

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů

Katedra agroenvironmentální chemie a výživy rostlin



**Fakulta agrobiologie,
potravinových a přírodních zdrojů**

**Fosfor ve výživě rostlin – možnosti řešení
hrozícího nedostatku**

Bakalářská práce

Autor práce: Jan Hladík

Obor studia: Pěstování rostlin

Vedoucí práce: doc. Ing. Martin Kulhánek, Ph.D.

© 2022 ČZU v Praze

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci "Fosfor ve výživě rostlin – možnosti řešení hrozícího nedostatku" jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 17. 4. 2022

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval svému vedoucímu práce, panu doc. Ing. Martinu Kulhánkovi, Ph.D., za výborné téma, rady při psaní, doporučení zdrojů a korekturu textu. Dále bych chtěl vyzdvihnout svou rodinu a přátele, kteří mají zřejmě nekonečnou trpělivost.

Fosfor ve výživě rostlin - možnosti řešení hrozícího nedostatku

Souhrn

Tato práce se zabývá významem fosforu ve výživě rostlin. Vzhledem ke zmenšujícím se zásobám neobnovitelných fosforečných hornin začíná reálně hrozit nedostatek minerálních fosforečných hnojiv.

V půdách České republiky je většinou nedostatek fosforu. Navíc se zpravidla vyskytuje ve formách, které jsou rostlinami nepřijatelné. Hnojení fosforečnými hnojivy je omezeno jejich stále rostoucí cenou, kterou zvyšuje především cena zemního plynu, a v současné době také zhoršenou dostupností způsobenou válečným konfliktem na Ukrajině. V této situaci, kdy je převážná většina fosforečných hnojiv do České republiky dovážena z Ukrajiny, Ruska a Běloruska, vyvstává potřeba alternativních zdrojů fosforu ještě naléhavěji.

Základem racionálního hnojení fosforem by vždy mělo být vhodné načasování, správné umístění k rostlinám a nejvhodnější forma a dávka hnojiva vzhledem k podmínkám a hnojené plodině. Další možností může být využití biostimulantů pro zpřístupnění fosforu rostlinám, ovšem výsledky zatím nejsou příliš přesvědčivé. V současné době se ekonomicky nejlépe jeví využití různých odpadních materiálů obsahujících fosfor v technicky využitelném množství (například čistírenských kalů, kompostu, popelu z biomasy a dalších), ovšem v tomto případě je reálná aplikace omezena možným zatížením rizikovými látkami (rizikovými prvky, rezidui farmak, patogeny aj.). Zajímavou a perspektivní možností je šlechtění rostlin zaměřené na zlepšení příjmu a využití fosforu rostlinami. Dalším směrem je možné využití nanotechnologií při výrobě a úpravě fosforečných hnojiv.

Klíčová slova: Fosfor; Biostimulanty; Šlechtění; Lokální aplikace P; Nanotechnologie

Phosphorus in plant nutrition – possible solutions to prevent P deficiency

Summary

This thesis deals with the importance of phosphorus in plant nutrition. Due to the decreasing reserves of non-renewable phosphoric minerals, a deficit of mineral phosphoric fertilizers is becoming a real threat.

Soils in the Czech Republic are mostly deficient in phosphorus. Besides, it is usually found in forms that are unavailable to plants. Phosphorus fertiliser application is limited by its constantly increasing price, mainly due to the price of natural gas and, at the moment, by the reduced availability caused by the war in Ukraine. In this situation, where the vast majority of phosphate fertilisers are imported into the Czech Republic from Ukraine, Russia and Belarus, the need for alternative sources of phosphorus becomes even more urgent.

The basics of rational phosphorus fertilisation should always be appropriate timing, correct placement to the plants and the most suitable form and rate of fertiliser for the conditions and the crop being fertilised. Another option may be the use of biostimulants to make phosphorus available to plants, but the results are not yet very convincing. At present, the use of various waste materials containing phosphorus in technically usable quantities (e.g. sewage sludge, compost, biochar, etc.) appears to be the best economic option, but in this case the realistic application is limited by the possible co-application of hazardous substances (trace elements, drug residues, pathogens, etc.). An interesting and promising option is plant breeding aimed at improving the uptake and usage of phosphorus by plants. Another direction is the possible use of nanotechnology in the production and modification of phosphate fertilisers.

Keywords: Phosphorus; Biostimulants; Breeding; Local use P; Nanotechnology

Obsah

1	Úvod	7
2	Cíl práce	8
3	Literární přehled	9
3.1	Koloběh fosforu v prostředí, fosfor v půdě	9
3.1.1	Anorganické sloučeniny fosforu	10
3.1.2	Organické sloučeniny fosforu	11
3.2	Příjem a využití P rostlinou	12
4	Moderní trendy ve výživě rostlin P	15
4.1	Lokální aplikace P hnojiv, foliární aplikace P	16
4.2	Využití biostimulantů	18
4.3	Využití různých odpadních materiálů z hlediska výživy P	20
4.3.1	Přímá aplikace odpadních materiálů	21
4.3.2	Úprava odpadních surovin	22
4.3.2.1	Vysrážení fosforečných solí z kalů	22
4.3.2.2	Torefakce, pyrolýza	22
4.3.2.3	Spalování	23
4.4	Šlechtění rostlin na lepší/nížší příjem P	24
4.5	Využití nanotechnologií	25
5	Závěr	27
6	Literatura	29

1 Úvod

Fosfor je esenciálním prvkem jak pro výživu rostlin, tak také pro výživu zvířat. Jeho množství v půdě v podmínkách České republiky je nízké a jeho převážná část je pro rostliny nedostupná. Celosvětové zásoby se podle většiny studií zmenšují, zvyšují se náklady na výrobu fosforečných minerálních hnojiv i náklady na jejich dopravu. Potřeba stále vyšších výnosů plodin pro obživu vzrůstající lidské populace se projevuje zvyšující se poptávkou po P hnojivech a jejich cena výrazně stoupá.

Ztížená dostupnost minerálních zdrojů fosforu (ochrana vlastních fosforečných surovin v Číně, v současnosti ohrožený dovoz fosforečných hnojiv z Ukrajiny, Ruska a Běloruska, závratně rostoucí ceny pohonných hmot, energií a plynu), zvýšené nároky na ochranu životního prostředí a produkci potravin vysoké kvality, to vše vede k hledání efektivních možností hnojení fosforem a omezování jeho ztrát především do povrchových i podzemních vod.

Z těchto důvodů je důležité hledat zdroje fosforu především v odpadních materiálech a vedlejších produktech organického původu jako jsou například čistírenské kaly, různé komposty, popele, masokostní moučky a další. Výhodou těchto materiálů je jejich dostupnost, nevýhodou možné zatížení rizikovými prvky a látkami. Další možností snížení potřeby fosforu je jeho vhodná aplikace (lokální aplikace na půdu přímo k rostlinám nebo foliární aplikace postřikem nadzemních rostlinných částí), použití různých druhů biostimulantů, které usnadní rostlinám příjem živin nebo omezí vliv stresových faktorů na rostliny, šlechtění rostlin zaměřené na snižování potřeby fosforu nebo jeho zlepšený příjem a využití a v neposlední řadě také použití nanotechnologií, kdy touto pokročilou úpravou fosforečných hnojiv můžeme jejich dávku zefektivnit a vhodněji zacílit.

2 Cíl práce

Cílem práce bylo vytvořit přehledný souhrn aktuálních poznatků ve výživě rostlin fosforem s hlavním zaměřením na informace ohledně různých nejnovějších možností prevence nedostatku P.

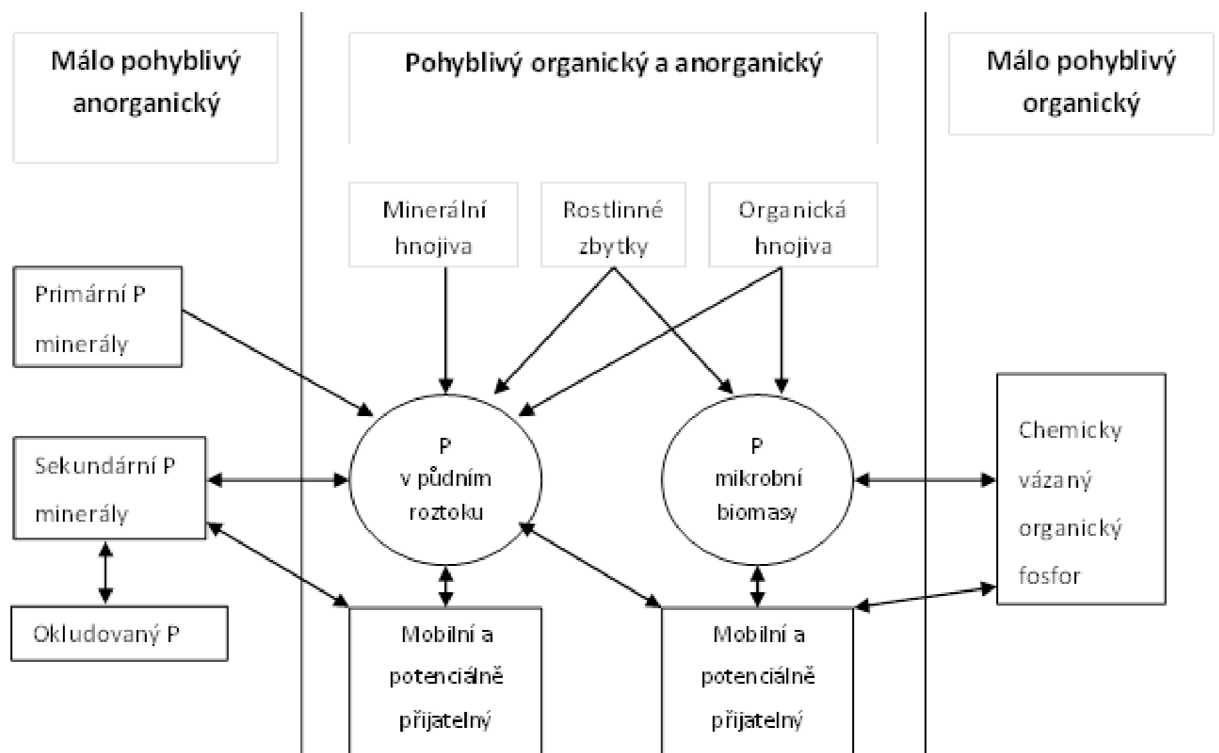
3 Literární přehled

3.1 Koloběh fosforu v prostředí, fosfor v půdě

Celkové množství fosforu v půdě se pohybuje v rozmezí 0,02 – 0,08 % (Balík et al. 2008), podle Vaněk et al. (2007) kolísá od 0,01 do 0,15 %, Marschner (2012) podle textury a typu půd uvádí celkový obsah P v rozmezí 0,01 až 0,20 %. Množství P v půdách přibližně odpovídá jeho obsahu v zemské kůře. V půdě se fosfor nachází v anorganických a organických sloučeninách (Balík et al. 2008).

Schéma s jednotlivými skupinami fosforu a možnostmi jejich přeměny uvádějí Sharpley a Menzel (1987) – obr. 1

Obr. 1: Cyklus P v půdě (dle Sharpley a Menzel 1987)



3.1.1 Anorganické sloučeniny fosforu

Fosfor se v přírodě vyskytuje ve svém nejvyšším oxidačním stupni jako aniont kyseliny trihydrogenfosforečné PO_4^{3-} , ve sloučeninách prakticky vždy tvoří orthofosforečnany nebo méně často pyrofosfáty (Mengel 1991). Podle Vaněk et al. (2007) jsou minerální formy fosforu tvořeny hlavně primárními fosforečnými minerály (apatity), což jsou vápenaté sloučeniny tří molekul $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ a jedné molekuly chloridu, fluoridu nebo hydroxidu vápenatého, podle čehož je také odvozen název sloučeniny, např. -chlorapatit apod., a sekundárními vysráženými a adsorbovanými fosforečnany. Balík et al. (2008) uvádí jako nejdůležitější minerální sloučeniny fosforu hydrogenfosforečnan vápenatý, oktakalciumfosfát, hydroxylapatit, fluorapatit, chlorapatit, strengit, variscit. Primární minerál apatit, vyskytující se rozptýleně ve všech magmatických horninách ve formě fluorapatitu, chlorapatitu a hydroxylapatitu, je nejvýznamnějším přirozeným zdrojem fosforu v půdě. V bazických horninách je jeho podíl vyšší než v horninách kyselých (Mehmood et al. 2018). Jako primární minerály se v půdách v nižším zastoupení nacházejí také fosforečnany železa s příměsí Mn – tripity nebo hydratované fosforečnany hliníku – wawelity. V zamokřených půdách s malým obsahem vzduchu se může vyskytovat fosforečnan železnatý – vivianit (Ivanič et al. 1984). V kyselém prostředí, vzhledem ke zvyšující se rozpustnosti a přítomnosti iontů Al a Fe v půdním roztoku, se tvoří soli těchto kationtů – variscit $\text{Al}(\text{OH})_2\text{H}_2\text{PO}_4$ a strengit $\text{Fe}(\text{OH})_2\text{H}_2\text{PO}_4$.

Rozpustnost anorganických sloučenin P je určována aktivitou železitých a hlinitých iontů a dále aktivitou iontů vápenatých (Smatanová 2021). V půdách probíhá chemická sorpce fosforu rychle, především s Al a Fe. Tento proces doprovází srážení rozpustných fosforečnanů přes různé nestabilní sloučeniny, které se vysráží ve formě koloidních hydratovaných částic. Ty jsou pro rostliny ještě přijatelné (mají velký povrch), ale následně dochází k jejich dehydrataci a postupné krystalizaci. Jejich rozpustnost a tím i přijatelnost pro rostliny se tak stárnutím těchto sloučenin snižuje (Vaněk et al. 2007).

3.1.2 Organické sloučeniny fosforu

Organické formy fosforu jsou nedílnou a důležitou součástí organické půdní hmoty. Rozdělení organického fosforu v půdě odpovídá rozdělení organické hmoty v profilu (Vaněk et al. 2007). Pod trvalými travními porosty je obsah fosforu v půdě vyšší než v orných půdách (Balík et al. 2008).

Z hlediska výživy rostlin má organický fosfor v půdách význam úměrný své hydrolyzovatelnosti, tzn. rychlosti, kterou je transformován na minerální formu, přístupnou rostlinám (Kolář & Kužel, 2002).

Z podstatné části je organický fosfor tvořen fytinem (až 50 % organického P), dále fosfolipidy, nukleovými kyselinami, nukleoproteidy a fosforylovanými lipidy, které jsou součástí kořenové hmoty a dále se do půdy dostávají posklizňovými zbytky (strniště, sláma, chrást, nať, opad listů apod.) a statkovými hnojivy (Vaněk et al. 2007). Některé organofosfáty v půdě se přeměňují velmi rychle na minerální formy, např. fosforylované cukry, jiné, např. fyтин, velmi pomalu (Kolář & Kužel, 2002). Balík et al. (2008) uvádí podíl fyтинů 10 – 50%, nukleových kyselin 5 – 10 %, fosfolipidů, fosfoproteinů, fosfocukrů méně než 1 – 2 % z organicky vázaného fosforu a značný podíl fosforu vázaný na ionty Al a Fe tvořící komplexy s huminovými kyselinami a fulvokyselinami.

Organicky vázaný fosfor je z velké části výsledkem biologické sorpce půdními mikroorganismy, které do svých těl P imobilizují. Po odumření mikroorganismů může být takto vázaný P v dalších procesech mineralizace uvolněn a zpřístupněn pro rostliny, je tedy velmi významný pro zajištění výživy rostlin fosforem (Vaněk et al. 2007). Podle Balík et al. (2008) činí obsah fosforu v mikrobiální biomase zpravidla 2 – 5 % z organického fosforu v půdě a v půdách pod trvalými travními porosty může v některých případech dosáhnout až 25 %.

Podíl organického fosforu je velmi závislý na půdním druhu i typu. V minerálních půdách představuje organický P v průměru 30 – 65 % z celkového fosforu, v organických půdách může být jeho obsah vyšší než 90 % (Jones & Oburger, 2011). V závislosti na půdně-klimatických podmínkách, pěstované kultuře a intenzitě hnojení uvádějí Balík et al. (2008) podíl organicky vázaného fosforu 3 – 80 % z jeho celkového obsahu v půdě, dle Vaněk et al. (2007) je to pak většinou 30 – 50 % z jeho celkového obsahu v půdě.

Půdy s větším obsahem organické hmoty vykazují většinou vyšší obsah fosforu než půdy lehké, s malým obsahem organické hmoty. Vyšší obsah fosforu se u většiny půd

nachází v povrchových vrstvách, kde vyšší biologická aktivita způsobuje nahromadění organického materiálu. Jeho množství v tomto profilu se zvyšuje samozřejmě také aplikací hnojiv. Důležitý je také druh mateční horniny, textura půdy a samozřejmě způsob hospodaření (zemědělské zpracování půdy, druh pěstované plodiny). Tyto vlivy mají dopad na relativní obsah minerálních a organických forem fosforu (Sharpley et al. 1995; Vaněk et al. 2007).

3.2 Příjem a využití P rostlinou

Fosfor má v rostlinách velký význam v biochemických reakcích a v přenosech energie (Vaněk et al. 2007). Pro rostliny je fosfor klíčovým prvkem, jeho sloučeniny se účastní řady reakcí jako donory energie nebo jako strukturní části složitých sloučenin, např. ATP, NADP, fosforylovaných sacharidů Calvinova cyklu a kyseliny fosfoglycerové (Tlustoš et al. 2002; Pavlíková et al. 2008).

Rostliny přijímají P ve formě aniontů kyseliny trihydrogenfosforečné, především ve formě H_2PO_4^- a HPO_4^{2-} (Mengel 1991). Fosfor je v nich obsažen v organické i anorganické formě. Na rozdíl od dusičnanů a síranů, které jsou v průběhu asimilace redukovány, zůstávají fosforečnany v oxidovaném stavu (Pavlíková et al. 2008).

V půdním roztoku u běžných půd je koncentrace fosforečnanů velmi nízká (0,3 až 3 mg P/l) a často o dva až tři řády nižší v porovnání s koncentrací ostatních aniontů a kationtů. Poměr mezi hlavními představiteli P v půdním roztoku, H_2PO_4^- a HPO_4^{2-} , závisí především na půdní reakci (Tlustoš et al. 2002). Tvorba solí kyseliny fosforečné v půdě je závislá na pH prostředí (to rozhoduje o přítomnosti iontů v půdním roztoku a v sorpčním komplexu) a zásadně ovlivňuje chování fosforu a jeho dostupnost pro rostliny (Mehmood et al. 2018). Tlustoš et al. (2002) udávají, že většina fosforu při pH 5 je přítomna pouze ve formě H_2PO_4^- , kdežto při pH 7 se poměr obou forem P srovnává. Na tuto skutečnost se rostliny většinou velmi dobře adaptovaly a i při velmi nízkých koncentracích P jsou schopny ho z půdního roztoku přijímat. Tím rostliny překonávají značný koncentrační gradient, neboť koncentrace P v rostlinách je 100 – 1000x vyšší než jeho koncentrace v půdním roztoku (Tlustoš et al. 2002; Vaněk et al. 2007). Vysoký rozdíl mezi koncentracemi fosforečnanů ve vnějším a vnitřním prostředí vede rostliny k využívání řady mechanismů, které řeší jejich příjem především při nedostatečné zásobě ve vnějším prostředí (Tlustoš et al. 2002). Rostliny mohou při nedostatku fosforu v pletivech aktivovat v membránách kořenů fosfatázy a přenašeče s vysokou afinitou k fosforečnanům pro zlepšení

příjmu P (Vaněk et al. 2007). Vylučováním kyselých fosfatáz rostlinami do rhizosféry dochází v půdě vlivem těchto enzymů k odštěpení anorganického fosfátu z organických sloučenin. Jejich hydrolytická aktivita vůči fytrátům Ca a Fe/Al, které tvoří velký podíl organického fosforu v půdě, je pouze omezená. Hydrolytické enzymy produkované rostlinami jsou také málo mobilní (Balík et al. 2021).

Převážná část celkového P v půdách je pro rostliny nepřijatelná (Schilling et al. 2000). V porovnání s ostatními makroprvky se fosfor jeví jako nejméně mobilní. Také jeho dostupnost pro rostliny je, vzhledem k mineralizaci, vazbám v organických materiálech v půdě a vysoké sorpční kapacitě fosforu, velmi nízká (Marschner 1995). Podle Vaněk et al. (2007) příjem fosforu příznivě ovlivňuje dostatečná vlhkost půdy, příznivá hodnota pH (podle půdního druhu by se měla pohybovat od 5,5 do 7), dostatek organické hmoty v půdě a její dobrá biologická činnost a přiměřený obsah přijatelného fosforu (40 – 80 mg/kg P). Jeho přístupná forma v celkovém koloběhu představuje jen nepatrný podíl (Blume et al. 2002; Marschner 2012), podle Schilling et al. (2000) nepřekračuje 10 % z celkového množství. Pro rostliny ve fázi intenzivního růstu je toto množství nedostatečné a těsně u povrchu kořenů rostlin může docházet k vytváření tzv. ochuzených zón. Jejich doplňování závisí na obsahu mobilních forem fosforu a také vlhkosti půdy, kdy s vyšší vlhkostí se zintenzivňuje difuze P ke kořenům rostlin (Balík et al. 2021).

Vzhledem k nízkému obsahu P v půdním roztoku je důležité, aby se po jeho odčerpání dostatečně rychle doplňoval z pevné půdní fáze (Vaněk et al. 2007). Pro příjem málo mobilních a hůře přijatelných forem P z půdy si rostliny vytvořily různé pomocné mechanismy (Balík et al. 2021). Kromě velmi rychlé aktivace fosfatáz a přenašečů s vysokou afinitou k fosforečnanům pro zvýšení transportu P se rostliny snaží také velmi rychle zvětšit prostor pro příjem nedostatkového fosforu. Rostliny redukují nadzemní biomasu i obsah fosforu v ní obsažený a navyšují růst hmoty a délky kořenů (Tlustoš et al. 2002). Také Vaněk et al. (2007) udávají, že zvýšením růstu kořenů na úkor nadzemní biomasy se zvětšuje prostor pro příjem fosforu a rostliny zvyšují i kořenovou sekreci, která umožňuje přijatelnost P v rhizosféře. Bohatá kořenová soustava rostlin je tedy předpokladem pro optimální příjem fosforu. Wang et al. (2008) shodně uvádějí, že při nedostatku P v půdě rostliny vytvářejí členitější a hustší kořenový systém a omezuje se růst nadzemní biomasy.

Během celé vegetace je příjem fosforu rostlinami poměrně rovnoměrný (Tlustoš et al. 2002; Vaněk et al. 2007; Pavlíková et al. 2008), ovšem pro dobrý výnos s odpovídající kvalitou produkce je rozhodující obsah P v mladých rostlinách (Vaněk et al. 2007), kdy toto období je považováno za kritické, neboť rostlina vyčerpala

zásoby fosforu v semenu a přechází na autotrofní výživu (Vaněk et al. 2002; Pavlíková et al. 2008). V nárocích na fosfor se jednotlivé druhy rostlin výrazně neliší. Vzhledem k tomu, že nejvíce P je soustředěno v semenech, je nejvíce fosforu exportováno při sklizni obilovin. Rostliny si také různě osvojují fosfor z půdy – z polních plodin nejlépe bobovité rostliny, hlavně jeteloviny, také hořčice a pohanka, méně okopaniny a nejméně obiloviny a z nich pak ječmen (Vaněk et al. 2007).

Nedostatek fosforu narušuje životní procesy rostlin, především fotosyntézu, a důsledkem je snížení výnosů a obsahu cukru, škrobu, bílkovin a dalších složek v pěstovaných produktech (Vaněk et al. 2007). Příjem fosforu je závislý na energetických zásobách v rostlinných pletivech a jeho nedostatek tak může nastat nejen při nedostatečném příjmu z vnějšího prostředí, ale i v případě nedostatku energie akumulované ve fosforečných esterech (Withers et al. 2014). Aktivní proces příjmu fosforu vyžaduje dostatek energie z makroergických vazeb v ATP uvolněných pomocí enzymu ATPasy (Vaněk et al. 2007). To znamená, že i u rostlin, které mají k dispozici dostatečné množství přístupného P, ale nemají energii na jeho transport, může nastat nedostatek fosforu. Zvláště teplomilné rostliny tak při nízkých teplotách mohou zpomalně asimilovat a mít nedostatek energie pro příjem P i při jeho dostatku v půdě. Např. u rostlin kukuřice nebo rajčete se nedostatečný příjem P při nízkých teplotách projeví anthokyanovým zbarvením listů a stonků. Při změně teploty takto vzniklý nedostatek fosforu většinou odezní a další vývoj rostliny výrazně neovlivní (Tlustoš et al. 2002). Při krátkodobém nedostatku fosforu nejsou na rostlinách příznaky nedostatku této živiny zřetelné, ale jeho nízký obsah omezuje některé biochemické funkce, především fotosyntetickou kapacitu rostliny (Pavlíková et al. 2008). Pokud má tento nedostatek delší trvání, např. na půdách s nízkým obsahem přijatelného P, s nepříznivým pH a nízkou biologickou činností, na utužených částech pozemků (především souvratích), při dlouhotrvajícím chladném počasí, nedostatečné vlhkosti půdy nebo u rostlin s malou osvojovací schopností P, případně u rostlin teplomilných, rostliny již vykazují zjevné příznaky (Vaněk et al. 2007). Při dlouhodobém nedostatku fosforu dochází k trvalým změnám na habitu rostlin; je omezena tvorba biomasy, rostliny jsou nižší, mají užší, menší a vzpřímené listy, slabší stonky a obiloviny omezují odnožování. Poměr mezi hmotností nadzemní biomasy a kořenů je značně omezen. Rostliny nadbytečně ukládají zásobní látky ve formě sacharidů, především škrobu. Ovocné stromy omezují růst letorostů, tvorbu květů, semen a plodů (Tlustoš et al. 2002).

4 Moderní trendy ve výživě rostlin P

Fosfor je ve výživě rostlin nezastupitelným prvkem (Mengel 1991). Jeho zásoba v přijatelné formě v půdách klesá, a pro výnos a kvalitu produkce se P stává limitujícím faktorem. Hnojení statkovými (popř. jinými organickými hnojiv) i minerálními fosforečnými hnojiv je u nás v současnosti z mnoha důvodů omezené a sklizněmi plodin se z půdy odčerpává více fosforu, než do ní bilančně vstupuje. Množství přístupného fosforu v půdě se tím tedy stále snižuje (Kunzová 2009). Nedostatečné množství dostupného fosforu v půdě je v průmyslově vyspělých zemích doplňováno vysokými vstupy fosforečných hnojiv, aby byla zajištěna vysoká produkce plodin (Sanchez et al. 1997). Vzniká tak globální nerovnováha obsahu fosforu v zemědělské půdě - na jedné straně je limitující živinou rostlinné produkce a na druhé je nadměrně akumulován v půdě (Syers et al. 2008). To však může na přehnojovaných půdách zatěžovat životní prostředí eutrofizací vodních zdrojů (Sanchez et al. 1997).

Ve vstupech fosforu do agroekosystémů existují značné rozdíly, které jsou dány rozvojem zemědělství i rozdílnými přístupy a možnostmi z geografického hlediska (Syers et al. 2008). Zásoby fosfátů jsou geograficky nerovnoměrně rozložené, Evropa jich má méně než 1 % (Edixhoven et al. 2013). Jejich těžba závisí na geologickém uložení a fyzikálních vlastnostech hornin (Manning 2008).

Minerální fosforečná hnojiva se vyrábí z fosfátových hornin nacházejících se na mnoha místech naší planety jako minerály s různou koncentrací fosforu. Fosfáty se v přírodě vyskytují jako fosfority a apatity. Fosfority, patřící mezi sedimentární horniny, se podílejí na výrobě fosforečných hnojiv z 80 až 90 % (Tlustoš et al. 2008). Fluoroapatit je nejběžnějším těženým fosfátem (Yang et al. 2021). Zdroje karbonátových fluoroapatitů se nachází především v Maroku a dalších státech severu Afriky, v USA, na Blízkém Východě a v Číně (Tlustoš et al. 2008). Apatity sedimentárních hornin mají velký komerční význam, protože jako měkké minerály s mikrokrystalickou strukturou je možné je po předchozí mechanické úpravě přímo aplikovat do půdy (Yang et al. 2021). Přímá aplikace fosfátů je výhodná z více hledisek: surovina se aplikuje v původním stavu, nejsou nutné téměř žádné chemické úpravy, využitelnost P může být za určitých půdních podmínek vyšší než z vodorozpustných P hnojiv, obsahuje i další živiny, především vápník, a jejich cena je podstatně nižší. Aplikace je omezena hlavně vlastní reaktivitou použitého hnojiva a vlastnostmi půdy. Vhodná je aplikace do půd s $\text{pH} < 5,5$ při nízké koncentraci přístupných vápenatých iontů, nízké zásobě přístupného P, vysokém obsahu organické hmoty

a vyšší vlhkosti (Tlustoš et al. 2008). Apatity magmatického a metamorfního původu jsou méně reaktivní, při výrobě hnojiv jejich dobře vyvinutá krystalická formace vyžaduje chemickou úpravu (Manning 2008). Tlustoš et al. (2008) udává jejich 10 až 20% podíl na produkci fosforečných hnojiv. Tyto zdroje se nacházejí v Rusku, Kanadě, Jihoafrické republice, Brazílii, Finsku a Zimbabwe. Fosforečná hnojiva se vyrábějí z horninového fosfátu chemicky zpracovaného převážně minerálními kyselinami, aby se narušila vazba apatitu a zvýšil se obsah vodorozpustného P (Černý et al. 2021). Jak je patrné z vývoje produkce P hnojiv, na trhu se zvyšuje podíl koncentrovaných fosforečných hnojiv, především fosforečnanů amonných a také kombinovaných NPK hnojiv, jejichž výroba je ekonomicky výhodnější a snižuje také náklady na dopravu, ovšem je značně problematická zatěžováním životního prostředí vznikajícím odpadem v podobě fosfosádry. Problémem je kromě stále se zvyšujícího množství této odpadní látky také obsah rizikových příměsí, často toxických pro životní prostředí. Naproti tomu podíl hnojení jednoduchými fosfáty stagnuje, důvodem je především ekonomické hledisko, jak při výrobě, tak při jejich transportu – obsah P je až třikrát nižší než mají koncentrovaná P hnojiva, čímž se neúměrně zvyšují náklady na aplikaci. Zapomíná se ovšem na to, že těmito hnojivy do půdy dodáváme také určité množství síry a vápníku a především při jeho výrobě nevzniká riziková fosfosádra. Kompromisem je výroba částečně rozložených fosfátů, kdy je k rozkladu potřeba méně kyseliny, nevznikají odpadní produkty a produkce odpadních plynů je omezena (Tlustoš et al. 2008).

4.1 Lokální aplikace P hnojiv, foliární aplikace P

První pokusy s lokální aplikací průmyslových hnojiv, jak zmiňují Balík et al. (2002), byly uskutečněny již v 80. letech devatenáctého století. Další sledování probíhala po 2. světové válce, kdy byl nedostatek hnojiv a společná kombinace setí a aplikace hnojiv byla výhodná. Tento způsob lokálního hnojení se týkal především aplikace granulovaných superfosfátů k širokořádkovým plodinám a z tehdejších pokusů bylo zřejmé pozitivní ovlivnění výnosů sledovaných plodin.

Význam lokální aplikace se v předchozích letech výrazně snížil v důsledku intenzivního hnojení P hnojivy a tím dosažení vyšší hladiny přijatelného fosforu v půdách (Balík et al. (2002). Plošná aplikace fosforečných hnojiv je nejčastější formou hnojení P. Zvláště u fosforu je ovšem využití rostlinami u takto aplikovaných hnojiv minimální. Dlouhodobé pokusy

prokázaly až 85% imobilizaci fosforu z minerálních hnojiv různými chemickými a biologickými procesy. Navíc při běžných půdních testech na stanovení přístupného P tento fosfor následně není detekován a dochází k nadměrnému hnojení. Fosfor je akumulován v půdě a zvyšuje se riziko jeho uvolnění do prostředí (MacDonald et al. 2011).

V současné době však spotřeba fosforečných hnojiv klesá a snaha o ovlivnění prostorové přijatelnosti fosforu je zase aktuální (Balík et al. 2002). Také Withers et al. (2014) udávají jako jednu z možností zvýšení využitelnosti fosforu rostlinami a snižování vstupů fosforečných hnojiv modifikaci metod aplikací, které umožňují dopravení P hnojiv blíže ke kořenům rostlin. Lepší využití fosforu aplikací hnojiv „pod patu“ nebo na list vede k výraznému omezení fosforečných hnojiv ve výživě rostlin, např. Wager et al. (1986) dosáhli v pokusech na kanadských černozemích téměř shodných výsledků při aplikaci 10 kg P/ha „pod patu“, jako při plošné aplikaci 40 kg P/ha. Podle Lal & Stewart (2015) jsou rovněž pásovou aplikací P hnojiv dosahovány dobré výsledky, zvláště když je tato aplikace realizována jindy než setí rostlin.

Aplikace fosforečných hnojiv při setí plodiny tzv. „pod patu“ je specifická pro kukuřici, která má v počátečních vývojových stádiích, v období pomalého rozvoje kořenového systému, vysoké nároky na fosfor. Především v chladných oblastech, případně chladných letech, je omezen rozvoj kořenového systému kukuřice a snižuje se také příjem fosforu z půdního roztoku v důsledku nedostatku energie pro tento aktivní proces. Vlastní aplikace musí být kvalitně provedena, v případě hnojiv typu amofos je nutné především dodržet optimální vzdálenost od výsevu osiva, aby nedošlo k poškození vzcházejících rostlin uvolňovanými NH_4^+ ionty (Balík et al. 2002).

Další z aplikačních možností, foliární, mimokořenová aplikace fosforečných hnojiv, není zárukou zlepšené výživy rostlin fosforem. Předně proto, že fosforečné sloučeniny pronikají do pletiv rostlin jen obtížně a pozvolna, a také proto, že v době nedostatku fosforu (především na počátku vegetace) mají rostliny malou listovou plochu, na které ulpí jen menší část aplikovaného roztoku (Vaněk et al. 2002). Naproti tomu Withers et al. (2014) udávají možné významné zvýšení využití fosforu rostlinami při listové aplikaci fosforečných hnojiv, které ovšem závisí na plodině, termínu aplikace a vlhkostních a teplotních podmínkách. Na půdách deficitních na fosfor může být listová aplikace efektivní. 30 – 60 % aplikovaného fosforu rostliny přijmou během dvou až tří dnů. Pokud je však překročena limitní koncentrace fosforu může dojít k popálení listů; v tomto případě je dle Bindraban et al. (2020) důležitá také forma fosforu v hnojivu – v polyfosforečnanech může být aplikováno více fosforu v porovnání s orthofosforečnany.

Foliární aplikaci hnojiv lze navíc spojit s aplikací pesticidů a tím redukovat náklady. Rychlý účinek, vysoké využití a aplikace v místě potřeby snižují možnost kontaminace životního prostředí. Nevýhodou může být krátká doba účinku i komplikace s aplikací v nepříznivém počasí (Scherer et al. 2007).

4.2 Využití biostimulantů

Další možnou strategií zpřístupnění fosforu rostlinám je aplikace jednoduchých nebo kombinovaných přípravků obsahujících mikroorganismy, které mohou podpořit příjem a využití anorganického a organického P z půdního roztoku.

Podle Richardson et al. (2009) mohou rhizosférní mikroorganismy především 1) zvětšit pomocí mykorhizy rozlohu kořenového systému, 2) zintenzivnit růst kořenů a jejich větvení, podpořit tvorbu kořenového vlášení, 3) přímo se podílet na zvýšení dostupnosti živin v půdě nebo stimulovat metabolické procesy, které přístupnost živin zvyšují (příkladem může být zvyšování exsudace protonů a organických aniontů), 4) ovlivnit sorpční rovnováhu směrem k vyšší koncentraci živin v půdním roztoku nebo změnu zastoupení určité živiny mezi anorganickou a organickou frakcí, 5) urychlovat přeměny a metabolismus mikrobiální biomasy v rhizosféře.

Schopnost exkrece H^+ , organických aniontů a extracelulárních enzymů vykazuje mnoho půdních mikroorganismů, které tak mohou přímo zpřístupňovat fosfor v půdě. Tyto mikroorganismy jsou obecně známy jako fosfát-mobilizující mikroorganismy (PSM – phosphate-solubilizing microorganisms). Charakteristickou vlastností je pro ně rozpouštění anorganických sloučenin fosforu. Patří sem mnoho symbiotických i nesymbiotických mikroorganismů, např. z rodu *Pseudomonas*, *Aspergillus*, *Bacillus* nebo *Penicillium* (Gyaneshwar et al. 2002). Podle Bashan et al. (2013) je nutné testovat nově izolované mikroorganismy na fosfor v různých formách a poté vybrat vhodné kmeny v závislosti na druhu cílové půdy, tzn. pro kyselé půdy vybrat kmeny schopné rozpouštět fosforečnany hlinité a železité, pro zásadité půdy kmeny rozpouštějící fosforečnany vápenaté a dále pro organickou půdu kmeny, které zpřístupňují fosfor z fytátů.

Schopnost určitého mikroorganismu zpřístupňovat fosfor však ještě není zárukou jeho pozitivního vlivu na růst rostlin (Vessey 2003). Velkou rolí v účinnosti inokulovaných mikroorganismů hraje jejich schopnost a kapacita kolonizace, přežití a rozmnožení se

ve značně konkurenčním prostředí rhizosféry (Gyaneshwar et al. 2002; Richardson et al. 2011).

Pozitivní vliv na růst a odolnost vůči biotickým a abiotickým stresům u četných plodin mají půdní mikroorganismy označované jako arbuskulární mykorhizní houby (AMF) a *Trichoderma* spp. (Buysens et al. 2016). AMF jsou všudypřítomnými mikroorganismy, které žijí v symbiotických společenstvech s mnoha suchozemskými rostlinami. Rostlinám poskytují minerály (především fosfor) výměnou za sacharidy (Smith & Read 2008). Podle Incesu et al. (2015) podporují AMF absorpci minerálů (především fosforu, zinku a mědi), zvyšují absorpci vody, stimulují růst, zvyšují odolnost vůči půdním chorobám a enviromentálnímu stresu, zlepšují kvalitu produkce. Vzájemně prospěšné interakce s AMF je schopno využívat asi 80 % suchozemských rostlin (Smith & Read 1997). Zlepšený příjem fosforu rostlinami při inokulaci AMF je znatelný především u půd s omezeným množstvím P (Ortas et al. 2002). Toto symbiotické spojení není typické pro všechny rostliny, v závislosti na rostlinném druhu a AMF se výskyt kolonizace kořenů liší (Jeffries & Barea 2001). Houby *Trichoderma* spp. se přirozeně vyskytují v půdě a rhizosféře rostlin. V symbioze s rostlinami zlepšují jejich růst, zvyšují příjem živin a odolnost biotickým stresům (Harman et al. 2004). Kolonizace kořenového systému u rodu *Brassicaceae* podporuje růst a vývoj rostlin a stimuluje systémovou ochranu (Poveda et al. 2019). Preparáty na bázi hub rodu *Trichoderma* se komerčně nabízejí jako pomocné přípravky proti široké škále fytopatogenních druhů hub především pro skleníkové i venkovní kultury, ovšem jejich vliv na zpřístupnění fosforu rostlinám není dostatečně prokázán.

Biostimulanty obsahující prospěšné rhizobakterie se označují jako PGPR (Plant growth promoting rhizobacteria), tj. rhizobakterie podporující růst rostlin (Wu et al. 2005). Jde o heterogenní skupinu půdních bakterií žijících ve spojení s kořeny rostlin, které mohou různými mechanismy přímo nebo nepřímo zlepšovat růst rostlin (Nelson 2004). Použitím očkovacích látek s bakteriemi mobilizujícími fosforečnany se zvyšuje výnosový potenciál pěstovaných plodin. Mezi nejúčinnější v oblasti solubilizace fosfátů patří kmeny z rodu *Pseudomonas*, *Bacillus* a *Rhizobium*. Tyto bakterie produkují organické kyseliny a kyselou fosfatázu a pozitivně ovlivňují mineralizaci organického fosforu v půdě. Patří sem aerobní i anaerobní kmeny (s převahou aerobních) žijící v půdách (Raghu & MacRae 1966). Účinnost bakteriálního biostimulantu může být ovlivněna vnějšími vlivy, např. teplotou, vlhkostí, světlem. Pro použití je nutné jej smíchat s vhodným nosičem pro udržení životaschopnosti a snadnou aplikaci (Altuhaish et al. 2014).

Také výtažky z řas a rostlin, např. *Ascophyllum nodosum*, *Yucca schidigera* či *Pueraria montana* var. *Lobata*, se považují za vhodné pro výrobu biostimulantů (Khan et al. 2009). Při aplikaci postřikem na list nebo mořením osiva mohou mít stimulační účinky na růst rostlin a jejich výnos (Rao 1991), zvyšovat toleranci vůči stresu (Zhang et al. 2003), zvyšovat příjem živin z půdy a antioxidační vlastnosti (Verkleij 1992) a také zvyšovat obranyschopnost rostlin proti různým patogenním virovým, bakteriálním a houbovým chorobám (Percival 2010).

Aplikací biostimulantů mobilizujících půdní fosfor v praxi se zabýval projekt Biofactor. V letech 2012 – 2017 se v několika evropských zemích (včetně ČR) a Izraeli testovaly v nádobových i polních pokusech téměř čtyři desítky různých biostimulantů, které zahrnovaly jednotlivé kmeny bakterií a hub a rovněž extrakty z mořských řas, rostlin, kompostů a vermikompostů. Aplikovány byly biostimulanty jednotlivé a ve směsích. Testy probíhaly na pšenici, kukuřici a rajčeti. V případě rajčete i kukuřice se aplikace biostimulantů ukázala jako průkazná, u pšenice byly výsledky statisticky neprůkazné. V případě jednotlivých aplikací nebyly pozorovány významné rozdíly mezi kmeny bakterií a hub a biostimulantů nemikrobiální povahy. Produkty založené na konsorciích (směsích) mikroorganismů byly mnohem účinnější. Kombinace biostimulantů s odpadními materiály a produkty nezvyšovala jejich hnojivý účinek. Ke zvýšení výnosů došlo při kombinaci biostimulantů s hnojem. Použití biostimulantů pro zpřístupnění fosforu rostlinám je v podmínkách praxe stále velmi omezené a produkt zajišťující pozitivní a opakovatelný výsledek zatím neexistuje (Mercl et al. 2021).

4.3 Využití různých odpadních materiálů z hlediska výživy P

Fosfor má v zemědělství klíčovou roli jako živina, na druhé straně je ale považován za znečišťující látku ve vodách, do kterých se prostřednictvím eroze orné půdy a odpadních vod dostává. Pokud budeme produkci fosforu z lidské činnosti recyklovat zpět na zemědělskou půdu, odkud byl exportován, je možné i v oblastech závislých na globálních trzích s fosforečnými hnojivy udržet rovnováhu v produkci potravin (Reijnders 2014).

Civilizace produkuje stále větší množství organických odpadů a vedlejších produktů, které je možné v zemědělství znovu využít jako zdroje fosforu (Withers et al. 2014). V posledních desetiletích se výrazně zvýšilo agronomické využití organických materiálů a vedlejších produktů, které se dříve jako odpady vyvážely na skládky. S využitím anaerobní fermentace, spalování, pyrolýzy nebo kompostování komunálního odpadu dochází ke vzniku

hnojiv (Cordell et al. 2011). Pevné komunální odpady, komposty, zbytky anaerobní fermentace, popel a další biologické zdroje mohou kromě fosforu obsahovat organické látky a živiny v množství, které může vylepšit strukturu půdy a její úrodnost a nahradit anorganická hnojiva (Withers et al. 2014). Černý et al. (2021) uvádí jako možné zdroje fosforu zbytky plodin, odpady potravinářského průmyslu a i nevyužité potraviny, zvířecí a lidské exkrementy a i další možné zdroje jako kostní moučka, popel a řasy.

Použití druhotných surovin jako zdrojů fosforu může přispět k udržitelnějšímu zemědělství. Průmyslové i biologické odpadní materiály mohou být přímo aplikovány ke hnojení nebo na hnojiva přetvořeny jinými způsoby, např. vysrážením fosforečných solí, pyrolýzou, spalováním nebo zplyňováním. Aby byl takto získaný fosfor použitelný jako hnojivo, musí být pro rostliny přístupný (Huygens & Saveyn 2018).

Pokud je fosfor v odpadních materiálech a vedlejších produktech přítomen v dostatečném množství, je možné ho získávat a používat opakovaně (Černý et al. 2021). Recyklace fosforu je důležitá ekonomicky i ekologicky. Je závislá na dostupnosti technologických procesů a specializovaných recyklačních zařízení (Desmidt et al. 2015).

4.3.1 Přímá aplikace odpadních materiálů

Mezi nejjednodušší a často nejlevnější způsoby opakovaného využití fosforu bez chemické úpravy patří přímá aplikace statkových hnojiv (hnůj, kejda), kompostů, digestátu z výroby bioplynu, stabilizovaného čistírenského kalu, popela ze spalování biomasy a/nebo čistírenských kalů (Černý et al. 2021). Také Lu et al. (2012) uvádí jako nejjednodušší způsob přímou aplikaci odpadů na zemědělskou půdu. Jde o celosvětově aplikovanou a desetiletí praktikovanou strategii. Podle Černý et al. (2021) je tímto nejstarším a současně nejrozšířenějším způsobem recyklace P řešena také aplikace dalších živin, organické hmoty apod.

Zdrojem fosforu, organické hmoty, dusíku a dalších živin je aplikace čistírenských kalů, které je tak možné využít pro zachování koloběhu uhlíku a živin na zemědělské i degradované půdě (Kowaljow et al. 2010). Jejich výhodou jsou nízké investiční náklady a v případě kompostování také zvýšení jejich kvality. Nevýhodou v nízkoteplotních provozech je dlouhá doba stabilizace (Ciešlik et al. 2014). Velké objemy kalů také komplikují přepravu a manipulaci. Problémem pro životní prostředí je možný obsah rizikových prvků, organických polutantů, parazitů a patogenních mikroorganismů (Dean & Suess 1985, Černý et al. 2021). Nevýhodou může být rovněž pomalé uvolňování P např. z fytinových vazeb a přeměny

P v půdě po aplikaci výše uvedených hnojiv, kdy je omezena přístupnost fosforu pro rostliny (Černý et al. 2021).

4.3.2 Úprava odpadních surovin

4.3.2.1 Vysrážení fosforečných solí z kalů

Při úpravě odpadních surovin je cílem snížení nebo vyloučení přítomnosti nežádoucích látek jako jsou rizikové prvky, rezidua farmak a další kontaminanty (Černý et al. 2021). Jednou z celosvětově nejrozšířenějších technologií je získávání fosforu zpětně z čistírenských kalů pomocí vysrážení (Ciešlik & Konieczka 2016). Tato technologie, při níž vznikají struvity, hydroxiapatity, popř. fosforečnany vápenaté, je již zavedena v mnoha provozech (Yuan et al. 2012). Jde o velmi kvalitní fosforečné minerály, které mají nízký obsah rizikových prvků a jsou přímo použitelné v zemědělství (Nakakubo et al. 2012). Na jedné straně je tedy produkováno okamžitě využitelné hnojivo, na druhé vzniká při jeho chemické produkci mnoho jiných odpadních látek (rizikové prvky, kal o nízkém pH a výluhy), které je nutné neutralizovat a následně likvidovat. Nevýhodou je často malá rozpustnost takto získaných hnojiv a jejich pomalé uvolňování pro rostliny (Černý et al. 2021). Tato horší rozpustnost se jeví jako výhoda v případě jejich nadměrné aplikace, kdy nedochází k úniku fosforu do prostředí a eutrofizaci vod (Kataki et al. 2016).

Struvity dosahují téměř kvality minerálních P hnojiv a vykazují stabilní výsledky nezávisle na pěstované plodině a vlastnostech půdy (Huygens & Saveyn 2018). V provozech čistíren odpadních vod s přidruženou výrobou bioplynu, kde je zvýšená koncentrace Mg^{2+} , NH_4^+ a PO_4^{3-} při vysokém pH (7,0-11,0) může docházet ke spontánnímu vzniku struvitu. Ten pak může ucpávat potrubí. Prevencí může být řízené srážení struvitu, který se následně může využít jako hnojivo (Jaffer et al. 2002).

4.3.2.2 Torefakce, pyrolýza

Jednou z možností bezpečné aplikace kalů na zemědělskou půdu je jejich termická úprava torefakcí či pyrolýzou, kdy jsou odstraněny nebo významně redukovány možné rizikové organické polutanty (Mercl et al. 2021). Torefakce je nízkoteplotní (cca do 300-350 °C) proces probíhající bez přístupu kyslíku. Při pyrolýze se vstupní materiál zahřívá na teploty v rozmezí 300-1000 °C (Barik 2019).

Při procesu pyrolýzy se výchozí organická hmota přeměňuje na složku plynou (pyrolýzní plyn), kapalnou (pyrolýzní olej) a složku pevnou (biochar nebo také biouhel),

jak udává Carey et al. (2015). Množství a složení biocharu je ovlivněno podmínkami pyrolýzy. Kal a výsledný biochar je během tohoto procesu dezinfikován působením vysokých teplot (Mašek et al. 2013). Tlustoš et al. (2021) uvádí, že termickou úpravou je velmi pozitivně ovlivněno spektrum organických kontaminantů, kdy teplota 320 °C znamená razantní pokles jejich obsahu pro většinu z nich a teplota 420 °C pak pro všechny, včetně persistentních. Různé chemické transformace organických látek v průběhu pyrolýzy vedou k jejich vyšší stabilitě a zvyšuje se i odolnost vůči mikrobiální degradaci (Mašek et al. 2013).

Biochar vyrobený z čistírenského kalu je schopný dodat do půdy živiny (především fosfor) a zlepšit následný příjem těchto živin rostlinami (Gondek et al. 2019). Podíl přístupného P klesá se zvyšující se teplotou termické úpravy (Tlustoš et al. 2021). Podle Mercl et al. (2020) obsah živin a jejich přístupnost z biocharů vyprodukovaných z kalu při různých teplotách není zcela prozkoumána a jejich vliv na růst a výživu rostlin tak nelze dostatečně předpovědět.

4.3.2.3 Spalování

Nejnákladnějším procesem úpravy je spalování čistírenských kalů a produkce hnojiv ze vzniklého popelu. Snižuje se při něm výrazně objem suroviny a dochází k eliminaci patogenních činitelů, ale zvyšuje se zároveň koncentrace rizikových prvků, vznikají polycyklické aromatické uhlovodíky a snižuje se také přístupnost P pro rostliny. Pro odstranění rizikových prvků a zlepšení mobility fosforu je třeba popel náročně upravovat. Obtížnou aplikaci popelu lze řešit granulováním nebo peletizací, což představuje další zvyšování už tak vysokých nákladů. Použití v zemědělství není ekonomické; popel ze spalování čistírenských kalů je spíše využíván ve stavebnictví do cementových směsí nebo jako příměs do asfaltu (Shafii et al. 2019). Také Huygens & Saveyn (2018) popel z odpadů upravených spalováním uvádějí jako možnou kvalitní náhradu minerálních hnojiv. Jeho kvalitu však velmi ovlivňuje zdrojový materiál, proces spalování, následná opatření a také délka vegetační doby pěstovaných rostlin.

4.4 Šlechtění rostlin na lepší/nížší příjem P

Rostliny obsahují fosfor v mnoha různých formách. Je součástí např. cukrů, tuků i bílkovin, ovšem primárně se jeho sloučeniny podílejí na stavbě nukleových kyselin (DNA, RNA) a ve formě adenosintrifosfátu (ATP) zajišťují přenosy energie. Potřeba energie k fotosyntéze tak také určuje požadavky rostlin na množství fosforu (Ghannoum et al. 2008). Běžný odběr fosforu rostlinami je nicméně mnohem vyšší, než je jeho potřeba na tvorbu ATP a RNA, což znamená, že značnou část fosforu rostliny uloží ve vakuolách jako orthofosforečnany, fosfolipidy, estery a fytáty (Veneklaas et al. 2012). Část orthofosforečnanů průběžně doplňuje do cytoplazmy fosfor potřebný pro syntézu RNA (Reich et al. 2010), část fytátů se podílí na tvorbě fytinu v semenech, jako zásobní sloučeniny pro klíčení (Nadeem et al. 2011). Určitá část fosforu však není rostlinami využita a nadbytečná zásoba fytátů ve vakuolách a později v semenech je pro monogastry (včetně člověka) nesnadno využitelným zdrojem fosforu a může zároveň snižovat příjem esenciálních prvků jako je Fe a Zn a také kationtů Ca a Mg (White & Broadley 2009). Je tedy snahou vyšlechtit rostliny, které budou odebírat méně fosforu a nebude přitom ovlivněna jejich životaschopnost a výnos (Wang et al. 2010).

Šlechtění je dále zaměřeno na možnosti zlepšení příjmu fosforu při jeho nedostatku v půdě. Jde např. o možnosti podpory symbiotické mykorhizy (Parihar et al. 2019), uvolňování různých exsudátů mobilizujících organický i anorganický fosfor (Jones et al. 2009), fyziologické změny, které minimalizují potřebu P při metabolismu (Postma & Lynch 2010), zprostředkování transportu vody kořeny rostlin z hlubších vrstev půdy do suché ornice a tím zvýšení rozpustnosti fosforu (Shen et al. 2011) a podporu růstu kořenů (Lynch 2007).

Kořenový systém je stabilizujícím prvkem v produkci plodin, především v méně vhodných podmínkách (Gewin 2010). Zlepšení kořenového systému je „klíčem ke druhé zelené revoluci“ (Lynch 2007). Kořeny kotví rostliny v půdě a jejich úlohou je z ní přijímat živiny a vodu. Jejich hloubka tak určuje potenciál pro příjem vody a živin z hlubokých vrstev podorničí (Kautz et al. 2013).

Jednotlivé znaky kořenového systému jsou geneticky založeny a je tedy možnost cíleného výběru a šlechtění rostlin na specifické podmínky nebo systémy pěstování (Lynch & Brown 2012). Pro efektivní příjem fosforu, který je v půdě málo pohyblivý, je důležitá kromě hustoty kořenů také délka kořenového vlášení (Brown et al. 2013). V méně úrodných půdách nebo při nedostatku fosforu při ekologické produkci se význam

těchto znaků bude zvyšovat, naproti tomu se rozdíly mezi genotypy nemusí projevit při vysokých dávkách fosforečných a organických hnojiv. Hluboký a aktivní kořenový systém je podmínkou stability výnosů, umožňuje využití vody a živin z podorničí a omezuje tím ztráty živin vyplavením (Haberle et al. 2018).

Pro udržení současné úrovně produkce plodin při zhoršeném stavu půd a častém výskytu sucha jsou jedním z nezbytných předpokladů zlepšené vlastnosti kořenové soustavy. Zde existuje velký potenciál pro cílené šlechtění různých znaků kořenů a kořenové soustavy na ovlivnění příjmu živin a vody, včetně příjmu za stresových podmínek. Na významný pokrok v této oblasti se stále ještě čeká (Haberle et al. 2018).

4.5 Využití nanotechnologií

V nedávné době bylo zkoumání a použití nanotechnologií předmětem výzkumu pouze na technických univerzitách a ve specializovaných vědeckých pracovištích. Tato disciplína se prolíná mnoha obory současně, věnuje se jí fyzika, chemie, molekulární biologie i robotika.

V současné době je snaha o pronikání této technologie i do zemědělství, kde mohou být nanočástice využity jako nosiče látek aplikovaných na rostliny, ev. jako nanočipy – biosenzory v precizním zemědělství. To znamená, že ke zvýšení zemědělského výnosu je snaha využít nanoenkapsulovaná konvenční hnojiva a pesticidy, které budou postupně a dlouhodobě uvolňovat účinné látky a přispívat tak k přesnější a účinnější aplikaci (Duhana et al. 2017).

Až polovina konvenčních hnojiv je v zemědělství rostlinami nevyužita, v závislosti na metodě aplikace a stavu půdy, a může znamenat značné riziko pro kontaminaci vod. Jsou vyčerpávány přírodní zdroje a dochází k narušení ekosystémů. Při současném růstu světové populace se prosté navyšování agrochemické produkce jeví jako problém. Možností je snižování výroby a využití agrochemikálií například jejich enkapsulací, kdy je snaha o dosažení jejich cíleného působení a efektivního uvolňování. Snižily by se tím celkové dávky agrochemikálií a také jejich ztráty v životním prostředí a zvýšila by se účinnost používaných sloučenin, což by v důsledku vedlo ke zvýšení efektivity zemědělského procesu (Rodrigues et al. 2017).

Enkapsulací rozumíme metodu umožňující aplikovat agrochemikálie v nové formě. Obecně jde o povlak, obal nebo zachycení účinné látky nebo směsi v jiném materiálu. Enkapsulovat lze kapaliny, pevné látky i plyny. Vnější, obalující materiál, musí především

umožňovat pohyb malých molekul do okolí (Gibbs et al. 2009). Výhodou enkapsulace je především použití účinné látky v požadované koncentraci na určité místo v určený čas, možnost transformace kapalin nebo lepkavých látek na snaději přepravovatelný a skladovatelný prášek, izolace a ochrana před vlivy vnějšího prostředí a naopak ochrana vnějšího prostředí před enkapsulovanou účinnou látkou a také možnost zkombinovat špatně slučitelné materiály v jednom produktu. Hlavními mechanismy uvolnění enkapsulované látky jsou difuze, degradace, změna pH, teploty, tlaku nebo přítomnost rozpouštědla (Silva et al. 2014).

Použití enkapsulace v zemědělství zpočátku, především kvůli velmi proměnlivým a nekontrolovatelným přírodním podmínkám v prostředích aplikace kapslí, nedosáhlo počátečních očekávání. V poslední době však opět značně roste zájem o tuto techniku. Význam enkapsulace dokládá i akademický výzkum a rostoucí počet patentů (Hack et al. 2012).

5 Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo formou literární rešerše shrnout dostupné aktuální poznatky a informace o výživě rostlin fosforem. Práce je zaměřena na zhodnocení možností konvenčních metod fosforečného hnojení vzhledem k ubývajícím neobnovitelným zdrojům fosforu a pak především na možnosti, ale i rizika, metod využívajících obnovitelné zdroje fosforu, které jsou mnohdy chybně považovány pouze za „odpady“.

V práci je nejdříve ve zkratce představen koloběh fosforu v prostředí, jeho formy a geologická dostupnost a dále i jeho aktivita. Dalším z témat bylo přiblížení funkce fosforu v rostlinách, jeho účast na metabolických procesech a možnosti rostlin při jeho získávání z půdního roztoku. Je zmíněno ovlivnění životního cyklu rostlin při nedostatku přístupného fosforu a reakce rostlin na jeho krátkodobý i déletrvající nedostatek.

Hlavním tématem práce byly moderní trendy ve výživě rostlin fosforem. Výroba konvenčních fosforečných hnojiv je omezena vyčerpatelem jejich geologických zdrojů. Chemická výroba koncentrovaných P hnojiv je ekonomicky velmi náročná a odpady z výrobních technologií představují značnou environmentální zátěž. Při hnojení jednoduchými fosfáty se zase neúměrně zvyšují náklady na přepravu a aplikaci. Ze studia příslušné odborné literatury jsou souhrnně charakterizovány směry, kterými se může ubírat výzkum a využití forem fosforu a jeho zdrojů.

Lokální/foliární aplikace je formou aplikace minerálních fosforečných hnojiv cíleně tzv. „pod patu“/na list. Při dodržení množství hnojiva, místa aplikace a vhodných teplotních a vlhkostních podmínek ve vhodné růstové fázi plodiny je především lokální aplikace efektivní metodou pro širokořádkové plodiny.

Snaha o využití různých druhů biostimulantů je v literatuře široce dokumentována. V laboratorních podmínkách i v zemědělské praxi jsou zkoušeny, a v mnoha případech i běžně používány, přípravky na bázi mikroorganismů (bakterií, hub) i přípravky nemikrobiální povahy (výtažky z řas, rostlin, kompostů a vermikompostů apod.), ovšem jejich pozitivní vliv na lepší zpřístupnění fosforu rostlinám není zatím zcela dokázán. Tyto přípravky mají ovšem často dobré výsledky v potlačování patogenů a škůdců rostlin.

Z ekonomického i environmentálního hlediska je z literatury patrné zaměření na využití odpadních a vedlejších produktů lidské činnosti a z těch pak především čistírenských kalů. Jejich přímá aplikace není vzhledem k často obsaženým rizikovým látkám příliš vhodná. Tyto materiály je tedy nutné chemicky či termicky upravit, což vede ke zvyšování nákladů

na vznikající hnojiva. V současné době se tato cesta znovuvyužití materiálů obsahujících fosfor jeví jako nejschůdnější a je i široce zdokumentována.

Šlechtění rostlin se zaměřením na zvýšené využití fosforu, popř. jeho lepší příjem, cílí podle autorů především na znaky ovlivňující efektivitu kořenového systému. Tento směr moderního výzkumu, stejně jako použití enkapsulovaných forem hnojiv jako příkladu nanotechnologií aplikovaných v zemědělské praxi, se stále vyvíjí a dokladem je i stále širší akademický výzkum a snaha o pokrok v těchto perspektivních oblastech.

6 Literatura

- Altuhaish A, Hamim TA. 2014. Biofertilizer effects in combination with different drying system and storage period on growth and production of tomato plant under field conditions. *Emirates J. Food Agric.* 26: 716-722.
- Balík J, Kulhánek M, Pavlíková D, Tlustoš P. 2008. Fosfor v půdě. Sborník z konference „Racionální použití hnojiv zaměřené na problematiku výživy a hnojení fosforem“, ČZU, Praha, Czech Republic p. 23-30.
- Balík J, Pavlíková D, Kulhánek M, Zitková M, Jakl M. 2002. Lokální aplikace fosforečných hnojiv. Sborník z konference „Racionální použití hnojiv zaměřené na problematiku fosforu v rostlinné výrobě“, ČZU, Praha, Czech Republic p. 74-79.
- Balík J, Pavlíková D, Vaněk V. 2021. Příjem fosforu rostlinami – schopnosti rostlin k mobilizaci fosforu z půdy. Sborník z konference „Racionální použití hnojiv zaměřené na problematiku výživy a hnojení fosforem“, ČZU, Praha, Czech Republic p. 15-22.
- Barik D (Ed.). 2018. Energy from toxic organic waste for heat and power generation. Woodhead Publishing, Cambridge, 17.
- Bashan Y, Kamnev AA, de-Bashan LE 2013. Tricalcium phosphate is inappropriate as a universal selection factor for isolating and testing phosphate-solubilizing bacteria that enhance plant growth: a proposal for an alternative procedure. *Biology and fertility of soils*, 49(4), 465-479.
- Bindraban PS, Dimkpa CO, Pandey R. 2020. Exploring phosphorus fertilizers and fertilization strategies for improved human and environmental health. *Biology and Fertility of Soils*, 56(3), 299-317.
- Blume HP, Brümmer GW, Schwertmann U, Horn R, Knabner IK et al. 2002. Scheffer/Schachtschabel: Lehrbuch der Bodenkunde, Spektrum Akademischer Verlag, Stuttgart, Germany, 607 p.
- Brown LK, George TS, Dupuy LX, White PJ 2013. A conceptual model of root hair ideotypes for future agricultural environments: what combination of traits should be targeted to cope with limited P availability?. *Annals of botany*, 112(2), 317-330.
- Buysens C, Cesar V, Ferrais F, de Boulois HD, Declerck S. 2016. Inoculation of *Medicago sativa* cover crop with *Rhizophagus irregularis* and *Trichoderma harzianum* increases the yield of subsequently-grown potato under low nutrient conditions. *Appl. Soil Ecol.* 105: 137-143
- Carey DE, McNamara PJ, Zitomer DH. 2015. Biochar from pyrolysis of biosolids for nutrient adsorption and turfgrass cultivation. *Water Environment Research*, 87(12), 2098-2106.
- Ciešlik BM, Konieczka P. 2016. A review phosphorus recovery methods at various steps of wastewater treatment and sewage sludge management. The concept of “no solid waste generation” and analytical methods. *J. Clean. Prod.* 142:1728-1740. doi: 10.1016/j.jclepro.2016.11.116

- Ciešlik BM, Konieczka P, Namieśnik J. 2014. Review of sewage sludge management: standards, regulations and analytical methods. *J. Clean. Prod.* 90:1-15. doi: 10.1016/j.jclepro.2014.11.031
- Cordell D, Rosemarin A, Schroder JJ, Smit A. 2011. Towards global phosphorus security: A systems framework for phosphorus recovery and reuse. *Chemosphere* 84:747-758. doi: 10.1016/j.chemosphere.2011.02.032
- Černý J, Balík J, Kulhánek M, Sedlář O. 2021. Fosforečná hnojiva a využití fosforu z odpadních látek. Sborník z konference „Racionální použití hnojiv zaměřené na problematiku výživy a hnojení fosforem“, ČZU, Praha, Czech Republic p. 59-67.
- Daneshgar S, Callegari A, Capodaglio AG, Vaccari D. 2018. The potential phosphorus crisis: resource conservation and possible escape technologies: a review. *Resources*, 7(2), 37.
- Dean RB, Suess MJ. 1985. The risk to health of chemicals in sewage sludge applied to land. *Waste Manag. Res.* 3:251-278. doi: 10.1016/0734-242X(85)90115-6
- Desmidt E, Ghyselbrecht K, Zhang Y, Pinoy L, Van der Bruggen B et al. 2015. Global phosphorus scarcity and full-scale P-recovery techniques: a review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 45(4), 336-384.
- Duhana JS, Kumara R, Kumara N, Kaura P, Nehrab K, Duhanc S. 2017. Nanotechnology: The new perspective in precision agriculture. *Biotechnology Reports* 15, 11–23.
- Edixhoven JD, Gupta J, Savenije HHG. 2013. Recent revisions of phosphate rock reserves and resources: reassuring or misleading? An in-depth literature review of global estimates of phosphate rock reserves and resources. *Earth System Dynamics Discussions*, 4(2).
- Gewin V. 2010. An underground revolution: plant breeders are turning their attention to roots to increase yields without causing environmental damage. Virginia Gewin unearths some promising subterranean strategies. *Nature*, 466(7306), 552-554.
- Ghannoum O, Paul MJ, Ward JL, Beale MH, Corol DI, Conroy JP 2008. The sensitivity of photosynthesis to phosphorus deficiency differs between C3 and C4 tropical grasses. *Functional Plant Biology*, 35(3), 213-221.
- Gibbs BF, Kermasha S, Alli I, Mulligan CN. 1999. Encapsulation in the food industry: a review. *International journal of food sciences and nutrition*, 50(3), 213-224.
- Gondek K, Mierzwa-Hersztek M, Kopeć M, Sikora J, Lošák T, Grzybowski P. 2019. Sewage sludge biochar effects on phosphorus mobility in soil and accumulation in plant. *Ecological Chemistry and Engineering*, 26(2), 367-381.
- Gyaneshwar P, Naresh Kumar G, Parekh LJ, Poole PS 2002. Role of soil microorganisms in improving P nutrition of plants. *Plant and soil*, 245(1), 83-93.
- Haberle J, Středa T, Svoboda P, Henzlová B, Kurešová G. 2018. Kořenový systém plodin pro 21. století - efektivní příjem vody a živin. in Středa T, Rožnovský J (eds): *Monitorování přírodních procesů*. ISBN 978-80-7509-570-1, 978-80-87361-86-3. MENDELU, VÚMOP, v. v. i.

- Hack B, Egger H, Uhlemann J, Henriët M, Wirth W, Vermeer AW, Duff DG. 2012. Advanced agrochemical formulations through encapsulation strategies?. *Chemie Ingenieur Technik*, 84(3), 223-234.
- Harman GE, Howell CR, Viterbo A, Chet I, Lorito M, 2004. *Trichoderma* species opportunistic, avirulent plant symbionts. *Nat. Rev. Microbiol.* 2: 43-56.
- Huygens D, Saveyn HGM. 2018. Agronomic efficiency of selected phosphorus fertilisers derived from secondary raw materials for European agriculture. A meta-analysis. *Agron. Sustain. Dev.* 38:1-14. doi: 10.1007/s13593-018-0527-1
- Ivanič J, Havelka B, Knop K. 1984. *Výživa a hnojenie rastlín. Príroda*, Bratislava, Slovak Republic, 486 s.
- Jaffer Y, Clark TA, Pearce P, Parsons SA. 2002. Potential phosphorus recovery by struvite formation. *Water Res.* 36:1834-1842. doi: 10.1016/s0043-1354(01)00391-8
- Jeffries P, Barea JM. 2001. Arbuscular mycorrhiza – a key component of sustainable plant – soil ecosystems, in *Fungal Associations*, Vol. IX of *The Mycota*, ed. By Hock B. Springer, Berlin, pp. 95-113 In: Martínez-Medina A, Pascual JA, Lloret E, Roldán A. 2009. Interactions between arbuscular mycorrhizal fungi and *Trichoderma harzianum* and their effects on *Fusarium* wilt in melon plants grown in seedling nurseries. *J. Sci. Food Agric.* 89: 1843-1850
- Jones DL, Nguyen C, Finlay RD. 2009. Carbon flow in the rhizosphere: Carbon trading at the soil-root interface. *Plant Soil* 321:5-33. doi: 10.1007/s11104-009-9925-0
- Jones DL, Oburger E. 2011. Phosphorus in Action – Biological Processes in Soil Phosphorus. pp. 169 in Bünermann EK et al., editors, Berlin Heidelberg,
- Kataki S, West H, Clarke M, Baruah DC. 2016. Phosphorus recovery as struvite: recent concerns for use of seed, alternative Mg source, nitrogen conservation and fertilizer potential. *Resour. Conservation Recycl.* 107:142-156. doi: 10.1016/j.resconrec.2015.12.009
- Kautz T, Amelung W, Ewert F, Gaiser T, Horn R et al. 2013. Nutrient acquisition from arable subsoils in temperate climates: A review. *Soil Biology and Biochemistry*, 57, 1003-1022.
- Khan W, Rayirath UP, Subramanian S, Jitesh MN, Rayorath P et al. 2009. Seaweed extracts as biostimulants of plant growth and development. *J. Plant Growth Regul.* 20 (4): 386-399.
- Kolář L, Kužel S. 2002. Organický fosfor v půdách. Sborník z konference „Racionální použití hnojiv zaměřené na problematiku fosforu v rostlinné výrobě“, ČZU, Praha, Czech Republic p. 35-37.
- Kowaljow E, Mazzarino MJ, Satti P, Jiménez-Rodríguez C. 2010. Organic and inorganic fertilizer effects on a degraded Patagonian rangeland. *Plant Soil* 332:135–145. doi: 10.1007/s11104-009-0279-4
- Kunzová E. 2009. *Výživa rostlin a hnojení fosforem. Výzkumný ústav rostlinné výroby, v. v. i., Praha 6 – Ruzyně, Praha.*

- Lal R, Stewart BA. editors, 2015. Soil-specific farming : Precision agriculture. CRC Press. Boca Raton, Florida, USA, 431 p. doi:10.1201/b18759
- Lu Q, He ZL, Stoffella PJ. 2012. Land application of biosolids in the USA: a review. *Appl. Environ. Soil Sci.* 1:1-11. doi: 10.1155/2012/201462
- Lynch JP. 2007. Roots of the second green revolution. *Aust. J. Bot.* 55:493-512. doi: 10.1071/BT06118
- Lynch JP, Brown KM 2012. New roots for agriculture: exploiting the root phenome. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 367(1595), 1598-1604.
- MacDonald GK, Bennett EM, Potter PA, Ramankutty N. 2011. Agronomic phosphorus imbalances across the world's croplands. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 108:3086-3091. doi: 10.1073/pnas.1010808108
- Manning DA. 2008. Phosphate minerals, environmental pollution and sustainable agriculture. *Elements*, 4(2), 105-108.
- Marschner P. 2012. *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants*. Academic Press, Elsevier, 651 p
- Marschner H. 1995. *Mineral nutrition of higher plants*. Academic Press, London. In Bucher M, Rausch Ch, Daram P. 2001. Molecular and biochemical mechanism of phosphorus uptake into plants. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 164: 209-217.
- Mašek O, Brownsort P, Cross A, Sohi S. 2013. Influence of production conditions on the yield and environmental stability of biochar. *Fuel*, 103, 151-155.
- Mehmood A, Akhtar MS, Imran M, Rukh S. 2018. Soil apatite loss rate across different parent materials. *Geoderma* 310:218-229. doi: 10.1016/j.geoderma.2017.09.036
- Mengel K. 1991. *Ernährung und Stoffwechsel die Pflanze*. Gustav Fischer Verlag, Jena, Germany, 466 p.
- Mercl F, Košnář Z, Maršík P, Vojtíšek M, Dušek J, Száková J, Tlustoš P. 2021. Pyrolysis of biosolids as an effective tool to reduce the uptake of pharmaceuticals by plants. *Journal of Hazardous Materials*, 405, 124278.
- Mercl F, Košnář Z, Pierdonà L, Ulloa-Murillo LM, Száková J, Tlustoš P, 2020, Changes in availability of Ca, K, Mg, P and S in sewage sludge as affected by pyrolysis temperature. *Plant, Soil and Environment*, 66(4), 143-148.
- Mercl F, Kulhánek M, Tlustoš P. 2021. Využití biostimulantů pro mobilizaci fosforu. *Sborník z konference „Racionální použití hnojiv zaměřené na problematiku výživy a hnojení fosforem“*, ČZU, Praha, Czech Republic p. 51-58.
- Nadeem M, Mollier A, Morel C, Vives A, Prud'homme L, Pellerin S. 2011. Relative contribution of seed phosphorus reserves and exogenous phosphorus uptake to maize (*Zea mays* L.) nutrition during early growth stages. *Plant Soil* 346:231-244. doi: 10.1007/s11104-011-0814-y

- Nakakubo T, Tokai A, Ohno K. 2012. Comparative assessment of technological systems for recycling sludge and food waste aimed at greenhouse gas emissions reduction and phosphorus recovery. *J. Clean. Prod.* 32:157-172. doi: 10.1016/j.jclepro.2012.03.026
- Nelson ML. 2004. Plant-growth-promoting-rhizobacteria (PGPR): Prospects for new inoculants. *Crop Management* 3. In: Kumar GP, Desai S, Reddy G, Amalraj ELD, Rasul A, Ahmed SKMH. 2015. Seed Bacterization with Fluorescent *Pseudomonas* spp. Enhances Nutrient Uptake and Growth of *Cajanus cajan* L. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.* 46(5): 652-665
- Ortas I, Ortakçi D, Kaya Z. 2002. Various mycorrhizal fungi propagated on different hosts have different effect on citrus growth and nutrient uptake. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.* 33(1-2): 259-272.
- Parihar M, Meena VS, Mishra PK, Rakshit A, Choudhary M et al. 2019. Arbuscular mycorrhiza: a viable strategy for soil nutrient loss reduction. *Arch. Microbiol.* 201:723-735. doi: 10.1007/s00203-019-01653-9
- Pavlíková D, Pavlík M, Balík J. 2008. Úloha fosforu v rostlinách. Sborník z konference „Racionální použití hnojiv zaměřené na problematiku výživy a hnojení fosforem“, ČZU, Praha, Czech Republic p. 31-35.
- Percival GC. 2010. Effect of systemic inducing resistance and biostimulant materials on apple scab using a detached leaf bioassay. *Arboriculture and Urban Forestry.* 36(1): 41-46.
- Postma J, Lynch JP. 2010. Theoretical evidence for the functional benefit of root cortical aerenchyma in soils with low phosphorus availability. *Ann. Bot.* 107:829-841. doi: 10.1093/aob/mcq199
- Poveda J, Hermosa R, Monte E, Carlos N. 2019. *Trichoderma harzianum* favours the access of arbuscular mycorrhizal fungi to non-host Brassicaceae roots and increases plant productivity. *Sci. Rep.* 9: 1-11
- Raghu K, MacRae IC. 1966. Occurrence of phosphate-dissolving microorganisms in the rhizosphere of rice plants and in submerged soils. *J Appl Bacteriol.* 29: 582-586.
- Rao KR. 1991. Effect of seaweed extract on *Zyziphus mauratiana* Lamk. *Journal of the Indian Botanical Society.* 71. 19-21. In: Tandon S, Dubey A. 2015. Effects of Biozyme (*Ascophyllum nodosum*) biostimulant on growth and development of soybean [*Glycine max* (L.) Merrill]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis.* 46(7): 845-858.
- Reich PB, Oleksyn J, Wright IJ, Niklas KJ, Hedin L, Elser JJ. 2010. Evidence of a general 2/3-power law of scaling leaf nitrogen to phosphorus among major plant groups and biomes. *Proc. Biol. Sci.* 277:877-883. doi: 10.1098/rspb.2009.1818
- Reijnders L. 2014. Phosphorus resources, their depletion and conservation, a review. *Resources, conservation and recycling,* 93, 32-49.

- Richardson AE, Barea JM, McNeill AM, Prigent-Combaret C 2009. Acquisition of phosphorus and nitrogen in the rhizosphere and plant growth promotion by microorganisms. *Plant and soil*, 321(1), 305-339.
- Richardson AE, Lynch JP, Ryan PR, Delhaize E, Smith FA et al. 2011. Plant and microbial strategies to improve the phosphorus efficiency of agriculture. *Plant and soil*, 349(1), 121-156.
- Rodrigues SM, Demokritou P, Dokoozlian N, Hendren CO, Karn B et al. 2017. Nanotechnology for sustainable food production: promising opportunities and scientific challenges. *Environmental Science: Nano*, 4(4), 767-781.
- Sanchez P, Buresh R., Leakey R. 1997. Trees, soils, and food security. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B.* 352. 949-961. In Bucher M, Rausch Ch, Daram P. 2001. Molecular and biochemical mechanism of phosphorus uptake into plants. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* p. 209-217.
- Sedlár O, Černý J, Kulhánek M, Suran P, Balík J. 2021. Principy hnojení fosforem. Sborník z konference „Racionální použití hnojiv zaměřené na problematiku výživy a hnojení fosforem“, ČZU, Praha, Czech Republic p. 77-81.
- Shafii MA, Ling ECM, Shaffie E. 2019. The use of sewage sludge ash and its ash in construction and agriculture industry. *Jurnal Teknologi* 81:81-90. doi: 10.11113/jt.v81.13486
- Sharpley AN, Robinson JS, Smith SJ. 1995. Bioavailable phosphorus dynamics in agricultural soil and effects on water quality. *Geoderma* 67:9-15. doi: 10.1016/0016-7061(94)00027-8
- Shen YF, Zhang Y, Li SQ 2011. Nutrient effects on diurnal variation and magnitude of hydraulic lift in winter wheat. *Agric. Water Manage.* 98:1589–1594. doi: 10.1016/j.agwat.2011.05.012
- Scherer HW, Konrad M, Dittmar H. 2007. Fertilizers. *Ullmann's Agrochemicals*, Vol. 1. Weinheim: Wiley, 5-13; 28-67; 116-119. ISBN: 978-3-527-31604-5.
- Schilling G. 2000. *Pflanzenernährung und Düngung*. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart, Germany, 464 p.
- Silva PTD, Fries LLM, Menezes CRD, Holkem AT, Schwan CL et al. 2014. Microencapsulation: concepts, mechanisms, methods and some applications in food technology. *Ciência Rural*, 44, 1304-1311.
- Smatanová M. 2021. Hodnocení zásobenosti orných půd České republiky přístupným fosforem. Sborník z konference „Racionální použití hnojiv zaměřené na problematiku výživy a hnojení fosforem“, ČZU, Praha, Czech Republic p. 45-50.
- Smith SE, Read DJ. 1997. *Mycorrhizal Symbiosis*. Academic Press, San Diego, CA. In Bucher, M., Rausch, Ch., Daram, P. 2001. Molecular and biochemical mechanism of phosphorus uptake into plants. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 164: 209-217.

- Smith SE, Read D. 2008. Mycorrhizal Symbionts. 1 – The symbionts forming arbuscular mycorrhizas. Elsevier Ltd. 13-41.
- Syers JK, Johnston AE, Curtin D. 2008. Efficiency of soil and fertilizer phosphorus use. *FAO Fertilizer and plant nutrition bulletin*, 18, 108.
- Tlustoš P, Mercl F, Košnář Z, Száková J, Taisheva A, Hailegnaw NS. 2021. Principy hnojení fosforem. Sborník z konference „Racionální použití hnojiv zaměřené na problematiku výživy a hnojení fosforem“, ČZU, Praha, Czech Republic p. 69-76.
- Tlustoš P, Pavlíková D, Balík J. 2002. Úloha fosforu v rostlinách, jeho příjem a potřeba rostlinami. Sborník z konference „Racionální použití hnojiv zaměřené na problematiku fosforu v rostlinné výrobě“, ČZU, Praha, Czech Republic p. 38-45.
- Tlustoš P, Száková J, Budňáková M, Hendrych K, Mihalík J, Trakal L. 2008. Zdroje fosforu a výroba fosforečných hnojiv. Sborník z konference „Racionální použití hnojiv zaměřené na problematiku výživy a hnojení fosforem“, ČZU, Praha, Czech Republic p. 42-51.
- Vaněk V, Balík J, Pavlíková D, Tlustoš P. 2007. Výživa polních a zahradních rostlin. Profi Press. Praha. 176 s.
- Vaněk V, Štípek K, Šilha J, Balík J. 2002. Systém hnojení fosforem. Sborník z konference „Racionální použití hnojiv zaměřené na problematiku fosforu v rostlinné výrobě“, ČZU, Praha, Czech Republic p. 66-73.
- Venklaas EJ, Lambers H, Bragg J, Finnegan PM, Lovelock CE. 2012. Opportunities for improving phosphorus-use efficiency in crop plants. *New Phytol.* 195:306-320. doi: 10.1111/j.1469-8137.2012.04190.x
- Verkleij FN. 1992. Seaweed extracts in agriculture and horticulture: A review. *Biological Agriculture and Horticulture: An International Journal for Sustainable Production Systems*. 8. 309-324. In: Tandon S, Dubey A. 2015. Effects of Biozyme (*Ascophyllum nodosum*) biostimulant on growth and development of soybean [*Glycine max* (L.) Merrill]. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.* 46(7): 845-858.
- Vessey JK 2003. Plant growth promoting rhizobacteria as biofertilizers. *Plant and soil*, 255(2), 571-586.
- Wager BI, Stewart JWB, Henry JL. 1986. Comparison of single large broadcast and small annual seed-placed phosphorus treatments on yield and phosphorus and zinc contents of wheat on Chernozemic soils. *Can. J. Soil Sci.* 66:237-248. doi: 10.4141/cjss86-026
- Wang B, Shen J, Tang C, Rengel Z 2008. Root morphology, proton release, and carboxylate exudation in lupin in response to phosphorus deficiency. *Journal of Plant Nutrition*, 31(3), 557-570.
- Wang X, Shen J, Liao H. 2010. Acquisition or utilisation, which is more critical for enhancing phosphorus efficiency in modern crops? *Plant Sci.* 179:302-306. doi: 10.1016/j.plantsci.2010.06.007

- White PJ, Broadley MR. 2009. Biofortification of crops with seven mineral elements often lacking in human diets—iron, zinc, copper, calcium, magnesium, selenium and iodine. *New Phytol.* 182:49-84. doi: 10.1111/j.1469-8137.2008.02738.x
- Withers PJA, Sylvester-Bradley R, Jones DL, Healey JR, Talboys PJ. 2014. Feed the crop not the soil: rethinking phosphorus management in the food chain. *Environ. Sci. Technol.* 48 (12): 6523-6530.
- Wu SC, Cao ZH, Li ZG, Cheung KC, Wong MH. 2005. Effects of biofertilizer containing N-fixer, P and K solubilizers and AM fungi on maize growth: a greenhouse trial. *Geoderma. J.* 16: 155-166.
- Yang B, Cao S, Zhu Z, Yin W, Sheng Q et al. 2021. Selective flotation separation of apatite from dolomite utilizing a novel eco-friendly and efficient depressant for sustainable manufacturing of phosphate fertilizer. *Journal of Cleaner Production*, 286, 124949.
- Yuan Z, Pratt S, Batstone DJ. 2012. Phosphorus recovery from wastewater through microbial processes. *Curr. Opin. Biotechnol.* 23:878-883. doi: 10.1016/j.copbio.2012.08.001
- Zhang X, Ervin EH, Schmidt RE. 2003. Plant growth regulators can enhance the recovery of Kentucky bluegrass sod from heat injury. *Crop Science.* 43: 952-956.