

Hnojení fosforem s ohledem na jeho specifické vazby v půdě

Jednou z charakteristických vlastností půdního fosforu je jeho nízká dostupnost pro rostliny v důsledku rychlé a pevné vazby na půdní částice, chemické reakce s jinými ionty v půdním roztoku či omezení přísunu ke kořenům.

Celková dynamika fosforu v systému půda-rostlina je tak poměrně složitou funkcí mezi jednotlivými půdními procesy, působením rhizosféry, půdních mikroorganismů a využitím fosforu rostlinami.

Formy fosforu v půdě a specifika organických vazeb

Problematika přeměn fosforu v půdě a jeho využití rostlinami je poměrně složitá a věnují se jí mnohé vědecké studie, laboratorní a polní pokusy (včetně dlouhodobých), předpovědi s využitím různých modelů apod.

Obecně je známo, že fosfor je v půdě druhým nejmeně zastoupeným makroprvkem (po síře). Obdobně jako síra (a dusík) je fosfor obsažen v půdní organické hmotě, proto je ho více v povrchových vrstvách půdy (horizontech akumulace organické hmoty). Avšak na rozdíl od dusíku a síry, jejichž „organické“ formy v půdě tvoří více než 90 %, je obsah organického fosforu nižší a především variabilnější, a to obvykle v intervalu 30 až 70 % z celkového fosforu v půdě.

Většina organického fosforu je stabilní povahy a fosfor dostupný pro rostliny se z těchto vazeb uvolňuje celkem pomalu specifickými biologicko-chemickými procesy. Tyto procesy jsou silně ovlivněny vlhkostí půdy, teplotou, fyzikálně-chemickými vlastnostmi povrchů půdních částic, hodnotou pH půdy, redoxním potenciálem a dynamikou aktivních složek půdní organické hmoty. Různé transformační procesy proto mají velký vliv na celkovou biologickou dostupnost fosforu. Tato biodostupnost je však u fosforu poměrně nízká. Obecně lze konstatovat, že pouze malý podíl organických vazeb fosforu podléhá mineralizaci.

Proto je za určitých podmínek (a to i v některých systémech s vyššími vstupy organických hnojiv) důležité přidávat také fosfor v minerálních hnojivech (viz dále).

Minerální formy fosforu a jejich sorpce

Zbývající podíl (30–70 %) celkového fosforu v půdě tvoří tzv. minerální formy fosforu. Největší část představují zbytky hornin, resp. jejich minerály obsahující fosfor. Ty jsou však velmi stabilní a uvolňování rostlinám přístupného fosforu zvětráváním těchto minerálů je příliš pomalé na to, aby byla zajištěna potřeba rostlin.

Z pohledu výživy rostlin jsou důležité především mobilní (resp. potenciálně mobilní) minerální formy. Minerální formy fosforu jsou obecně odvozeny od kyseliny trihydrogenfosforečné (H_3PO_4).

Čistá kyselina se v přírodě volně nevyskytuje, ale snadno vytváří soli. Jejich rozpustnost je však významně ovlivněna půdními vlastnostmi. Rozpustné formy fosforu (a tedy rostlinami přijímané) jsou ve formě více rozpustného dihydrogenfosforečnanového (H_2PO_4^-) a méně rozpustného hydrogenfosforečnanového (HPO_4^{2-}) aniontu. Při „vhodném“ pH zemědělských půd (tj. 6–7) je v půdním roztoku především forma H_2PO_4^- , při zvyšujícím se pH klesá rozpustnost a „více“ je zastoupena forma HPO_4^{2-} . Avšak i nízké pH rozpustnost fosforečnanů značně snižuje (viz dále).

Obecně však platí, že rozpustnější fosforečnany se v půdním roztoku vyskytují ve velmi nízké koncentraci, řádově v desetinách až setinách mg P/litr půdního roztoku (0,01–0,4 mg P/L). Pro srovnání, většina jiných makroprvků je v půdním roztoku v koncentraci desítek mg/litr (10–40 mg/L), po aplikaci hnojiv i více.

Nízká koncentrace fosforu v půdním roztoku je vysvětlována několika faktory:

- 1) silnou sorpci fosforečnanů na půdní částice, 2) omezením rozpustnosti při různých hodnotách pH,
- 3) omezením pohybu v půdním roztoku,
- 4) biologickou sorpci a organickou vazbou (viz výše).

1) Adsorpce a absorpce

Přestože jsou fosforečnany aniony (obdobně jako dusičnany nebo sírany), nepohybují se snadno půdním roztokem. Naopak, u fosforečnanů dochází ke specifické povrchové aniontové sorpci (adsorpci) s reaktivními skupinami minerálů, na kterých se snadno a celkem rychle vytváří tzv. povrchový fosfátový komplex. Ten je poměrně stabilní, avšak závisí i na hodnotě pH a koncentraci fosforečnanů v půdním roztoku. S vyšší koncentrací snadno rozpustných fosforečnanů (tj. především H_2PO_4^-) se rychlost adsorpce zvyšuje. Velké specifické povrchy, se značným počtem adsorpčních míst, mají především jílové minerály, oxidy železa/hliníku a uhličitany. K omezení mobility fosforu tak může snadno docházet na těžkých i středních půdách, karbonátových (alkalických) půdách či po vápnění.

V důsledku dalších reakcí může být fosfor také vázán ve vnitřních strukturách půdních minerálů (tj. absorbován), zejména v jejich mikro a nano pórech, a tím se pro rostliny stává dlouhodobě nedostupným (tzv. okludovaný P).

Sorpční procesy se po kinetické stránce dělí na vratnou adsorpci fosforečnanů na povrchy částic (minuty až hodiny) a pomalou difuzi tohoto adsor-

bovaného fosforu do vnitřních struktur minerálních částic (dny a měsíce). Tyto sorpční procesy jsou důsledkem tzv. fosforečnanového pufracího mechanismu, což je schopnost půdních částic vyrovnávat změny koncentrace fosforu v půdním roztoku.

2) Vliv pH půdy

Rozpustnost fosforečnanů (H_2PO_4^- a HPO_4^{2-}) je významně ovlivňována hodnotou pH půdy (půdního roztoku). Nejlépe jsou rozpustné kolem pH 6,5. Při zvyšujícím se pH se rozpustnost snižuje, jelikož se vytváří méně rozpustné formy hydrogenfosforečnanů či fosforečnanů vápenatých (tzv. retrogradace fosforu). Při nižších hodnotách pH (pod 5,8 a zejména pod 5,5) se vytváří málo rozpustné fosforečnany hlinité či železité. To jsou vlastně stabilní krystalické minerály (variscit $\text{Al}(\text{OH})_2 \text{H}_2\text{PO}_4$, strengit $\text{Fe}(\text{OH})_2 \text{H}_2\text{PO}_4$ a jejich izomorfní směs). Tato tzv. chemická sorpce je poměrně pevná, zejména s produžující se dobou nevhodného pH (tzv. zvrhávání fosforu). V mnoha studiích je dokonce popisováno, že při úpravě pH na „optimum“ se většina chemicky vázaného fosforu již neuvolní zpět do forem mobilních a pro rostliny přístupných.

3) Omezení pohybu v půdním roztoku

Pohyb fosforu ke kořenům rostlin je zajišťován zejména difuzí z míst s „vyšší“ koncentrací do míst s nižší koncentrací. Nižší koncentrace se vytváří v okolí kořenů odčerpáváním (odběrem) fosforu rostlinami. Rychlost difuze klesá, pokud je půda sušší (prodlužují se vzdálenosti transportu v pórech kolem půdních částic, ve kterých je ještě půdní roztok). Difuze také klesá při nižším rozdílu koncentrací, tedy zejména u půd s malým obsahem přístupných forem v půdě, resp. půdním roztoku.

Doporučení pro používání hnojiv s fosforem

Pochopení přeměn fosforu v půdě je nezbytné pro optimalizaci hospodaření s fosforem a zlepšení efektivity jeho využívání. S tím souvisí především volba vhodného hnojiva a také termínu a způsobu aplikace.

S ohledem na uvedené vazby fosforu v půdě se vědecké poznatky shodují, že vyšší využití fosforu z minerálních hnojiv je:

A) Při aplikaci do oblasti kořenové zóny, kde je rozpustnost fosforu zvyšována působením kořenových exsudátů, zejména prostřednictvím organických kyselin, změnou pH a mikrobiální aktivitou (např. hnojení pod patu, do

řádku apod.). Není však vhodná vysoká dávka hnojiv s tzv. vodorozpustnou formou fosforu (viz bod B), z důvodu možné inhibice růstu kořenů.

B) Přiblížením termínu aplikace do období hlavního odběru fosforu rostlinami, tj. hnojení v předsevých operacích nebo při seti. Dříve doporučované tzv. základní (zásobní) hnojení fosforem koncem léta či na podzim se proto ukazuje jako méně vhodné, zejména při používání hnojiv s převahou tzv. vodorozpustných forem fosforu, tj. hnojiv s účinnou složkou dihydrogenfosforečnanu vápenatého – $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ – např. superfosfáty, nebo dihydrogenfosforečnanu amonného ($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$) – např. amofos (tj. monoammonium fosfáty MAP). Jejich aplikace může významněji ovlivnit fyzikálně-chemické vlastnosti v okolí granulí hnojiva. Zde dochází k relativně rychlému uvolnění fosforečnanů a vzniká oblast „nasyčená fosforem“ ve které probíhají různé reakční mechanismy – i) přímé reakce a následné srážecí reakce, ii) adsorpční reakce. V zóně „přímé reakce“ je vlivem vysoké koncentrace fosforečnanů velmi nízké pH (pod 4), což vede ke zvýšené mobilizaci půdních kovových iontů. Tyto kovové ionty mohou reagovat s vysokými koncentracemi fosforečnanů v dané zóně, což způsobuje jejich srážení. V karbonátových půdách (a po vápnění) je díky jejich vyšší pufrací schopnosti okyselování menší, avšak s reaktivními fosforečnany se mohou tvořit nové komplexy s vápníkem, které se postupně transformují na stabilnější formy fosforečnanů vápenatých s nízkou rozpustností. Ve vnější zóně (vzdálenější od granulí) je dominantní adsorpce P půdními minerály (viz výše – bod 1).

C) Použití hnojiv s více formami fosforu s ohledem na jejich postupnou rozpustnost. V hnojivech jsou současně zastoupeny formy fosforu vodorozpustné a rozpustné v roztocích organických kyselin či jejich solích (např. citratu amonném, kyselině citronové, příp. kyselině mravenčí). Více forem fosforu má mnoho vícenosložkových hnojiv a také např. jednosložkové fosforečné hnojivo Fosmag.

D) Povrchové úpravy granulí hnojiv pro postupné uvolňování fosforu. Rychlému uvolnění vodorozpustných forem fosforu brání specifické povrchové vrstvy či biodegradovatelné polymerní povlaky, které regulují pronikání vody, rychlost rozpouštění účinné složky hnojiva či difuzi fosforu do prostoru kolem granulí. Zpomalením uvolňování a prodloužením dostupnosti vodorozpustného fosforu se snižuje riziko sorpce fosforu a zvyšuje účinnost jeho využití z hnojiva. Určitou nevýhodou je zatím stále vyšší cena těchto hnojiv.

O to víc pro ně platí uvedená doporučení (A, B), jelikož i vodorozpustný fosfor postupně uvolněný z granulí hnojiva podléhá výše popsaným procesům.

E) Využití hnojiv s přírodními nebo modifikovanými zeolity, které mají stabilní mikrokrytalickou strukturu, případně povrchově aktivní látky se schopností absorpce a adsorpce fosforečnanů, které mohou působit jako „nosiče fosforu“ s pomalým uvolňováním.

F) Využívání hnojiv z recyklace fosforu z odpadních vod v podobě postupně rozpustného struvitu ($\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), tj. fosforečnanu hořečnat-amonného

G) Dobré hospodaření s organickou hmotou v osevním postupu, tj. hnojení statkovými a organickými hnojivy a využívání meziplodin. Z literatury je známo, že aplikace organické hmoty do půdy může zvyšovat mobilitu fosforu v půdě. To je vysvětlováno reakcemi, které však nemusí vždy nastat současně (s ohledem na povahu organických látek, rychlost mineralizace organické hmoty apod.).

G1) Zvýšení rozpustnosti Ca, Fe, Al-fosfátů v důsledku reakce organických kyselin a dalších chelátů, které vznikají při rozkladu rostlinných zbytků.

G2) Rozpustnost méně rozpustných fosforečnanů vápenatých (v karbonátových půdách a po vápnění) se zvyšuje v důsledku produkce CO_2 při mineralizaci a okyselováním půdního roztoku (vznikem kyseliny uhličitě).

G3) Vznikající meziprodukty rozkladu či dodané huminové látky (např. ve hnoji, kompostu) využívají vazebná místa na sorpčních povrchích minerálů, čímž omezují vazbu fosforečnanů nebo je z vazebných míst uvolňují do půdního roztoku.

G4) Dochází k tvorbě „fosfohumátového komplexu“, tj. mobilního chelátu, který činí fosfor v půdě pro rostliny dostupnější (mobilnější) a zabraňuje tvorbě méně rozpustných/nerozpustných minerálních fosforečných sloučenin a sorpci půdními minerály.

G5) Vznikají rozpustné organické formy fosforu (Dissolved Organic Phosphorus – DOP), které jsou významnou, ale často přehlíženou složkou organického fosforu. Jsou to především rostlinné a mikrobiální sloučeniny, jako jsou fyáty, nukleové kyseliny a fosfomonoestery (ATP aj.). Dostupnost fosforu z DOP závisí na jeho chemické formě, přičemž labilní formy se snadno mineralizují na fosfor využitelný rostlinami, avšak složitější formy přetrvávají déle a mohou se i vyplavovat. Dynamiku DOP značně ovlivňují meziplodiny. Významným zdrojem různých forem DOP jsou výkaly hospodářských zvířat a čistírenské kalý.

Shrnutí

Hospodaření s fosforem v zemědělských půdách nikdy nebude jednoduché a jedno jediné řešení nemůže vyřešit problém zajištění optimální úrodnosti v rozdílných půdách a u jednotlivých plodin. Avšak i jednoduchými postupy lze dosáhnout zvýšení efektivity využití fosforu. Tyto postupy by měly být cenově přijatelné. Proto mezi nimi převažuje výběr vhodného hnojiva, termínu a způsobu aplikace, aby bylo možné co nejlépe zajistit uvolňování fosforu do půdního roztoku s ohledem na potřebu jeho odběru rostlinami.

*Ing. Jindřich Černý, Ph.D.,
ČZU v Praze*

HNOJENÍ FOSFOREM NA JAŘE 2026

REGENERAČNÍ HNOJENÍ
(i na jaře lze hnojit NPK):

COMPLEX NP 20/20•Zn | COMPLEX I5/I5/I5•850₃•Zn GSH I5-5•205 | GSH I0-I0-I0•I35 | ZEORIT 8-I0-I0•95

STARTOVNÍ HNOJENÍ (pod patu):

CORNSTARTER PRO | LOVOSTART GSH NP 6-28•75 COMPLEX NP 20/20•Zn | ZEORIT 8-I0-I0•95 | FOSMAG

MIMOKOŘENOVÁ VÝŽIVA:

NP SOL 8-24 | LOVOHUMINE NP•Zn | PK SOL 20-24 | LOVOFOS FERTI B | FERTIGREEN KOMBI NPK 7-7•5 | LOVOSOYA

Bližší doporučení žádejte u svých dodavatelů hnojiv a na www.mojehnojiva.cz