina (RNA), fosfolipida* (strukturne komponente staničnih membrana) i molekule *adenosin trifosfat (ATP)* koja skladišti i transportira kemijsku energiju u metabolizmu, ključni je katalitički centar mnogih enzima i nezamjenjiv je u sintezi nukleotida, ključna je spona u povezivanju *endergonih i egzergonih* kemijskih reakcija itd. Biljke usvajaju fosfor isključivo u anionskom obliku i to kao  $H_2PO_4^-$  i  $HPO_4^{2-}$  i ugrađuju u organsku tvar bez redukcije, za razliku od dušika i sumpora, što je evolucijski razumljivo, jer se na fosforu temelji metabolizam tvari i energije, kao i nasljeđivanje svih živih bića

Potreba bilja za fosforom najveća je u dvije etape organogeneze. Prvi maksimum potrebe je rano, tijekom brzog porasta korijena, a drugi u trenutku prijelaza iz vegetativne u generativnu *reproduktivnu* fazu (cvjetanje/oplodnja). Najveći problem gnojidbe fosforom je u niskoj agronomskoj efikasnosti P-gnojiva jer se fosfor unesen u tlo brzo kemijski veže gradeći brzo slabo topljive, a zatim i teško teško usvojive oblike (tzv. *kemijska fiksacija*), podjednako brzo u kiseloj kao i alkalnoj sredini. Naime, u karbonatnoj sredini, odnosno alkalnim tlima, gradi sekundarne i posve netopljive tercijarne Ca-fosfate, a u ki-

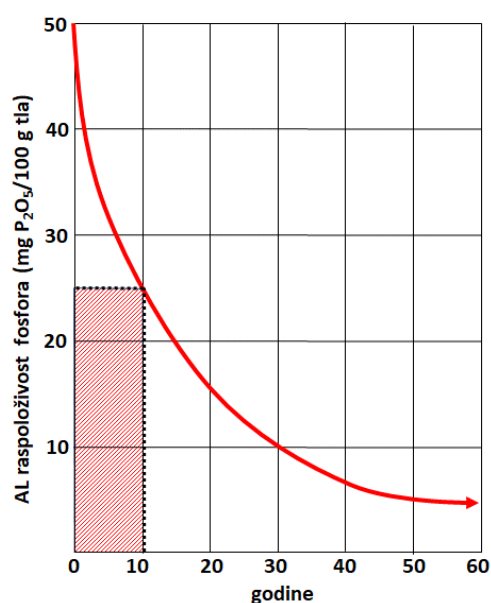


Slika 1. Ciklus fosfora u tlu

selim s željezom i aluminijem brzo gradi posve netopljive Al i Fe-fosfate, osobito uz izostanak tzv. *humat efekta* zbog sadržaj kiselog humusa sa slabim kelatizirajućim potencijalom.

Osim što se njegova *bioraspoloživost* brzo smanjuje nakon gnojidbe, posebno uz niže temperature tla, fosfor se neznatno premješta po dubini profila tla, prosječno 2-3 cm godišnje. Zbog toga plitka i površinska primjena P sprječava rast korijena u dubinu pa u sušnim razdobljima biljke trpe nedostatak vode i hraniva. Zbog toga je dobro primijeniti P gnojiva pod osnovnu ili duboku obradu kako bi se raspodijelio cijelom dubinom oraničnog sloja, izuzev na lakim pjeskovitim tlima u kojima je pokretljivost fosfora znatno veća i gdje je podložan gubicima ispiranjem i/ili površinskim otjecanjem (runoff ili sapiranje, Slika 1.). Otuda je primjena fosfora u osnovnoj gnojidbi (pred duboku obradu tla) najčešći način raspodjele fosfora (barem u RH) jer se unosi cjelokupna doza u zonu *rizosfere*. Također, vrlo je učinkovita primjena fosfora zajedno sa sjetvom, osobito u tlima koja oskudijevaju fosforom, ali samo u trake pored i/ili ispod sjemena, pazeći da ne dođe do tzv. solnog stresa. Na taj način sužava se odnos gnojiva i volumena tla i smanjuje kemijske fiksacije fosfora (kao i *P-retrogradacija*). Agronomska efikasnost fosfora na kiselim tlima može se znatno umanjiti kalcizacijom, odnosno podizanjem pH na 5,5 ili još bolje, podizanjem zasićenosti KIK-a bazama (Ca i Mg) na više od 50 %.

Budući da je tlo vrlo složen i heterogen sustav, što omogućuje iznimnu raznolikost i uvjete života biljkama, životinjama i mikroorganizmima koji imaju ključnu ulogu u funkcioniranju ekosustava tla. Njihova uloga je nezamjenjiva u ciklusima *neophodnih* (esencijalnih) elemenata ishrane u tlu te utječu na zdravlje i produktivnost tla, održavanje *homeostaze* (stabilne ravnoteže) različitih ekosustava i globalne klimatske promjene. Stoga se u posljednja dva desetljeća naglašava kako su četiri bakterijska *taksona* (poznate grupe živih organizama) važna za poljoprivredna tla: *aktinobakterije* (35–39%), *proteobakterije* (26–33%), *acidobakterije* (11–13%) i *verukomikrobiota* (3–6%), dok se u većini studija tla grupa *Bacteroidetes* (bakteroideta; bakteroidi) često opisivala kao rjeđa i manje značajna i prateća bakterijska mikrofiora, ali kojoj se u posljednje vrijeme sve više pripisuje značaj za pravilno funkcioniranje tla. Članovi iz roda bakteroida (pretežno *Flavobacteraceae* i *Sphingobacteraceae*) mogu činiti u rizosferi i endosferi korijena više od polovice ukupne mikrobne zajednice pa je ovaj red vrlo važan za mobilizaciju različitih elemenata ishrane bilja (kao što C, N). Međutim, kako su globalni resursi za proizvodnju fosfora, u odnosu na N i K gnojiva, vrlo ograničeni sve je izraženija potreba efikasnije gnojidbe fosforom, a istovremeno zbog porasta globalne populacije stanovništva sve je veće potrebe za hranom i većom poljoprivrednom produktivnosti. Otuda je sve više istraživanja koja pokušavaju riješiti problem niske efikasnosti gnojidbe fosforom mikrobiološkim putem, bez povećanja primjene P-gnojiva.



Slika 2. Tipična krivulja AL-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> u tlu bez njegove primjene

Niska bioraspoloživost fosforom, ne samo da rezultira niskim, ekonomski neprihvatljivim prinosom, već se i drugi inputi, posebice primjene dušika tada koriste manje učinkovito. U tlima dobro opskrbljenim fosforom, znatno iznad odgovarajuće kritične vrijednosti (kritična razina raspoloživosti hranjivim tvarima je granica iznad koje usjev ne reagira povećanjem prinosa na primjenu gnojiva, ali kvaliteta proizvoda može biti viša), također postoji potreba za učinkovitijim korištenjem P-gnojiva te se njegova primjena može prekinuti ili smanjiti na određeno vrijeme sve dok se povišena P-raspoloživost ne smanji (Slika 2.). Predugo korištenje rezervi tla ne bi trebalo nastaviti ispod kritične koncentracije fosfora u tlu ako se žele dobiti financijski održivi prinosi koji od početka Zelene revolucije neprestano rastu. Također, mogućnost poboljšanja učinkovitosti P-gnojiva uključuje uređenje tla, odnosno povećanje njegove plodnosti kroz poboljšanje kemijskih, fizikalnih i bioloških svojstava (npr. smanjenje gubitaka ispiranjem i erozijom, uređenje vodno-zračnih odnosa, kalcizacija i otklanjanje drugih limitirajućih

faktora, primjenom rotacijom usjeva, adekvatnom obradom, sprječavanjem zbijanja tla uvođenjem siderata i organske gnojidbe i dr.).

Raspoloživost organskog fosfora tla za ishranu bilja zahtijeva njegovu prethodnu mineralizaciju enzimima fosfatazama prije ugradnje u stanične biomolekule. Međutim, potrebno je još jednom naglasiti kako je usvajanje i mineralnih oblika fosfora (fosfata) mnogo niže u odnosu na dušik i kalij pa agromomska efikasnost P-gnojiva nikad ne prelazi 30 % i uglavnom je mnogo niža (Tablica 1.) obzirom na pH tla kao i druga kemijsko-fizikalna svojstva tla (npr. tekstura, vrsta glinenih minerala i druge uvjete P-regradacije). Većina istraživanja o sudbini fosfora primijenjenog gnojivom fokusirana je na u mineralne (anorganske) spojeve pokazujući da se većina adsorbira na površini čestica tla što jako smanjuje njegovu biljkama. S druge strane, vezani organski fosfor na glinene minerale ne utječe nužno na njegovu raspoloživost jer je podložan mineralizaciji pa je regeneracija do bioraspoloživog fosfata enzimima fosfatazama iz organofosfornih spojeva ključan proces u globalnom fosforom ciklusu.

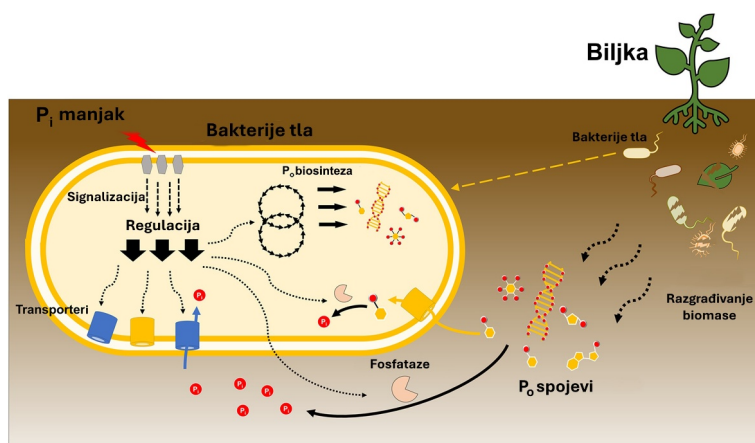
Tablica 1. Utjecaj pH tla na agronomsku efikasnost mineralnih gnojiva

pH	N	P	K
	Agronomska efikasnost u prvoj godini primjene		
7,0	70	30	60
6,0	63	15	60
5,5	52	15	45
5,0	38	10	30
4,5	21	8	21

Naime, opće svojstvo bakterija je sposobnost prevladavanja oskudice anorganskog P ekspresijom različitih gena koji kodiraju P-stres i pokreću reakcije mineralizacije organskog fosfora tla.

Enzimi iz grupe fosfataza sintetiziraju se u tlu kao odgovor na osiromašenje fosfata te tako pomažu većem usvajanju fosfora (Slika 3.). Naime, jedinstvena bakterijska fosfataza *PafA* široko je rasprostranjena u biosferi i ima izrazitu funkcionalnu ulogu u snabdijevanju ugljikom, oslobađajući fosfat kao nusprodukt. *PafA*, je stoga predstavljala zanemareni mehanizam u globalnom ciklusu fosfora i do sada zagonetni put za regeneraciju bioraspoloživog fosfora u prirodi te je obnavljanje raspoloživosti fosfora iz organskih rezervi ključni je dio globalnog ciklusa fosfora tla koji se oslanja na tri enzima iz grupe fosfataza. Većina bakterija u tlu posjeduje barem jednu od tri alkalne fosfataze (*PhoA*, je klasična alkalne fosfataze; *PhoX* je izvanstanična alkalna fosfataza koja se široko nalazi u cijanobakterijama i *PhoD* sudjeluje u hidrolizi niza organskih fosfoestera), čija je aktivnost optimalna u alkalnim uvjetima. Pri niskoj aktivnosti ovih fosfataza snižena je pristupačnost fosfata i smanjena je fosforilacija ugljikohidrata te je raspoloživost fosfora, odnosno njegovo usvajanje biljkama zadovoljavajuće tek kad su uvjeti za život bakterija dobri.

Većina poljoprivrednih tala sadrže između 40 i 80 % anorganski vezanog i 20-60 % organski vezanog fosfora. Oba oblika fosfora dijele se u više grupa koje obuhvaćaju prilično raznolike spojeve fosfora,



Slika 3. Shema mineralizacije organskog P fosfazama u tlu

Visoka raspoloživost fosfora ubrzava metabolizam i dovodi do skraćivanja vegetacije, prijevremenog cvjetanja i starenja biljaka. Ubrzavanje rasta i brz

a njihova podjela se temelji na topljivosti tih spojeva u različitim otapalima. Nedostatak fosfora vrlo je česta pojava, a prvi simptom je slab rast biljaka, zatim slab razvoj korijena, slabo i zakašnjelo cvjetanje, zrioba biljaka kasni uz smanjenu sintezu proteina, nizak sadržaj vitamina i povišen sadržaj amida te je, hranidbena vrijednost poljoprivrednih proizvoda smanjena uz znatno niži prinos. Fosfor se brzo premješta u biljci iz manje aktivnih tkiva i organa u mlađe i vitalnije dijelove. Zbog toga se kod nedovoljne

razvitak biljaka skraćuje etape organogeneze što pogoduje postrnim usjevima, ali kod glavnog usjeva može skratiti period tvorbe plodova ili nalijevanja zrna.

Osijek, 24. kolovoza 2024. god.