

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů

Katedra agroenvironmentální chemie a výživy rostlin



Moderní trendy ve výživě zemědělských plodin fosforem

Bakalářská práce

Autor práce: **Alžběta Veberová**
Obor studia: **Rostlinná produkce**

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

© 2022 ČZU v Praze

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci "Moderní trendy ve výživě zemědělských plodin fosforem" jsem vypracovala 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 autorka uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušila autorská práva třetích osob.

V Praze dne 22. 4. 2022

Poděkování

Ráda bych touto cestou poděkovala doc. Ing. Martinu Kulhánkovi, Ph.D. za vedení mé bakalářské práce, za užitečné rady, skvělý přístup, cenné připomínky i trpělivost. Dále bych ráda poděkovala své rodině a přátelům za veškerou podporu a motivaci.

Moderní trendy ve výživě zemědělských plodin fosforem

Souhrn

Fosfor je nepostradatelný, ale zároveň i limitující prvek ve výživě rostlin. Na druhou stranu se velmi snadno může stát kontaminantem životního prostředí. Jedná o 11. nejrozšířenější prvek litosféry, v půdách se vyskytuje především v podobě, kterou rostliny nejsou schopny přijímat. Primárním zdrojem fosforu je minerál apatit, jehož zásoby se stále tenčí. Fosforečná hornina je považována za neobnovitelný zdroj, a vyčerpání ložisek se odhaduje již za pouhých 50–100 let. Z toho důvodu se fosfor v poslední době dostává do popředí zájmu odborné i vědecké sféry.

Cílem této práce bylo shrnout aktuální trendy ve výživě zemědělských plodin fosforem. Zaměřuje se především na lokální aplikace, biostimulanty, šlechtění rostlin, využití biouhlu a odpadních materiálů.

Jedním z moderních trendů je technologie precizního zemědělství. V tomto principu hospodaření je snaha o vývoj nových systémů, které budou efektivněji využívat půdu a fosforečná hnojiva. Ve výsledku lze potvrdit, že použitím větší přesnosti při aplikaci P-hnojiv bylo možné zmírňovat zatížení fosforem, a zároveň tyto aplikace vedly k snížení nákladů na samotné hnojení fosforem.

Využívání odpadních materiálů se jeví jako vhodná alternativa minerálních fosforečných hnojiv (P-hnojiv). Čistírenské kaly jsou významným potenciálním zdrojem fosforu, jehož použití bude pravděpodobně nabývat na významu. Je důležité neopomíjet i jejich negativní stránku, jelikož obsahují velké množství nebezpečných látek, především aromatických uhlovodíků a těžkých kovů.

Pro zpřístupnění živin rostlinami se využívají biostimulanty. Použitím biostimulantů v laboratorních testech bylo ve většině pokusů dosahováno pozitivních výsledků. V provozních podmínkách se však tento pozitivní vliv vysloveně neprokázal. Vzhledem k tomu, že se dosavadní výsledky příliš neshodují, je třeba provádět i nadále výzkumy, které přinesou nové poznatky.

Biouhel je považován za velmi cenný zdroj s velkým potenciálem využití i jako doplnění fosforečných konvenčních hnojiv. Bylo prokázáno, že biouhel působí jako účinný sorbent pro různé organické i anorganické látky, včetně fosforu.

Velký potenciál je i v moderních šlechtitelských metodách, které zvyšují schopnost rostlin využívat fosfor pro příznivý růst a následný vývoj, což by mohlo vést k menší závislosti na neobnovitelných zdrojích.

Jako nejvhodnější strategie se jeví kombinace předchozích metod, počínaje vyšlechtěním vyhovující odrůdy s lepší osvojovací schopností fosforu, následné využití technologií precizního zemědělství a aplikací odpadních materiálů spolu s biostimulanty.

Klíčová slova: Fosfor; Hnojení odpadními materiály; Biostimulanty; Šlechtění rostlin; Lokální aplikace

New strategies in phosphorus nutrition of agricultural plants

Summary

Phosphorus is an indispensable but also limiting element in plant nutrition. On the other hand, it can easily become an environmental contaminant. It is the 11th most abundant element of the lithosphere, occurs in soils mostly in the nonbioavailable form. The primary source of phosphorus is the mineral apatite, which is becoming increasingly scarce. Phosphate rock is considered as a non-renewable resource and depletion of deposits is estimated to occur in next 50–100 years. For these reasons, phosphorus has come to the forefront of professional and scientific interest in recent years.

The main aim of this thesis was to summarize the current trends in phosphorus nutrition. It mainly focuses on local uses, biostimulants, plant breeding, biochar, and waste material utilization.

One of the current trends is precision farming technology. There is an effort to develop new systems that use soil and phosphate fertilizers more efficiently. As a result, by using better precision in the applications of P-fertilizers, it has been possible to mitigate phosphorus loading. While at the same time these applications have led to reduction in the cost of P-fertilizers.

The use of waste materials appeared to be a suitable alternative to mineral P-fertilizers. Sewage sludge is an important potential source of phosphorus, the use of it will become increasingly important. It is also important not to overlook the negative side of these materials – sewage sludge contains significant amounts of hazardous substances, mainly aromatic hydrocarbons, and heavy metals.

Biostimulants are used to make nutrients available to plants. The use of biostimulants in laboratory tests has mostly positive results. However, in field conditions, this positive effect has not been significantly proven. Current results are inconsistent, hence the desire to continue to do research that will bring new findings.

Biochar is considered as a very valuable resource with great potential for use as a supplement to phosphatic conventional fertilizers. Biochar has been shown to act as an effective sorbent for organic and inorganic substances, including phosphorus.

Big potential is possible to see also in modern breeding methods that are increasing the ability of plants to use phosphorus for favorable growth and development, which would lead to less dependence on non-renewable resources.

A combination of previous methods appears to be the most appropriate strategy. Starting with the breeding of a suitable variety with better phosphorus uptake capacity, followed by the use of precision farming technologies and the application of waste materials together with biostimulants.

Keywords: Phosphorus; Fertilisation with waste materials; Biostimulants; Plant breeding, Local application

Obsah

1 Úvod	8
2 Cíl práce	9
3 Literární rešerše	10
3.1 Fosfor v půdě.....	10
3.1.1 Organický fosfor.....	11
3.1.2 Anorganický fosfor.....	11
3.2 Příjem fosforu.....	12
3.3 Fosfor v rostlině.....	13
3.3.1 Nedostatek fosforu.....	14
3.3.2 Nadbytek fosforu	15
3.4 Výživa fosforem.....	15
3.4.1 Běžná výživa	15
3.4.2 Moderní trendy	16
3.4.2.1 Cílené hnojení porostů	17
3.4.2.1.1 Hnojení fosforem	18
3.4.2.2 Využití odpadů	20
3.4.2.2.1 Čistírenské kaly	21
3.4.2.2.2 Ostatní odpadní materiály	22
3.4.2.3 Biostimulanty	24
3.4.2.3.1 Extrakty z mořských řas	24
3.4.2.3.2 Mikroorganismy	25
3.4.2.4 Popel a biochar.....	27
3.4.2.5 Šlechtění rostlin.....	30
4 Závěr	33
5 Seznam literatury	34

1 Úvod

Fosfor (P) je nezbytný prvek pro růst a vývoj rostlin, zejména pak pro řadu fyziologických funkcí, které se podílejí na přeměnách energie. Fosfor je součástí mnoha buněčných kompartmentů a má významnou roli v několika klíčových procesech, včetně fotosyntézy, dýchání, přenosu a ukládání energie či dělení buněk. Fosfor je hned po dusíku považován za druhý nejdůležitější prvek, jehož nedostupnost v půdě značně omezuje zemědělskou produkci ve většině zemí světa, včetně České republiky. Je rozhodující makroživinou z hlediska kvality i množství finálního produktu – především v počátku vývoje, protože se již při klíčení a vzcházení rostlin rychle spotřebovává.

V litosféře je fosfor poměrně hojně zastoupen, ale není po celém světě rozmístěn rovnoměrně. V půdě je fosfor součástí mnoha sloučenin s odlišnými vlastnostmi. Nejhlavnějším zdrojem fosforu je minerál apatit, jehož ložiska se nacházejí a těží zejména v Maroku, USA a Rusku.

Fosfátová hornina je neobnovitelným zdrojem, jejíž vyčerpání na výrobu minerálních hnojiv se odhaduje již za pouhých 50–100 let. Z toho důvodu je snaha hledat jiné zdroje, které jsou obnovitelné, ekonomicky udržitelné, šetrné k životnímu prostředí, neohrožující zdraví lidí a jiných živočichů. Rychle se blížící nedostatek P-minerálů přispěl k rozvoji mnoha nových udržitelnějších směrů. Jedná se například o využívání odpadních materiálů jako zdroje P, využití biologických preparátů (biostimulantů) k podpoře příjmu fosforu rostlinami, zkoušení různých aplikačních technik, které se využívají při hnojení fosforem či šlechtění nových odrůd kulturních plodin s vyšší osvojovací schopností příjmu fosforu.

Biostimulanty by měly přispívat k mobilizaci rostlinám nepřístupného fosforu a obstarat tak dostatečné množství přístupného fosforu pro následný příznivý růst a vývoj rostlin. Jedná se o mikroorganismy či jiné látky, které stimulují půdní prostředí i metabolismus rostlin s cílem zvýšit účinnost výživy, kvalitu produkce či odolnost proti abiotickým stresům. Lze sem zařadit například bakterie, mořské řasy, houby, vyšší rostliny, živočichy a huminové kyseliny. Do biostimulantů neřadíme pesticidy ani hnojiva.

Odpady je možné využít nejen jako zdroj energie, ale i jako zdroj živin ke zlepšování půdní úrodnosti. Nejčastěji se využívají čistírenské kaly, které jsou vedlejším produktem čištění odpadních vod. Vzhledem k obsahu rizikových prvků platí pro kaly přísné podmínky jejich využití. Mnoho organických odpadních materiálů obsahuje významné množství fosforu. Konkrétně kaly obsahují druhé největší množství, hned po kostní moučce. Čistírenské kaly jsou v současné době považovány za perspektivní zdroj fosforu.

V současnosti je kladen důraz i na moderní technologie, o které se precizní zemědělství opírá. Základní úlohou precizního zemědělství je vhodný popis, záznam a pochopení variability v prostoru a čase, tyto informace následně umožňují řídit zohlednit půdní variabilitu v rostlinám dostupném fosforu. Rozvoj počítačových systémů správy a evidence dat poskytuje možnosti pro lepší a komplexnější analýzu získávaných dat, než tomu bylo v minulosti, která by měla vést k lepším rozhodnutím o řízení variability.

Dalším možností je šlechtění plodin, které účinně získávají fosfor z původní půdní zásoby nebo hnojiv. Pro zvýšení efektivity využívání fosforu jsou zapotřebí moderní šlechtitelské technologie, které umožní vývoj nových odrůd. Mezi tyto technologie se řadí tradiční molekulární šlechtění či transgenní technologie.

2 Cíl práce

Cílem práce bylo vytvořit prostřednictvím literární rešerše ucelený přehled současných možností výživy a hnojení rostlin fosforem.

3 Literární rešerše

Fosfor, symbol P, latinsky *Phosphorus*, je nekovový prvek z p-bloku, který spolu s dusíkem (N), arsenem (As), antimonem (Sb) a bismutem (Bi) řadíme do V. A skupiny periodické tabulky. Prvky této skupiny jsou známy též pod označením pnikogeny, pniktogeny či pentely (Corbridge 2013).

Fosfor (P) poprvé izoloval jako čistý prvek alchymista Henning Brand roku 1669 v Německu. Název pro fosfor je z řecké kombinace *phos* – světlo a *phoros* – nositel, tedy světloňoš (Walsh 2020; Brezak-Mazur & Stoińska 2013). Jedná se o 11. nejrozšířenější prvek v horninách zemské kůry (Toužín 2008).

Hlavní celosvětová ložiska fosfátových hornin se nacházejí v Maroku, USA, Číně, Jižní Africe a Jordánsku. Přibližně 74 % z nich se nachází v samotném Maroku (Sorensen et al. 2015, Cordell et al. 2009). Nejvíce fosforu se těží v Číně, největší zásoby má USA, největší množství vyváží Jihoafrická republika. Tato geopolitická situace proto může výrazně ovlivňovat dostupnost i cenu fosforu nejen v Evropě, ale i po celém světě (Geudes et al. 2014).

Výroba a používání fosforečných hnojiv je extrémně neefektivní a nehospodárná. Tato neefektivita je vidět ve všech částech dodavatelského řetězce fosforu. Již od samotné těžby, přes jeho použití až po současné vzorce lidské spotřeby. Existuje i nová hrozba – že hnojiva budou v budoucnu pravděpodobně mnohem dražší, jelikož se budou zvyšovat i výrobní (energetické) náklady a výrobní kapacita se nebude schopna vyrovnat s rostoucí poptávkou (Withers et al. 2014).

3.1 Fosfor v půdě

Vzhledem k tomu, že se předpokládá již během následujících desetiletí dosažení vrcholu celosvětové produkce a rychle roste poptávka po zemědělské produkci, se fosforu dostává větší pozornosti jako neobnovitelnému zdroji (Shen et al. 2011). Nadbytek fosforu v půdě může mít negativní vliv na životní prostředí, jelikož se může povrchovým odtokem dostat do jiných vodních ploch a způsobit tvorbu vodního květu, který výrazně snižuje kvalitu vody.

Řádově se odhaduje asi 10^{19} tun fosforu na Zemi a z toho 10^{15} tun fosforu je součástí zemské kůry, ve které průměrný obsah fosforu činí 0,12 %. Obsah fosforu v půdě se pohybuje v rozmezí od 0,01 do 0,15 % (Ivanič et al. 1984). Půdy, které disponují vyšším obsahem organické hmoty se vyznačují i vyšším obsahem fosforu. Naopak půdy lehčí, s nižším množstvím organické hmoty mají i obsah fosforu nízký. Sloučeniny kyseliny trihydrogenfosforečné (H_3PO_4), popřípadě pyrofosforečné tvoří základ různých forem fosforu v půdě (Vaněk et al. 2016). Přestože se zdá být celkové množství fosforu v půdě vysoké, je nutno podotknout, že se jedná o jeho nedostupné formy, nebo formy, které jsou dostupné pouze mimo rhizosféru. Jen malé procento nehnojených půd uvolňuje fosfor dostatečně rychle, aby podporovalo rychlý růst a vývoj rostlin (Schachtman et al. 1998). V mnoha zemědělských systémech je aplikace fosforu do půdy nezbytná. Zejména pro zajištění produktivity rostlin. Obnova aplikovaného fosforu rostlinami je ve vegetačním období velmi nízká. Více než 80 % fosforu se v půdě stane nedostupným z důvodu adsorpce, srážení nebo přeměně na organickou formu (Holford 1997).

Průměrné množství odstraněného fosforu z půdy je mezi 2–4 kg fosforu na tunu vyprodukovaného obilného zrna (Dobermann et al. 1998). Pro udržitelnost zemědělské produkce je fosfor do půd dodáván v podobě hnojiv tak, aby byla udržována nejlépe vyhovující rychlost využívání fosforu plodinami (Simpson et al. 2011). Příliš nízká aplikace fosforečných hnojiv velmi nepříznivě ovlivňuje rostliny v jejich růstu. Též hnojení v nadbytku není vůbec vhodným řešením, jelikož tak dochází k akumulaci fosforu a jeho následným ztrátám z půdy (Sharpley et al. 2000).

Fosfor je základní a nepostradatelná rostlinná živina, které je v její biologicky dostupné formě po celém světě nedostatek. Apatit $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_6$ (F, OH), je primárním zdrojem fosforu a všudypřítomným minerálem, který zvětrává biochemickými procesy v sedimentech a půdě, rozpouští se a sekundárně uvolňuje fosfor (Mehmood et al. 2018). Mimo minerál apatit jsou neopomenutelným zdrojem fosforu v půdě také průmyslová hnojiva, zbytky z jiných průmyslových činností nebo zbytky z čištění odpadních vod. To se jeví jako účinná varianta, jelikož lze vzniklé odpady po předchozí úpravě efektivně využít (Werner 1997).

Fosfor se v přírodě vyskytuje jako pětimocný, což je i jeho nejvyšší oxidační stupeň. Zpravidla se jedná o aniont kyseliny ortofosforečné PO_4^{3-} , a jeho formy lze rozdělit na organické a minerální (Ivanič et al. 1984).

3.1.1 Organický fosfor

Organický fosfor tvoří významnou část celkového množství fosforu v půdách, zejména v těch, které jsou ošetřené organickými vstupy. V půdách jsou často sloučeniny organického fosforu sorbovány na půdní minerály. Výsledky studií prokázaly, že formy organického fosforu adsorbované na oxidech železa a hliníku nebo jílových minerálech jsou pro rostliny dostupné ve velké míře (Amadou et al. 2022) a pochází z minerální složky fosforu, která byla imobilizována biologickou sorpcí rostlinami a mikroorganismy. Kumulují se především ve svrchních vrstvách půdy, kde je i více organické hmoty (Ivanič et al. 1984). Organické sloučeniny fosforu tvoří 30–50 % z celkového obsahu v půdě. Až 50 % z organického fosforu představují fytáty – soli odvozené od fytinu. Jedná se o potenciální zdroj fosforu, který je pro rostliny využitelný. Dalším zdrojem jsou například fosfolipidy, nukleové kyseliny, nukleoproteiny a fosforylované lipidy nacházející se v kořenové hmotě, ze které se statkovými hnojivy i posklizňovými zbytky dostávají zpátky do půdy (Vaněk et al. 2016).

3.1.2 Anorganický fosfor

Anorganický fosfor se v půdě nachází v podobě původních minerálů a jejich sloučenin. Jedná se o ve vodě a slabých organických kyselinách dobře rozpustné vápenaté a hořečnaté fosforečnany, fosforečnany železa, fosforečnany hliníku a fosfor v apatitech. Z celkového obsahu fosforu je podíl toho anorganického v rozmezí od 25 do 98 % (Čermák et al. 2018). Velká většina minerálních sloučenin fosforu je ve formě, která není rozpustná ve vodě, proto je fosfor z těchto sloučenin pro rostliny jen málo přístupný. Z celkového obsahu fosforu v půdě je pouze 1–8 % pro rostliny přijatelný, protože vodorozpustných sloučenin je jen malé množství (uvádí se asi 0,8 až 8 mg fosforu na 1 kg vyschlé půdy). V neutrálních a alkalických půdách je větší podíl fosforečnanů vápenatých, v kyselých pak převládají fosforečnany hliníku a železa (Ivanič et al. 1984).

3.2 Příjem fosforu

Fosfor je přijímán rostlinou v podobě aniontů kyseliny trihydrogenfosforečné, a to především ve formě aniontu H_2PO_4^- a HPO_4^{2-} . Největší vliv na příjem fosforu má především hodnota pH půdy. Rychlost absorpce fosfátů se snižuje se zvyšujícím se pH. Sloučeniny fosforu, které jsou potencionálním zdrojem pro rostlinnou výživu, zařazujeme mezi minerální a organické sloučeniny (Vaněk et al. 2012).

Transport fosforu z okolního prostředí do nadzemních částí rostliny lze popsat následovně. Nejprve se fosfor pohybuje do kořenů. Dále je veden z kořenů do dřevní části (xylému). Následně je transportován vodivými systémy, a nakonec fosfor přechází z vodivých systémů do jednotlivých listových buněk a jejich pletiv (Ivanič et al. 1984).

Protože koncentrace přijatelných P iontů v půdách se nacházejí v mikromolárním rozsahu, jsou pro příjem fosforu potřebné vysoce afinitní aktivní transportní systémy proti strmému gradientu chemického potenciálu přes plazmatickou membránu kořenových epidermálních a kortikálních buněk. Tento proces je zprostředkováván vysoce afinitními Pi/H+ symportory, které patří do skupiny genů PHT1. Narušení exprese genu vede k výraznému snížení aktivizace fosforu kořeny. Některé geny jsou exprimovány specificky anebo regulovány v kořenech s mykorrhizními houbami, což ukazuje na jejich funkci při transportu fosforu prostřednictvím mykorrhizní dráhy. Na translokaci fosforu z kořenů se podílejí dva fosfátové transportéry OsPht1;2 a OsPht1;6 s různými kinetickými vlastnostmi (Shen et al. 2011).

Fosfor je velmi důležitý prvek při tvorbě generativních orgánů a také pro přenos energie v rostlině. Půdní mikrobi a kořeny uvolňují enzymy fosfatázy, které jsou schopné přeměňovat kyseliny na bázi fosforu v půdě na rostlině přijatelné ionty, které jsou pak následně přijímány kořenovým systémem. V porovnání s dusíkem a draslíkem je fosfor nejvíce závislý na hodnotě pH. Ač ho může být v půdě dostatek, nemusí být vždy dostupný. Například v případě méně vyhovujících hodnot pH se často váže na jiné prvky a pro rostliny se stává nepřijatelným. V jeho nepřijatelnější iontové podobě se často chová jako dusík, jen je více mobilní, což často vede i k jeho úniku do okolního prostředí a následné eutrofizaci vod (Cerozi & Fitzsimmons 2016).

Fosfor je základní živinou pro všechny formy života. Je naprosto klíčovým v základních biochemických reakcích zahrnujících genetický materiál (DNA, RNA) a přenos energie (ATP) a strukturální podporu organismů zajišťovanou membránami (fosfolipidy) a kostmi (biominerální hydroxyapatit). Fotosyntetické organismy využívají rozpuštěný fosfor, uhlík a další základní prvky k budování svých pletiv pomocí energie ze slunce. Biologická produktivita závisí na dostupnosti fosforu pro jednoduché organismy, které jsou základem potravní pyramidy v suchozemských i vodních systémech. Fosfor uzavřený ve skalním podloží, půdách a sedimentech není pro organismy přímo dostupný. Přeměna nedostupných forem na rozpuštěný orthofosfát, který lze asimilovat, probíhá geochemickými a biochemickými reakcemi v různých fázích ukládání organické hmoty v půdách a sedimentech, kde působí jako zdroj energie a živin pro mikrobiální společenstva. Mikrobiální aktivita silně ovlivňuje koncentraci a chemickou formu fosforu začleněného do geologického záznamu (Ruttenberg 2003).

Buněčná homeostáza fosforu je nezbytná pro fyziologické a biochemické procesy. Dle některých studií je 85 až 95 % buněčného fosforu přítomno ve vakuole a dále dokazují, že výtok fosforu z vakuoly je nedostatečný ke kompenzaci rychlého poklesu koncentrace cytosolického fosforu. Fosfátový transportér PHT4;6 je umístěn v Golgiho aparátu, pravděpodobně transportuje fosfor ven z lumen Golgiho aparátu pro recyklaci anorganického fosfátu (Pi) uvolněného glykolýzou. Další přenašeč fosfátů PHT2;1 je přítomen v chloroplastu a může ovlivnit alokaci fosforu v rostlině. Fosfatázy jsou potřebné pro uvolnění fosforu z fosfomonoesterů a duálně zacílený izozym fialové kyselé fosfatázy AtPAP26 je nezbytný pro účinnou aklimatizaci *Arabidopsis thaliana* na deprivaci fosforu. Ribonukleázy jsou zodpovědné za mobilizaci fosforu z RNA a dva geny AtRNS1 a AtRNS2 jsou regulovány nedostatkem fosforu. Tyto fosfatázy jsou také indukovány stárnutím listů, což dále podporuje jejich důležitou roli v procesu remobilizace fosforu (Shen et al. 2011).

3.3 Fosfor v rostlině

Fosfor je jednou z nejdůležitějších stavebních živin ve výživě rostlin. Jeho zásoba v přijatelných formách v půdách klesá. Postupně se tak stává limitujícím prvkem kvality produktu i výnosu (Kunzová 2009). Jedná se o makrobiogenní prvek, který je nezbytný pro metabolické procesy v rostlině. Rostlinám je přístupná pouze ta nepatrná zásoba půdního fosforu, která je obsažená v půdním roztoku. Jakmile je vyčerpána, dochází k narušení rovnovážného stavu a část labilního fosforu se uvolňuje do půdního roztoku. Fosfor, jež rostliny odčerpají je kontinuálně nahrazován z jiných zásob v půdě, které jsou k dispozici (Mikanová & Šimon 2011). Rostliny nemohou růst bez spolehlivého přísunu fosforu, jelikož se jedná o důležitý rostlinný makronutrient, jež tvoří asi 0,2 % suché hmotnosti rostliny (Schachtman et al. 1998).

Fosfor je absorbován kořeny rostlin a dále pak distribuován do každé živé buňky v rostlině. Největší množství se koncentruje v reprodukčních částech rostliny. Semeno musí obsahovat dostatek fosforu a dalších životně důležitých živin, aby vydrželo, dokud se vytvoří kořeny, které získají zásobu z půdy. Fosfor se v buňce snadno váže s uhlíkem, vodíkem, kyslíkem a dusíkem za vzniku komplexních organických molekul. Je základní složkou genetického materiálu buněčného jádra. Buňky se nemohou dělit, pokud není dostatek fosforu k vytvoření nových jader. Dále má fosfor velmi důležitou schopnost tvořit vazby na více než jedné energetické úrovni. To umožňuje skladování, přenos i uvolňování energie v rostlině prostřednictvím nukleotidů adenosindifosfátu a adenosintrifosfátu (Troeh & Thompson 2005).

Rostliny mají schopnost přijímat fosfor i při jeho nízkých koncentracích. Avšak za předpokladu, že musí překonávat velký koncentrační gradient. Proces příjmu fosforu rostlinou je aktivní proces, který vyžaduje i dostatek energie. Na příjem fosforu rostlinou působí pozitivně například dostačující vlhkost půdy, optimální půdní reakce, která by měla být v rozmezí mezi 5,5 až 7 pH. Půda by měla obsahovat dostatek organických látek a měla by být i biologicky činná. Optimální množství přijatelného fosforu je přibližně 40 až 80 mg/kg P (Vaněk et al. 2016).

V rostlině je fosfor jak v organické, tak i anorganické formě. Jejich vzájemný poměr závisí na stáří organismu a intenzitě jeho příjmu. Anorganický fosfát je v rostlině velmi mobilní. Existuje více organických forem fosforu v rostlině. Jedná buď o estery kyseliny fosforečné či další sloučeniny, jako jsou fosforylované glycidy a fosforylované pyrimidinové sloučeniny. Organofosfáty s esterickou vazbou jsou méně reaktivní, fosfát v nich je i celkem stabilně vázaný. Řadíme sem například fosfolipidy, fytin, nukleoproteiny a nukleové kyseliny (Ivanič et al. 1984).

Fosfor je pro rostlinu naprosto klíčový. Jeho sloučeniny mají zásadní význam a podílejí se na velkém spektru reakcí. Buď jsou to strukturní části složitých sloučenin či fungují jako donory energie. Fosfor je například součástí organických sloučenin ATP a NADP či Calvinova cyklu. Kyselina fosforečná je nepostradatelná součást nukleových kyselin. Ty se skládají právě z kyseliny fosforečné, monosacharidů ribózy nebo deoxyribózy a dusíkatých heterocyklických bází. Fosfor je v nukleových kyselinách nositelem acidity a jeho záporný náboj přitahuje hořečnaté kationty, které stabilizují nukleové kyseliny. Velkou a důležitou roli hraje fosfor i při přenosu signálů na vnitro i mezibuněčné úrovni. Z vnějšího prostředí přenáší signály dva poslové, jde o inositol-1,4,5-trifosfát a diacylglycerol (Balík et al. 2008).

3.3.1 Nedostatek fosforu

Příznaky nedostatku fosforu jsou zpravidla méně výrazné. Deficit fosforu má negativní vliv na kořeny a zpomaluje růst nadzemních částí a orgánů. Listy jsou menší velikosti a starší postupně odumírají. Mají tmavou barvu, jsou dlouze řapíkaté se silně vystouplou nervaturou. Někdy mohou vznikat i červené nebo purpurové pigmenty a později nekrózy (Richter 2004). Nedostatek fosforu je běžným nutričním faktorem, který omezuje zemědělskou produkci na celém světě. Pro jeho zvládnutí se obecně doporučuje aplikovat fosforečná hnojiva (Aziz et al. 2013).

Běžné příznaky pro nedostatek fosforu lze popsat, ale je třeba vědět, že v praxi tyto symptomy nemusí být zřejmé. Někdy je to zapříčiněno například herbicidními účinky, poškozením od hmyzu, počasím či půdními podmínkami (Sawyer 2004).

Když rostliny trpí nedostatkem fosforu, mají tzv. skrytý hlad nebo vykazují zjevné a viditelné příznaky. Mezi pozorovatelné znaky nedostatku fosforu patří tmavé listy s menší velikostí, které mohou být i fialové. Tento deficit se projevuje i na kořenech, jsou pak delší a tenčí než obvykle (Blevins 1999).

Nedostatek P se projevuje zejména na buněčné úrovni zastavením buněčného dělení. Téměř se nediskutuje o zástavě buněčného dělení v důsledku nedostatku fosforu pro tvorbu membrán, které je zapotřebí stejně jako zdvojení genetické informace. Mimo syntetickou úlohu se fosfor transportuje do mitochondrií a plastidů, kde se zapojuje do metabolických procesů a do vakuol, ve kterých dochází k jeho skladování, nebo může být odesílán do dalších buněk (Rauch & Bucher 2002).

Nedostatek se projevuje méně často. Nejčastěji jde o latentní nedostatek, kdy se na rostlinách neprojevují žádné okem viditelné příznaky. I tak je však jeho obsah nízký, takže nemohou probíhat biochemické funkce na potřebné úrovni. Počátek vegetace je nejdůležitější a nejzásadnější období pro příjem fosforu rostlinou. Nejhuře je fosfor přijímán za chladného nebo suchého počasí (Vaněk et al. 2016).

3.3.2 Nadbytek fosforu

S výrazným nadbytkem fosforu se u nás téměř nesetkáme. Vzhledem k tomu, že se jeho obsah nepřibližuje kritickým hodnotám, kdy by přecházel do vyšších koncentrací v půdním roztoku, a to především proto, že je půdou velmi dobře sorbován. Naopak v zahraničí je celá problematika nadbytku fosforu daleko větší. Je to způsobeno vysokým podílem organického fosforu, jež se do půd dostává primárně ze statkových hnojiv (Vaněk et al. 2016).

3.4 Výživa fosforem

3.4.1 Běžná výživa

Mezi základní předpoklady pro odolnost rostliny vůči stresovým faktorům prostředí jsou zejména harmonická výživa a hnojení rostlin. V současnosti se však o harmonické výživě nedá příliš hovořit, jelikož často převládá jednostranné hnojení dusíkem. Ale právě fosfor je ve výživě a hnojení rostlin dlouhodobě nedostatkový – jedná se o jeden z neklíčovějších prvků v rostlinné výživě (Čermák et al. 2019).

Fosfor je nepostradatelný pro růst rostlin a tvoří asi 0,2 % sušiny, ale je to jedna z nejobtížněji dostupných živin pro rostliny. V půdě může být přítomen v relativně velkých množstvích, ale jeho velká část je špatně dostupná kvůli velmi nízké rozpustnosti fosforečnanů železa, hliníku a vápníku, což vede ke koncentraci půdního roztoku 10 μM nebo i méně a velmi nízké mobilitě (Smith et al. 2011).

Nízká hladina rozpustného půdního fosforu je vážná překážka v produkci plodin především v tropických a subtropických půdách. Mnoho bakterií a probiotik spojených s rostlinami, mohou spolumobilizovat fosfor z organicky nebo anorganicky vázaných fosfátů, čímž usnadňují růst rostlin. Například bakterie z taxonomických rodů jako jsou *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Klebsiella*, *Streptomyces*, *Pantoea* a další, mohou spolumobilizovat fosfor nerozpustný v půdě a zvýšit tak růst a finální výnos plodin. Navzdory vysokému potenciálu, byla účinnost fosfát solubilizujících bakterií ztížena jejich nekonzistentním výkonem v polních podmínkách. Je potřeba porozumět tomu, jak interagují s kořeny a organismy v rhizosféře (Islam & Hossain 2012).

Fosfor do rostliny vstupuje jako anorganický fosfát (Pi). Rostliny mají mnoho mechanismů s vysokou i nízkou afinitou pro transport Pi přes plazmatickou membránu do cytosolu proti strmému gradientu elektrochemického potenciálu. Vysokoafinitní transport usnadňují proteiny Pi ze skupiny PHT1. Naopak proteiny, které jsou odpovědné za nízkoafinitní získání Pi nejsou známy, ale jsou většinou charakterizovány v heterologních systémech též jako proteiny ze skupiny PHT1. Při vyvozování závěrů o Pi afinitě v heterologních systémech je třeba opatrnost. Jakmile je Pi uvnitř buňky, je transportován do různých kompartmentů proteinů skupin PHT2, PHT3 a PHT4. Anorganický fosfát se přes rostlinné tělo pohybuje právě prostřednictvím různých proteinů PHT1. Všechny proteiny PHT1, které byly zkoumány, jsou schopné transportovat Pi do buněk za normálních fyziologických podmínek, ale jen některé jsou schopny i uvolnit Pi z buněk, pouze za specifických podmínek, jako je například proces stárnutí (Lambers et al. 2013, Harrison et al. 2002, Preuss et al. 2010, Shen et al. 2011).

3.4.2 Moderní trendy

Předpokládá se, že do poloviny století bude planeta Země domovem pro devět miliard lidí, což bude velká výzva, zejména z důvodu zajištění produkce dostatečného množství potravin a jiných životně důležitých zdrojů pro lidstvo. Fosfor je spolu s dusíkem a draslíkem rostlinnou živinou, jež je nezbytná pro růst a vývoj plodin. Pro zajištění a udržení vysoké výnosnosti plodin, se tak musí aplikovat na zemědělské půdy v podobě hnojiv (Johnston 2000). Fosfor je při výrobě potravin nepostradatelný a nemá náhradu, proto je naprosto zásadní zajistit jeho dlouhodobou dostupnost a přístupnost pro potravinovou bezpečnost. Očekává se nárůst poptávky po hnojivech, která z dlouhodobého hlediska poroste. Fosfátová hornina je hlavním a vysoce kvalitním světovým zdrojem, bohužel však i neobnovitelným zdrojem, jehož zásoby se neustále tenčí, jsou vzácnější a dražší (Childers et al. 2011, Cordell et al. 2009).

Aktuální snahou je hnojení tím způsobem, aby se přecházelo trvalému nedostatku v půdách. Při používání fosforečných hnojiv se projevuje dlouhodobý bilanční deficit, kvůli kterému se snižuje půdní úrodnost, jelikož dochází ke zvýšenému odběru fosforu z půdy (Kunzová 2009).

V současnosti se využívá pro znovuvyužití fosforu v zemědělských systémech též více a více materiálů a produktů, které byly kdysi považovány za odpad. Jde například o zbytky anaerobní fermentace, komunální odpady, popel či kompost. Některé biologické zdroje též obsahují fosfor, ale i jiné důležité organické látky a živiny. Jedná se zejména o hnůj hospodářských zvířat, který nejen že zlepšuje strukturu půdy a její úrodnost, ale má i schopnost a potenciál nahradit anorganická hnojiva. Další možností, jak zpřístupnit půdní anorganický a organický fosfor, je využití biostimulantů. Jejich účinnost je však v praxi stále poměrně málo probádaná. Do popředí se dostává i získávání fosforu z hnoje, odpadních vod, kalů a dalších materiálů (Withers et al. 2014).

Vzhledem k výše uvedeným skutečnostem dochází k rozvoji mnoha oborů. Těmi je například využití lokální aplikace hnojiv – především v systémech precizního zemědělství. Dále využívání odpadů jako zdroje fosforu, využití biostimulantů či biocharu.

3.4.2.1 Cílené hnojení porostů

Technologie precizního zemědělství kladou důraz na individuální přístup a péči o jednotlivé části zemědělských pozemků, přičemž se opírají o přesnou znalost stavu porostu a heterogenity půdních vlastností. Nejedná se však o zcela nové technologie – již před mnoha staletími si původní pěstitelé uvědomovali časovou i prostorovou proměnlivost půdních a porostních vlastností v rámci jednotlivých honů (Neudert et al. 2018).

Základním konceptem precizního zemědělství je pochopit prostorovou a časovou variabilitu, vhodný popis i záznam, což umožňuje přesně řídit vstupy. Pokroky posledních let v odvětví počítačových systémů pro správu dat poskytují mnoho příležitostí pro komplexnější analýzu dat, než tomu bylo v minulosti. Tato skutečnost by měla vést k lepším manažerským rozhodnutím (Mallarino & Schepers 2005).

Precizní zemědělství, často též nazývané satelitní zemědělství, je založeno na technologii kosmického věku, který zahrnuje dálkový průzkum Země (DPZ), geografický informační systém (GIS) a globální polohový systém (GPS) k optimalizaci využití zdrojů. Tyto technologie založené na elektronice se používají k cílenému hospodaření s rostlinnými živinami, vodou, škůdci a zpracováním půdy. Dále své využití najdou zejména v řešení prostorové a časové variability. Cílem precizního zemědělství je využít informace o půdě, terénu a počasí, optimalizaci, efektivitu vstupů a zvýšení ekonomických a ekologických přínosů. Strategií je zvýšení produktivity půdy za stále se snižujících zdrojů, aby byla uspokojena neustále rostoucí poptávka po krmivu, palivech a dalších. Tato strategie by měla řešit aktuální problémy 21. století, kterými je například rostoucí populace, vzrůstající energetické potřeby, zvyšující se koncentrace CO₂ a jiných skleníkových plynů, odlesňování deštných pralesů, degradace půdy, desertifikace, snižování výměry orné půdy na obyvatele, dodávky sladké vody, rizika hladu a podvýživy (Lal & Stewart 2015).

Hnojením zajišťujeme adekvátní přísun živin, aby pěstované plodiny byly schopné vytvořit kvalitní produkci a požadovaný výnos. Nejdůležitějším cílem je uzpůsobit polní operace lokálním podmínkám stanoviště. Především jde o to provádět zásahy na daném místě ve správný čas a s optimální intenzitou. Vychází z bilančního přístupu, který lze zkráceně popsat tak, že živiny, které jsou z pozemku odvezeny ve formě sklizeného produktu, je zapotřebí navrátit v podobě hnojiv (statkových či minerálních) zpět. Mapování variability půdy a porostů nám umožňuje rozdělit pozemek do jednotlivých zón a pomocí vhodné techniky pak provádět lokálně cílenou aplikaci hnojiv. Dále je důležitým cílem účinně a efektivně využít hnojiva, a zároveň neopomíjet výnosový potenciál daného místa na pozemku. Též je potřeba optimalizovat kvalitu produkce a dbát na životní prostředí, aby nedocházelo k jeho kontaminaci (Lukas et al. 2012). Pro stanovení potřebné dávky hnojení se berou v úvahu především následující parametry: půdní a klimatické podmínky stanoviště, předplodina a její vliv na následující plodinu a půdu, organické hnojení, způsoby zpracování půdy, legislativní ekologická omezení, klasický bilanční princip a obsah živin v použitých statkových hnojivech. Toto vše má využití právě pro stanovení potřeby hnojení plodin fosforem, draslíkem i hořčíkem.

3.4.2.1.1 Hnojení fosforem

Zvýšená aplikace fosforečných hnojiv výrazně zlepšila výnosnost plodin i potravinovou bezpečnost (Huang et al. 2017). Aktuální nárůst v používání fosforečných hnojiv a živočišné výroby má za následek akumulaci fosforu v zemědělských půdách. (MacDonald et al. 2011). Zatížení zemědělské půdy fosforem bylo identifikováno jako jedna z hlavních příčin problémů s kvalitou povrchových vod ve vyspělých zemích (Ekholm et al. 2005). Aplikace fosforu na zemědělské půdy má mnoho pozitivních účinků, ať už se jedná o zlepšení produkce pěstovaných plodin či udržování půdní úrodnosti. Příjem fosforu polních plodin a trav se pohybuje v rozmezí 10–25 kg P na 1 ha a rok (Sharpley et al. 1994). Aplikáční dávky fosforu však velice často toto množství daleko převyšují.

Využitelnost fosforu rostlinami je v sušších podmínkách 10–15 % a ve vlhčích přibližně 15–20 % v prvním roce po aplikaci. Efektivita využití fosforečných hnojiv se aplikací malých dávek snižuje. Fosfor, jež je dodáván v malých dávkách se snadno váže na nerozpustné fosforečnany. Tímto způsobem sice dochází k dosycování půdního prostředí, ale pro rostliny přístupné je pouze malé množství z aplikovaného fosforu (Fecenko & Ložek 2000). Na velké většině půd se doporučuje hnojení fosforem do zásoby až na tři roky (Vaněk et al. 2012).

Hnojiva jsou obecně základní složkou všech zemědělských systémů, ale jak již bylo zmíněno, také jsou hnací silou našich problémů s eutrofizací (Withers et al. 2014).

Aplikací fosforečného hnojiva lze dočasně zvýšit i koncentraci anorganického fosfátu (Pi) v půdním roztoku, který je přijímán rostlinami. Avšak ten se v důsledku sorpce fosforu půdou téměř okamžitě imobilizuje (Stevenson & Cole 1999). Půda rostlinám umožňuje získat fosfor pouze v rámci několika milimetrů povrchu kořene. Jeho získání je dáno objemem půdy, který již kořeny rostlin prorostly. Tato hodnota je většinou menší než 1 % a jen vzácně dosahuje i 5 % (Barber 1995). Výsledkem je, že velká část fosforečného hnojiva – často i více než 90 %, není přijímána rostlinami a zbytek je pak zadržován půdou v podobě těžko rozpustných forem (Stevenson & Cole 1999). Právě proto je potřeba vyvíjet systémy pro zlepšení využití půdy a fosforečného hnojiva pro rostlinnou produkci.

Jedním ze způsobů, jak toho dosáhnout, může být v podobě moření osiva plodin – obohacením osiva o fosfor ještě před samotným zasetím plodiny, což může snížit potřebu fosforečného hnojiva v následném růstu pěstovaných plodin. Pro ověření této hypotézy byl proveden pokus, kde se mořila semena pšenice (*Triticum aestivum*) do roztoku fosforečnanu draselného těsně přes setím. Nakonec se prokázalo, že semena, která byla obohacena o fosfor, vyžadovala o 60 % méně hnojiva než semena, která nebyla mořena fosforečnanem draselným před setím. Z toho tedy vyplývá, že obohacením semen pšenice fosforečným hnojivem před setím vede ke snížení požadavků rostlin na fosforečné hnojivo (Sekiya & Yano 2010).

V šestileté studii byl zkoumán výnos a obsah fosforu v pšenici, která byla pěstována na černozemních jílovitých půdách v Kanadě. Ukázalo se, že plošná aplikace 40 kg fosforu na 1 ha, měla průměrný výnos a příjem fosforu podobný, jako tomu bylo při aplikaci 10 a 20 kg fosforu na ha způsobem pod patu. Při po sobě jdoucím hnojení pod patu rostliny pšenice, výrazně těžily ze zásob předešlých aplikací hnojiva stejným způsobem (Wagar 1984).

Výhodným způsobem, kterým lze aplikovat fosfor do půd, kde je jeho množství nedostatečné, je pomocí injektáže. Jedná se o šetrný způsob, jež bývá prováděn pomocí přesné GPS, díky tomu dochází jen k minimálnímu narušení půdy i porostu (Preston et al. 2019).

Skvělých výsledků se též dosahuje při technologiích, které spočívají na lokálním a přesném rozmístění hnojiv do pásů (Lal & Stewart 2015). Tento typ umístění je vhodné aplikovat téměř kdykoliv, ne však v čase výsevu. Moderní zemědělské stroje jsou již pro tyto účely vybaveny přesnými systémy s GPS, které hnojivo aplikují přesně tak, aby nebylo moc daleko nebo naopak moc blízko od řádků s osivem (Hopkins & Hansen 2019).

V systémech s chovem hospodářských zvířat se velmi málo zohledňuje hodnota fosforu obsaženého v hnojivech (Withers et al. 2006). Přebytky fosforu v oblastech s intenzivním chovem prasat a drůbeže v USA byly identifikovány na základě nadměrného hromadění fosforu v půdě s následným vyšším potenciálem ztráty fosforu v odtoku (Sims 1993).

Jedna ze základních příčin zatěžování zemědělských půd fosforem je převážně neefektivní hnojení. Výnosová odezva na fosfor se skládá z účinků fosforečného hnojiva, jež bylo aplikováno během roku a fosforu, který je již akumulován v půdě. Akumulovaný fosfor v půdě totiž snižuje odezvu výnosu na dodané hnojivo. Pokud fosforečné hnojení převyšuje odběr fosforu rostlinou, pak většina přebytečného fosforu zůstane v půdě a dojde k jeho akumulaci do zásoby (Hooda et al. 2001).

Zatížení fosforem z rostlinné produkce lze zmírňovat používáním větší přesnosti při aplikaci fosforečných hnojiv do celkového výrobního procesu. Stejně tak lze snížit ztráty půdy prostřednictvím eroze – například formou výsevu meziplodin, vegetativních pásů či omezením zpracování půdy. Precizní hospodaření s fosforem vyžaduje především znalosti o souvislostech mezi P-hnojením, vlivem na výnos plodin, akumulaci půdních zásob fosforu a ztrát fosforu do vodních toků, které souvisí s obhospodařovanou půdou. Pro ekonomické účely je důležité umět zvážit kompromis mezi zisky z výroby a škodami na životním prostředí v důsledku zatížení fosforem v průběhu času (Iho & Laukkanen 2012).

V současnosti existuje mnoho přesvědčivých zdrojů, ekologických i environmentálních opodstatnění k tomu, aby lidská společnost svou závislost na hnojivech fosforu snížila a raději zvýšila efektivitu jeho využití. Čtyři následující klíčové kroky by měly snížit závislost na fosforečných hnojivech:

- prozkoumat potenciál ke snížení poptávky plodin po fosforu, jelikož je velká část fosforu uložena v jedlých zrnech, což není pro konzumenta metabolicky užitečné
- rozpoznat a kvantifikovat hodnotu fosforu, který je již přítomný ve většině půd a vyvinout způsoby, jak ho lze využít
- zvýšit a zefektivnit používání recyklovaného a regenerovaného fosforu, který má potenciál nahradit fosfor nově vyrobený
- vyvinout účinnější formy hnojiv a aplikačních metod, které umožní lepší zacílení aplikovaného fosforu během nejdůležitějších růstových fází

Přijetí předchozích kroků integruje především s investicemi do šlechtění rostlin a inovativních technologií pro přesnější hospodaření s půdou, plodinami a hnojivy. To vše v souladu s větším povědomím veřejnosti o ekologické stopě nejen potravinářských produktů (Withers et al. 2014).

3.4.2.2 Využití odpadů

Fosfor je makroživina, kterou vyšší rostliny potřebují ke svému růstu a vývoji, a právě P-hnojiva jsou často používána pro zvýšení jejich produkce. Hlavní surovinou pro výrobu fosforečných hnojiv je fosfát, jehož celosvětová produkce byla v roce 2011 přibližně 191 000 kt. Fosfát je vzácným a omezeným zdrojem. Největší část veškerého vytěženého fosfátu se používá právě k výrobě minerálních hnojiv. Odhaduje se však, že jeho dostupnost v příštích 50–100 letech prudce poklesne (Cordell et al. 2009).

Kvalita světových zásob fosfátů se neustále snižuje a jejich množství je omezené. Proto se přichází s mnoha řešeními. Jedním z nich je implementovat základní znalosti a techniky obnovy fosforu v různých tocích odpadů, které obsahují fosfor. Jedná se například o domácí odpadní vody (Acevedo et al. 2015). Vzhledem ke skutečnosti, že jsou z detergentů, potravinového odpadu, přídatných látek a dalších produktů, na osobu a den produkovány přibližně 2 g fosforu (Verstraete et al. 2009), je sektor čištění odpadních vod považován za jedno z hlavních ohnisek zmírňování čerpání fosforu (Acevedo et al. 2015). Přestože je největší starostí fosfor z odpadních vod odstraňovat především pro splnění limitů jeho vypouštění a ochrany vod před eutrofizací (Verstraete et al. 2009), je v odstraněném fosforu potenciální znovuvyužitelnost v podobě náhrady za vytěžené fosforečné hnojivo (Cornel & Schaum 2009).

Při aplikaci samotných organických hnojiv v poměrně vysokých dávkách se nedosahuje tak vysokých hodnot, jež je možné získat při rovnoměrném minerálním hnojení. Nejvhodnější variantou je však kombinace těchto dvou možností hnojení. Mezi aplikací statkového hnoje a čistírenského kalu nebyl téměř žádný rozdíl (Černý et al. 2010).

Mnoho organických odpadních materiálů obsahuje významné množství fosforu v různých formách. Ať už se jedná o organický, jež je špatně vázaný rostlinami, či anorganický – lépe sorbovaný rostlinami. Čistírenské kaly obsahují druhé největší množství fosforu. Na prvním místě se drží kostní moučka, která je ale v rámci celosvětového měřítka ve výrazně menším množství než samotný kal. Proto je kal v současnosti považován za velice perspektivní zdroj fosforu (Cordell et al. 2011, Havukainen et al. 2016).

Používat masokostní moučku jako krmivo pro zvířata je již zakázáno, proto je v současnosti spalována a dále využívána jako zdroj energie. Zbytek popelu obsahuje nízké množství těžkých kovů (Römer & Steingrobe 2018).

3.4.2.2.1 Čistírenské kaly

Čistírenské kaly jsou vedlejším produktem čištění odpadních vod. Obsahují vysoce koncentrované organické a anorganické látky, včetně fosforu, které mají znečišťující charakter. Kal je též významnou zásobárnou mikroorganismů a enzymů.

Čistírenský kal obsahuje přibližně 8 % fosforu v sušině, což z něj dělá poměrně významný sekundární potenciální zdroj tohoto prvku. Právě získávání P z čistírenských kalů bude v následujících desetiletích, z důvodu nedostatku apatitových minerálů, nabývat na významu (Biswas et al. 2009). Do kalu je přiváděno až 90 % fosforečnanů z odpadních vod. V současné době je dávana přednost spíše spalování čistírenských kalů oproti jejich přímému využití v zemědělských systémech. Představy o znovuzískávání fosforu v rámci procesu čištění odpadních vod jsou momentálně velmi oblíbené, jelikož se často slibuje získání produktu bez nečistot či jiných kontaminantů s vysokou kvalitou vzniklého hnojiva (Blöcher et al. 2012).

Vzhledem ke skutečnosti, že fosfor přitéká do čistíren odpadních vod, je proces jeho získávání z nich poměrně výtěžný – až 40 %. Takto získaný fosfát se využívá v zemědělství nebo dále putuje do fosfátového průmyslu. Například v Německu se v zemědělství stále využívá přibližně jedna třetina čistírenských kalů, což představuje asi 2,5 milionu tun sušiny za rok. Hlavním účelem je využití živin obsažených v kalu pro samotné hnojení (Montag et al. 2007).

Dle studie Coker & Carlton-Smith (1986) je čistírenských kalech fosfor nejsnadněji dostupný pro špenát (*Spinacea oleracea*) a v druhé řadě pro jílek (*Lolium perenne*). Dle tří pokusů byl fosfor v čerstvém kalu stejně dostupným jako v superfosfátu. Naopak fosfor ve vyhnílem kalu, byl pro rostliny dostupný z 60 % v porovnání se superfosfátem.

Momentálně existuje přes 30 možných technologií, kterými lze fosfor z čistírenských kalů získat a neustále vznikají nové (Cordell et al. 2011). Všechny tyto způsoby přináší jak rizika, tak i nové možnosti. Teprve zavedením individuálních přístupů lze navrhovat ekologický i ekonomický způsob opětovného získávání fosforu, jež je spojen se zbytkovým kalem a dalšími odpady vznikajícími během procesu čištění odpadních vod (Ciešlik & Konieczka 2017).

Nejjednodušším způsobem, jak získat fosfor z kalu, je jeho přímé použití jako hnojiva. Tento způsob však přináší řadu problémů souvisejících s jeho dopravou a nakládáním, jakožto s vysoce hydratovaným kalem, poněvadž obsahuje i více než 50 % vody (Li et al. 2014). Čistírenské kaly dále obsahují i značné množství případně nebezpečných organických znečišťujících látek. Jedná se zejména o aromatické uhlovodíky a těžké kovy. Maximální přípustné koncentrace těchto kontaminantů jsou stále přísnější, a především právně řízeny, zvláště pak ty, které udávají přípustné množství těžkých kovů v kalu, jež je aplikován na zemědělské půdy (Suciu et al. 2015, Tarayre et al. 2016). Kaly mohou obsahovat i větší množství solí nebo mít až extrémní hodnoty pH. Vysoký obsah fosfátů i dusičnanů v kalech opět představuje hrozbu pro kontaminaci podzemních i povrchových vod (Cameron et al. 1997). Vzhledem k rostoucím obavám z kontaminace patogeny při přímé aplikaci kalu na půdy, vedly i k úplnému zákazu jeho použití v zemědělství některých evropských zemí (Schoumans et al. 2015).

Dalším ze způsobů, kterými lze získat fosfor je z popelu, jež byl získán spalováním a zplyňováním z čistírenských kalů, a to prostřednictvím kyselé extrakce za použití kyseliny sírové a šťavelové. Výsledek této metody se ukázal jako vhodná alternativa ve srovnání s horninovým fosfátem, jakožto materiálem pro výrobu hnojiv. Přesto se ještě doporučuje provést jinou studii na selektivní separaci fosforu i dalších kovů (Atienza–Martínez et al. 2014).

Dalším způsobem, jak lze získat fosfor z kalů je anaerobní úprava čistírenského kalu za předpokladu, že se fosfor z kalu uvolní. Po oddělení složek kalu pak lze pomocí srážecích a krystalizačních procesů rozpuštěný fosfor získat v podobě fosforečnanu vápenatého nebo jako struvit (Oenema et al. 2012). Kromě metody srážení fosforečných minerálů z kalů je jednou z nejpoužívanějších technologií, jak získat fosfor, pomocí výluhů. Těmito způsoby lze získávat fosforečné minerály v podobě struvitů, hydroxyapatitů nebo fosforečnanů vápenatých. Jedná se o skupinu nejvýznamnějších technologií, kterými lze získat fosfor (Yuan et al. 2012).

Obecně by měl být proces práce s čistírenskými kaly naplánován konkrétně pro danou čistírnu odpadních vod. Jedině tímto způsobem je možné získat ekologicky i ekonomicky příznivé metody hospodaření. Chemické a toxikologické charakteristiky jsou naprosto zásadní pro vývoj nových metod týkajících se nakládání s čistírenskými kaly (Ciešlik et al. 2015).

3.4.2.2.2 Ostatní odpadní materiály

Hospodářských zvířat je po celém světě přes 65 miliard, a proto produkují značné množství statkových hnojiv. Statková hnojiva obsahují až desetinásobné množství fosforu, než je jeho poptávka za rok (Naidu et al. 2012). Přes 70 % krmiv konzumovaných hospodářskými zvířaty je vylučováno ve formě moči a výkalů, které jsou významným zdrojem organické hmoty, fosforu, dusíku, draslíku a jiných makroživin (Barnett 1994). Například u prasat s jejich rychle rostoucí hmotností potřeba stravitelného fosforu klesá (Partanen et al. 2010). Mezi důležité činitele, které ovlivňují chemické složení statkových hnojiv, řadíme především druh hospodářského zvířete, krmnou dávku, typ ustájení, druh podestýlky, množství vody, způsoby, kterými je nakládáno s odpady a klimatické podmínky (Karunanithi et al. 2015).

Statkový hnůj a organické komposty jsou řazeny mezi organická hnojiva, která vynikají velkým množstvím organických aniontů. Tyto anionty však soupeří s fosforem o místa fixace, což pak vede k menší fixaci fosforu, a proto je tak fosfor k dispozici více, což vede ke zvyšování PUE – efektivity využití fosforu (Guppy et al. 2005). V dlouhodobém polním pokusu po dobu 25 let došlo spolu s použitím statkového hnoje i minerálního hnojiva ke zvýšení dostupného fosforu metodou Olsen ze 48,8 kg na ha na 95,9 kg na ha (Ghosh et al. 2012). Na lehké písčité půdě došlo ke zvýšení aktivity kyselé fosfatázy, mikrobiální biomasy a půdních enzymů při použití statkového hnoje a minerálního fosforečného hnojiva (NPK) při maximálním odnožování (Mandal et al. 2007). V jiném pokusu na písčité půdě byla testována dostupnost se dvěma různými variantami organického hnojení. Výsledkem bylo, že po aplikaci prasečího hnoje v dávce 15 tun na hektar byla dostupnost fosforu výrazně vyšší ve srovnání s kontrolou (Yan et al. 2013).

Organická hnojiva jsou poměrně často nahrazována slámou, která se po sklizni hlavní plodiny (nejčastěji obilovin) nechá na poli. Účinnost této metody na celkový výnos je však celkem nízká (Powlson et al. 1985). Důležitým zdrojem fosforu pro plodiny pochází i z rozkladu rostlinných zbytků. Většina fosforu v rostlinných zbytcích se nachází v podobě ortofosfátu, jež se zpět do půdy vrací v poměrně snadno dostupné podobě (Noack et al. 2012). Zbytky plodin mají potenciál zvyšovat labilní fosfor, mineralizovatelný organický fosfor i vyměnitelný fosfor (Abdala et al. 2015). Zaváděním zemědělských zbytků (zelené hnojení, organické odpady a huminové látky z uhlí) se zvýšila schopnost půdy zadržovat vodu (Mbagwu et al. 1991). Při aplikaci zbytků dochází ke zlepšování dostupnosti půdního fosforu. Hlavním cílem je zvýšit úrodu i výnosy s minimálními negativními vlivy na životní prostředí. Za předešlých 20 až 30 let byl zkoumán vliv postupů hospodaření s rostlinnými zbytky na sklizený výnos následující plodiny. Výsledky tohoto zkoumání však nejsou přímočaré a nelze tedy říct, který systém práce s rezidui je lepší a za jakých podmínek. V tomto směru je navrhována ještě řada dalších průzkumů (Kumar & Goh 1999).

Přidáním kompostu do půdy lze zabránit sorpci půdního fosforu. Jelikož vazebná energie pro sorpci fosfátů a místa sorpce fosforu se snižují, což umožňuje zvýšení množství dostupného fosforu v půdě (Horta 2019). Kompostem či směsí kompostu a biouhlu je možné upravit kyselost půd, a dokonce zvýšit celkový obsah fosforu, dostupný fosfor i jeho anorganické frakce či organický fosfor (Ch'ng et al. 2014). Je to možné zejména proto, že kompost zvyšuje pH půd, přičemž snižuje výměnnou kyselost, a vazebnou sílu hliníku i železa. Mimo to lze začleněním kompostu do více zvětralých půd zlepšit celkovou imobilizaci P a rozpustnost fosfátových hornin (Lata Verma & Marschner 2013).

Aplikace kozího hnoje spolu s nižšími dávkami fosforečných hnojiv může poskytnout celkem efektivní strategii, co se týká pohledu nákladového i z hlediska efektivity využití fosforečného hnojiva v důsledku urychlení koloběhu fosforu. Samotná aplikace kozího hnoje zajistila udržení vyšší hladiny labilního fosforu v půdě. Jedna jeho aplikace by teoreticky mohla přispět ke splnění požadavků plodiny. Ještě je však potřeba podrobnější výzkum a testy v běžném provozu (Gichangi et al. 2009). Hnůj mimo jiné obsahuje i poměrně velké množství látek, kterých je fosfor součástí. Jedná se například o fosfolipidy či nukleové kyseliny, které uvolňují za účelem zvýšení koncentrace dostupného fosforu v půdě mineralizací (Turner & Leytem 2004).

3.4.2.3 Biostimulanty

Biostimulanty se v posledních 25 letech dostaly do popředí zájmu a jsou stále více integrovány do výrobních systémů, kde mají za cíl modifikovat fyziologické procesy zvyšující efektivitu využití živin, podporující vývoj rostliny a umožňující tak i snížení dávek hnojiv (Kunicki et al. 2013). Dle odhadů se jejich používání v zemědělství ročně zvedá až o 12 % (Calvo et al. 2014). Mezi země, které jsou v popředí ohledně výroby biostimulantů patří Francie, Itálie a Španělsko (Traon et al. 2014).

Biostimulant se skládá z různých látek anebo mikroorganismů, které stimulují půdní prostředí i metabolismus rostlin. Tato potenciální schopnost pak vede k jejich použití v zemědělství pro zlepšení různých půdních vlastností a zdrojů potřebných živin pro pěstované plodiny. Biostimulanty je však poměrně složité definovat, zejména proto, že se získávají z různých zdrojů a obsahují širokou škálu molekul. Izolace jedné složky je navíc téměř nemožná a jejich účinnost je způsobena působením různých mikroorganismů. Mezi tyto zdroje lze zařadit například bakterie, mořské řasy, houby, vyšší rostliny, živočichy a huminové látky (Yakhin et al. 2017).

Biostimulanty lze definovat jako látky či materiály, jejichž aplikací na semena rostlin, samotné rostliny či do pěstebních substrátů, mají schopnost upravovat fyziologické procesy probíhající v rostlinách. Mezi biostimulanty nelze zařadit pesticidy a hnojiva (Halpern et al. 2015, Du Jardin 2015).

I mnoho odpadních surovin je v současnosti využíváno na výrobu biostimulantů. Tyto produkty mají ve své podstatě schopnost zlepšovat využívání živin rostlinou a navyšovat tak jejich toleranci proti abiotickým a biotickým stresům. U listové zeleniny bylo prokázáno, že vlivem působení biostimulantů dochází ke zvýšení obsahu chlorofylu a karotenoidů v listech, podnícení růstu kořenů, což stimulovalo i samotný růst rostlin a též se zvýšil antioxidační potenciál, který zabraňuje tvorbě nových radikálů a omezuje jejich negativní působení (Bulgari et al. 2015). V současnosti je klasifikace biostimulantů postavena na původním zdroji materiálu. (Yakhin et al. 2017).

3.4.2.3.1 Extrakty z mořských řas

Mořské řasy a jejich výtažky se používají v zemědělství jako stimulanty rostlin. Jedná se o důležitý zdroj organických látek a živin. Jejich aplikací postřikem na list je možné zvýšit odolnost vůči abiotickým faktorům, fotosyntetickou aktivitu a zlepšit růst rostlin. Dále mohou zvýšit výnos, produktivitu plodin i odolnost vůči houbám, virům a bakteriím (Sharma et al. 2013). K výrobě biostimulantů se používají mořské řasy, které obsahují látky podobné hormonům. Jedná se o cytokininy a auxiny, které podporují prodlužování kořenů a jejich výhonků (Hamza & Suggars 2001). Mimo jiné obsahují i aktivní minerální a organické sloučeniny, jejichž součástí jsou i některé komplexní polysacharidy a rostlinné hormony pro příznivý růst rostlin (Battacharyya et al. 2015).

3.4.2.3.2 Mikroorganismy

Tato skupina je poměrně obsáhlá. Řadíme sem bakterie, kvasinky a houby. Jsou izolovány z místa jejich přirozeného výskytu – půdy, vody, hnoje či rostlin. Fixací dusíku napomáhají příjmu živin a mají schopnost rozpouštět látky, které jsou v běžném prostředí nerozpustné. Jejich aplikace se provádí za účelem zvýšení produktivity plodin podpořením metabolických procesů (Ruzzi & Aroca 2015).

Výzkum mikroorganismů nebyl příliš podporován, jelikož nebyly dostatečně zohledněny v legislativě. V roce 2019 byly poprvé mikroorganismy zahrnuty do legislativy ohledně hnojiv, avšak seznam povolených pozitivních látek je stále dosti omezený. S ohlédnutím k příznivým účinkům aplikace mikroorganismů podporujících růst rostlin a jejich vlastnosti, jako je kvalita ovoce, hmotnost, obsah cukrů, bílkovin a antokyanů, je snaha o novelizaci seznamu, který poskytne více možností pro bezpečnou výživu rostoucí populace a zároveň bude respektovat životní prostředí (Castiglione et al. 2021).

Samotný růst rostlin podporují rhizobakterie (PGPR – Plant Growth Promoting Rhizobacteria). Jedná se o prospěšné půdní bakterie, které přímými i nepřímými způsoby ovlivňují kvalitu růstu, jelikož žijí ve spojení s kořeny rostlin. Jsou též schopny zlepšit reakci rostlin při stresových stavech a stimulují aktivity fyzikální, biologické i chemické. Způsoby jejich působení jsou však různé a nelze tedy říci, že by bakterie měly stejné mechanismy (Dey et al. 2004). Rhizobakterie se vyskytují ve mnoha bakteriálních kmenech. Jedná se například o *Actinobacteria*, *Proteobacteria* a *Firmicutes*, dále lze zahrnout i kmeny patřících do rodů *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Azospirillum*, *Azobacter*, *Alcaligenes*, *Arthobacter*, *Agrobacterium*, *Burkholderia*, *Pantoebarium* a *Comaminas Variovorax* (Kloepper et al. 1989).

Fosfor solubilizující bakterie jsou ve výživě rostlin důležité, jelikož zvyšují příjem fosforu rostlinou a jejich využití jako PGPR je dalším důležitým aspektem, který je schopen zvyšovat výnosový potenciál pěstovaných plodin. V této souvislosti je potřeba nadále zkoumat, jak lze zlepšit výkonnost a využití bakterií, které rozpouštějí fosfáty, jako bakteriálních inokulantů (Rodriguez & Vidal 1999).

Na základě mnoha studií se zdá, že mikrobiální biostimulanty adekvátně reagují na špatné vlastnosti a funkčnost degradovaných zemědělských půd a to tak, že jsou schopny splnit cíle zemědělské produktivity a obnovovat biodiverzitu půdy. Výběr mikrobiálních složek výsledného produktu je naprosto klíčový pro zajištění jeho účinnosti (Castiglione et al. 2021).

Již je všeobecně známo, že výskyt a diverzita arbuskulárních mykorrhizních hub (AMF) je do jisté míry ovlivňována podmínkami vnějšího prostředí, především klimatem. Ve Švýcarsku bylo nalezeno více než 100 druhů těchto mykorrhizních hub (Oehl et al. 2017).

Ve výsledku se zdá, že aplikací vícedruhových společenství AMF a PGPR lze dosáhnout lepších účinků ve srovnání s aplikací jednoho kmene. Tyto směsi se vyznačují synergickými či aditivními biostimulačními účinky (Castiglione et al. 2021).

Využití AMF jako biostimulátorů se v posledních dvaceti letech výrazně rozšířilo zejména díky jejich schopnosti zajistit produkci a stabilitu ekologickou cestou. AMF zlepšují kořenový systém a tím i příjem makro- i mikroživin, jelikož dochází k zvýšenému transportu a rozpustnosti živin. Pro maximální přínosy je důležité zároveň přijetí prospěšných postupů hospodaření, inokulací účinnými kmeny AMF a konkrétní výběr rostlinných hostitelů a hub. Inokulací AMF lze podporovat sekundární metabolismus rostlin a zlepšovat produktivitu plodin. Většina studií však byla prováděna v nádobových pokusech, sklenících, komorách a v

jiných kontrolovaných podmínkách, bez přímého vlivu přírodního prostředí, proto může být reakce AMF v přirozeném prostředí odlišná, jelikož pak AMF budou vystaveny řadě biotických a abiotických stresů, které mohou reagovat a ovlivnit jejich výkonnost. Je důležitá spolupráce mezi jednotlivými odvětvími – vědci, zahradníci, agronomové a průmysl. Budoucí výzkum by se měl zaměřit na následující:

- pochopit interakce mezi kmeny AMF, druhy plodin a prostředím s cílem vybrat nejvhodnější kombinace
- identifikaci molekulárních mechanismů, které jsou zodpovědné za zvýšení obsahu prospěšných látek
- zhodnocení účinnosti AMF v polních podmínkách i při působení více stresových faktorů
- bakterie a kmeny, které působí synergicky a maximalizují přínosy
- vývoj kvalitních inokul s dlouhou skladovatelností se snadno použitelnými formami (Rouphael et al. 2015)

3.4.2.4 Popel a biochar

Biomasa je obnovitelným zdrojem, jejíž význam stále narůstá, jelikož rostou tendence se více zaměřovat i na tyto zdroje. Za nejvýznamnější zdroj spalitelné biomasy považujeme dřevo a dřevní odpad, jež činí přibližně 64 % z celkového množství. S 24 % poté následuje biologicky rozložitelný komunální odpad. Zemědělské plodiny a zbytky při jejich zpracování činí asi 5 %. Zbylých 7 % pak tvoří živočišné zbytky, vodní organismy a další (Demirbas et al. 2009). Biomasa se dá popsat jako směs hemicelulózy, celulózy, ligninu a dalších organických látek, které se zvláště pyrolyzují či degradují jinou rychlostí a cestami. Rychlost a rozsah degradace záleží na parametrech teploty, rychlosti ohřevu biomasy a tlaku (Bridgwater et al. 1999, Weber & Quicker 2018).

Zájem o pyrolýzu biomasy celosvětově vzrůstá, především proto, že:

- jejím produktem je biouhel, který může mít pozitivní vliv pro použití na zemědělských půdách z hlediska kvality půdy
- pyrolýza může přispívat ke zmírnění emise skleníkových plynů, zejména jde o CO₂ a N₂O
- pyrolýza se stává efektivní cestou, kterou lze využít energii z biomasy a jiných organických odpadů

Pyrolýza však stále nemůže nahradit klasické spalování biomasy, právě proto, že celková produkce biouhlu je již delší dobu velmi omezená (Lehman & Joseph 2009). Velikost částic biouhlu, jež vzniká pyrolýzou organického materiálu je závislá na povaze vstupujícího materiálu. V závislosti na intenzitě použité technologie pyrolýzy dojde v průběhu zpracování ke konkrétnímu stupni otěru jednotlivých částic biomasy. Následný materiál je zřetelně drobnější než původní biomasa (Lehmann & Joseph 2009).

Dle odhadů se ročně spálí přibližně 10 milionů Mt biomasy (Levine 1991). Sám člověk nese zodpovědnost za přibližně 90 % spalované biomasy, mezi kterou řadíme dřevo, listy, stromy, trávu, hnůj i odpady. Spalování probíhá například ve formě vytápění, vaření, výroby elektřiny a v neposlední řadě se jedná o cestu, kterou lze zlikvidovat i odpady. Přibližně 4 % počáteční dřevní biomasy tvoří samotný popel z biomasy. Hmotnost popela se však zvyšuje, pokud dochází k nedokonalému spalování. Celkové množství fosforu ve spálené biomase se odhaduje od 0,1 do 2 Mt za rok. Popel obsahuje asi 0,1 až 1,5 % fosforu. Spalováním hnoje a biomasy v elektrárnách se popel recykluje zřídka, vzhledem k logistickým problémům či příliš vysokým obsahům škodlivých látek, kterými jsou například organické polutanty, kadmium, arsen, zinek a olovo. V současnosti je tento popel vesměs nevyužívaný. Z důvodu obsahu velkého množství živin může však být pro půdní úpravu hodnotný. Z hlediska právních předpisů není však jeho použití často povoleno, protože obsahuje velké množství znečišťujících látek (Oenema et al. 2012).

Dřevěný popel je složen z jemných částic a jeho aplikace může mít pozměňující vliv na strukturu půdy. Účinky dřevěného popela nejsou příliš známé. Z hlediska fyzikálních vlastností lze říci, že přidání dřevěného popela do půdy může mít dopad na texturu, provzdušnění, zasolenost a retenci vody. Částice dřevěného popela bobtnají a při smíchání s vodou jsou schopny blokovat půdní póry. Tím je zvyšována kapacita zadržování vody a zlepšení

zásobenosti živinami (Etiégni & Campbell 1991). Dřevní popel též slouží jako vápenatý materiál a neutralizační činidlo, které je vhodné pro kyselé půdy, jelikož má vysoce zásaditý charakter (Saarsalmi et al. 2012, Perucci et al. 2008). Optimalizací půdy jejím vhodným zpracováním a aplikací dřevěného popela lze zlepšit stav živin v půdě a též dochází ke zvýšení výměny kationtů (Nweke 2018).

Dřevěné uhlí je hlavní produkt v pevné formě, který je vyráběný pomalou hydrolyzou při teplotě kolem 300 °C, jež probíhá za omezeného množství kyslíku či bez přístupu kyslíku (Assis et al. 2016). Aplikací dřevěného uhlí dochází ke zlepšování zadržování vody v půdě a agregaci. Retence vody v půdě se zvýšila o 18 % po předchozím přidání 45 % dřevěného uhlí do písčité půdy, jelikož má dřevěné uhlí poměrně velký povrch díky jeho porézní povaze (Tryon 1948). Mimo jiné výhody dřevěného uhlí patří zejména v tropických oblastech i ta, že zvyšuje pH a snižuje nasycení hliníkem u kyselých půd ve velmi zvětralých půdách (Mbagwu & Piccolo 1997). V případě aplikace dřevěného uhlí společně s anorganickými nebo organickými hnojivy, lze ve srovnání s kontrolou dosáhnout průkazně vyšších výnosů (Lehmann et al. 2002). Dřevěné uhlí má vzhledem k jeho zvětšenému specifickému povrchu vzniklému během pyrolýzy i detoxikační schopnosti. To znamená, že z půdy i vody odstraňuje některé znečišťující látky, kterými je například olovo, arsen či rtuť (Chen et al. 2008).

K zuhelnatění produktu vede termochemické zpracování biomasy. Výsledný zuhelnatěný produkt se nazývá biouhel. Potenciální aplikace biouhlu předpokládají jeho použití jako výchozí látky pro katalyzátor, zlepšení kvality a úpravu půd, pro odstraňování kontaminantů z půdy a vod, úložný materiál pro CO₂ a H₂ či jako palivo pro palivové články (Qian et al. 2015). Biouhel je složen ze stabilních uhlíkových sloučenin, které vznikají zahřátím biomasy na teploty od 300 do 1000 °C s nejlépe nulovou koncentrací kyslíku. Jeho chemické složení je velice heterogenní, nicméně jeho přesné složení záleží na typu materiálu a podmínkách pyrolýzy (zejména teploty). Výzkumy následujících let by se měly zaměřovat a vyhodnocovat důsledky, které přináší rozdílné velikosti částic biouhlu a velikost pórů, jejich vliv na distribuci v půdě a půdní procesy, což jsou zásadní faktory pro mobilitu látek a osud biouhlu v půdě (Verhαιjen et al. 2010).

Nejčastěji je biouhel vyráběn pyrolýzou. Tu lze rozdělit na dva druhy dle její rychlosti na pomalou a rychlou, které záleží na rychlosti ohřevu. Pomalá pyrolýza probíhá při nízké rychlosti ohřevu po dlouhou dobu (v řádu i několika dní). Nejvíce se používá k výrobě dřevěného uhlí (Quian et al. 2015)

Začleněním biouhlu kyselých půd v určitém množství (40 g/kg), bylo možné zvýšit koncentraci fosforu v rovnovážném roztoku, snížit sorpci fosforu a zvýšit tak jeho biologickou dostupnost (Chintala et al. 2013). Výsledky metaanalýzy prokázaly, že má biouhel potenciál zvýšit dostupnost fosforu rostlinami. Též by mohl být udržitelnou strategií pro doplnění fosforečných konvenčních hnojiv. Biouhel je doporučován v dávce nad 10 t na hektar především proto, aby se dosáhlo požadovaných výsledků z hlediska dostupnosti fosforu (Glaser & Lehr 2019). Aplikace biouhlu též usnadňuje růst mykorrhizních hub a zvyšuje potenciál přežití důležitých bakterií, což pozitivně ovlivňuje míru rozpustnosti fosforu v půdách (Rafique et al. 2020).

V kyselých půdách stačí jen malé zvýšení pH a dojde ke snížení interakcí mezi fosforem a půdními minerály, jelikož dochází k tvorbě komplexů organických a minerálních látek majících ve srovnání s oxidy a hydroxidy železa a hliníku výrazně nižší sorpční kapacitu (DeLuca et al. 2015). Například aplikací biouhlu z kávových slupek na kyselé půdy se zlepšilo pH, což vedlo k významnému zvýšení dostupnosti fosforu v půdě pro rostliny a jiné organismy (Dume et al. 2017). Biouhel produkovaný při nízkých teplotách mezi 300 a 450 °C je považován za vhodný k úpravám kyselých půd, pro lepší příjem fosforu rostlinou. Jako nevhodná se ukázala možnost aplikace biouhlu na neutrální a alkalické půdy. Docházelo ke zvyšování adsorpce a snižování desorbovatelnosti fosforu (Eduah et al. 2019). Přípravek, jež byl složený z biouhlu, vápna, biosolidů a jiných domácích mikrobiálních inokulantů v důlních hlušinách zvýšil dostupnost živin pro rostliny a zlepšil tak růst rostlin a rhizosférické prostředí. Zdroj inokula se však neukázal být důležitým determinantem v průběhu pozorování (Trippe et al. 2021). Použití biouhlu na bázi drůbežího steliva též významně zvýšilo koncentrace fosforu v půdě a v listech. Bylo potvrzeno, že biouhel z drůbeží podestýlky má podobné účinky jako hnojivo s pomalým uvolňováním. To vše díky vysokému obsahu popela a vysokému poměru molárního vodíku a uhlíku ve srovnání s jiným zeleným odpadem (Bai et al. 2015). Výsledky jiné studie při aplikaci biouhlu z rýžových slupek na červených jílovitých alkalických půdách ukázaly pozitivní účinky aplikovaného biouhlu na pH půdy, vlhkost a aktivitu fosfatázy. Nejvýznamnější vliv biouhlu byl na složení bakteriálního společenství, především bakterií, které solubilizují fosfáty (PSB – phosphate solubilizing bacteria), konkrétně *Thiobacillus*, *Pseudomonas* a *Flavobacterium*. Toto zjištění poskytlo nový významný úhel pro následující studium účinků biouhlu na dostupnost půdního fosforu (Liu et al. 2017).

Obecně je biouhel neboli agrichar vnímán jako cenný zdroj s obrovským potenciálem využití, ale ještě je potřeba dalších zkoumání z hlediska jeho efektivního využití, struktury, vlastností a dalších způsobů, kterými ho lze modifikovat (Qian et al. 2015).

3.4.2.5 Šlechtění rostlin

Fosfor patří mezi nejdůležitější makroživiny pro růst a vývoj rostlin. Pro procesy klíčení semen, kvetení a tvorby plodů je naprosto nezbytný. Fosfor je součástí buněčných membrán v rámci fosfolipidů a má důležitou roli v buněčných procesech, účastní se přenosu energie, fotosyntézy, metabolismu, vnitrobuněčné signalizace, replikace a exprese (Ceasar et al. 2014).

Přibližně na 5,7 miliardách hektarech zemědělských půd na celém světě chybí anorganický fosfát (Pi), jež je rostlinou absorbován z půdního roztoku (Batjes 1997). Tento stav může vést ke snížené produkci a následnému nedostatku potravin (Childers et al. 2011). Intenzivní zemědělské praktiky vedou ke snižování hladiny dostupného anorganického fosfátu, což směřuje agronomy, technology a zejména šlechtitele rostlin k vývoji nových plodin a jejich odrůd, které se budou schopné přizpůsobit půdám s nižším obsahem fosforu. Pro zvýšení efektivity využívání přijatého fosforu pěstovanými plodinami je zapotřebí moderních šlechtitelských nástrojů, které vývoj nových odrůd umožní (Veneklaas et al. 2012).

Mezi moderní strategie získávání a následného využívání fosforu zahrnujeme jak tradiční přístupy šlechtění, tak i transgenní technologie. V reakci na nedostatek fosforu se spouští molekulární procesy, které přispívají k biochemickým změnám, jež usnadňují uchování či získávání fosforu. Do reakce rostlin na stres z nedostatku fosforu může být začleněno i více než 100 genů. Předpokládá se, že jsou tyto geny koordinovaně exprimovány, jsou součástí jednoho společného regulačního systému, a jejich reakce na nedostatek fosforu probíhá synchronně (Raghothama 1999).

Rostliny získávají fosfor z rhizosféry, ten se pak v rostlině mobilizuje pro následnou produkci biomasy. Tento aspekt je velice důležitý a označuje se jako PUE neboli účinnost využití fosforu (Wiel et al. 2016). Jedná se o komplexní vlastnost s velkým množstvím potenciálních interakcí spolu s jinými faktory, kam patří energetická bilance či účinnost využití vody, které ovlivňují výnos plodin (Jin et al. 2005). Účinná mobilizace fosforu v rostlině je tedy naprosto stěžejní. Například recyklaci fosforu ze stárnuoucích rostlinných částí do těch aktivně rostoucích či při přebytku metabolických potřeb v cytoplazmě se uplatňují vakuoly pro znovuvyužití fosfátu, které mají schopnost tlumit změny pH při ukládání fosforu (Wiel et al. 2016). Další strategií pro vnitřní PUE je například přizpůsobení metabolismu rostliny nižším požadavkům na příjem fosforu. Jedním ze způsobů, jak toho dosáhnout je nahrazením sulfo- či galakto- lipidů v membránách (Lambers et al. 2012).

Mezi některé vlastnosti PUE patří fyziologické (exsudáty kyselin a fosfatáz z kořene) a stavební (především u kořene) rysy. Již existují zprávy i o nových odrůdách se zvýšenou PUE u bobu a sóji, jež jsou zaměřené především na ty kořenové rysy, které zajišťují v tropických a subtropických oblastech fixovat fosfor z půd (Wang et al. 2010). Mezi nejhlavnější aspekty kořenů patří především jejich počet (větší množství kořenů se nachází ve svrchních vrstvách půd), samotná morfologie a lokalizace postranních kořenů, dále pak délka a hustota kořenových vlásků, které své uplatnění nacházejí zejména při vstřebávání fosforu z půdy. Pro pochopení příjmu živin z půdy jsou důležité kvalitní hloubkové studie kořenového systému. Vlastnosti jako gravitropismus bazálních kořenů, laterální větvení a tvorba adventivních kořenů pod genetickou kontrolou jsou a pro získávání fosforu z neúrodných nebo méně úrodných půd zcela zásadní, jelikož zvyšují možnosti získání živin z ornice. Například u fazolu obecného byly objeveny některé lokusy, které ovlivňují kvantitativní znaky (QTL, zejména ty užitkové) pro

nízkou toleranci k nedostatku P. QTL je oblast v genomu (lokus, úsek DNA), jež zodpovídá za variabilitu konkrétního kvantitativního znaku. Tyto vlastnosti je možné využít jako selekční kritéria pro šlechtění odrůd (Lynch 2007). Předpokládá se, že s identifikací genů, jež se podílejí na reakci na nízkou hladinu fosforu, se usnadní hledání kandidátních genů v rámci QTL (Yuan & Liu 2008).

Zvýšeným růstem kořenů dochází k získávání většího množství fosforu na jednotku délky kořene. K dosažení těchto vlastností lze využít tři strategie, které se opírají o 1) molekulární šlechtění, 2) využití transgenních látek a 3) použití modernějších zemědělských postupů. Molekulární šlechtění vychází z informací, že je v současné době u některých plodin známá poměrně vysoká tolerance k nedostatku fosforu. Tato variabilita poskytuje nové zdroje pro vývoj kultivarů, jež mají větší výnos v podmínkách s nedostatkem fosforu a vynikají i lepšími osvojovacími schopnostmi (Zhang 2007).

Druhou zmíněnou strategií je vývoj transgenních rostlin. Již bylo učiněno několik experimentů, které měly za cíl zlepšit získávání fosforu pomocí genového inženýrství prostřednictvím specifických bakteriálních, houbových či rostlinných genů, které rozpouštění fosforu v půdě podporují. Navzdory pozitivním výsledkům v provedených experimentech dosud nebyly povoleny žádné transgenní linie, které by se daly využít i v komerčním pěstování. Genové inženýrství je nadále vnímáno jako kontroverzní společenská záležitost se silnou regulační kontrolou. Vzhledem k tomu, že jsou odrůdy rostlin velice variabilní a každá má jiné genetické pozadí s rozdílnou reakcí na snížené množství fosforu v půdách, by přenos jednoho genu na nejednotné pozadí mohl přinést odlišné výsledky (Ramaekers et al. 2010).

Další cestou, jak lze řídit a zamezit nadměrným ztrátám živin je prostřednictvím arbuskulárních mykorhizních hub nebo mykorhizou. Arbuskulární mykorhizu (AM) využívá asi 70–90 % druhů suchozemských rostlin a pravděpodobně se tak jedná o nejrozšířenější suchozemskou symbiózu (Parniske 2008). Je založena na vzájemné výměně látek mezi rostlinou a houbou. Houbový symbiont rostlině dodává fosfor a jiné živiny a na oplátku získává redukováný uhlík (Jacobsen et al. 2005) Množství přijatého fosforu v kořenech kolonizovaných mykorhizními houbami může být 3–5krát vyšší než v kořenech nemykorhizních (Smith & Read 1997). Arbuskulární mykorhizní houby mají mnoho přínosů, z nichž nejvýznamnějším je schopnost zvýšeného příjmu imobilních živin, především fosforu tím, že prorůstají velký objem půd šířením svých hyf, zejména pak v půdách s nižším obsahem fosforu a mimo zónu čerpání fosforu. Jedná se o jednu z mála příliš nevyužívaných možností, jak lze snižovat používání fosforečných hnojiv a zlepšovat tak udržitelnost zemědělství (Zhang et al. 2018). V řadě studií byly při nízkých hladinách dostupného fosforu zaznamenány značné rozdíly mezi inbredními liniemi kukuřice v reakci na mykorhizu (zvýšení růstu po inokulaci mykorhizou). Genotypy s nízkou hmotností sušiny výhonů vykazovaly větší růstový přírůstek v porovnání s genotypy s vyšší hmotností sušiny výhonů. Ještě je potřeba provést více studií, které se zaměří na genotypové variability v rozdílných podmínkách výživy fosforem a reakce mykorhizy (Kaeppler et al. 2000). Jedná se tedy o možnou cestu, jak zlepšit mykorhizní způsob získávání fosforu. Je však ještě zapotřebí dalších výzkumů v oblasti symbiotických interakcí. Studium genotypové variability rostlin ohledně reaktivity na mykorhizu a následného získávání fosforu prostřednictvím mykorhizního vztahu, by mohlo poskytnout základ pro šlechtění nebo zpracování plodin s vyšší schopností reakce na mykorhizu a vyšším získáváním fosforu touto cestou (Ramaekers et al. 2010).

Pro snížení závislosti na fosforečných hnojivech je třeba uvažovat i o možnostech zvýšení vnitřní účinnosti využívání fosforu rostlinami (PUE). Rostliny, které mají vyšší účinnost využití fosforu, vynikají vyšším růstem při stejném množství přijatého fosforu. Toho lze při nízkém obsahu fosforu dosáhnout přepnutím na glykolytické cesty či mitochondriálním dýcháním. Těmito alternativními cestami lze obejít kroky, pro které je potřeba fosfor a ATP (Vance et al. 2003). Šlechtitelské pokusy se soustředí zejména na vývoj rozsáhlejších kořenových systémů u plodin pro zvýšení schopnosti konkurovat o živiny (Malamy 2005).

4 Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo vytvořit prostřednictvím literární rešerše ucelený přehled ohledně současných možností výživy a hnojení rostlin fosforem. Práce je nejprve zaměřena na stručný popis fosforu jako prvku, jeho chování v půdě i v rostlině, způsoby příjmu rostlinami a zejména pak na výživu rostlin fosforem – počínaje běžnou výživou až po moderní trendy ve výživě a hnojení.

Jedním z aktuálních trendů je **technologie precizního zemědělství**. V tomto odvětví je velká snaha vyvíjet nové systémy pro efektivnější využití půdy a fosforečných hnojiv – toho lze docílit různými způsoby. Například mořením osiva pšenice P-hnojiv, nebo aplikací fosforu pod patu. Dalším ze zmíněných způsobů, jak snižovat spotřebu P-hnojiv a zvyšovat jejich efektivitu je pomocí injektaže s využitím přesných systémů GPS. Ve výsledku lze konstatovat, že používáním větší přesnosti při aplikaci fosforečných hnojiv je možné zmírňovat zatížení fosforem, a zároveň tato aplikace povede k omezení nákladů na hnojení P.

Dle řady studií se využívání **odpadních materiálů** jeví jako vhodná alternativa minerálních fosforečných hnojiv. V mnoha výzkumech se čistírenský kal ukázal být významným potenciálním zdrojem fosforu obsahujícím dále vysoce koncentrované organické i anorganické látky, mikroorganismy a enzymy. Čistírenský kal se na základě mnoha studií ukázal jako významný sekundární potenciální zdroj fosforu a vzhledem k hrozícímu nedostatku apatitových minerálů se předpokládá, že bude i nadále nabývat na významu. Kaly mají i svou stinnou stránku, jelikož obsahují nemalé množství nebezpečných znečišťujících látek, zejména aromatických uhlovodíků a těžkých kovů.

Jako vhodný nástroj pro zpřístupnění živin pro rostliny se využívají **biostimulanty**. Z použité literatury vyplývá, že dosavadní výsledky jsou nejednotné. V mnoha nádobových pokusech, sklenicích a laboratorních testech bylo dosahováno pozitivních výsledků, a byl zdůrazňován jejich velký potenciál. Naopak v provozních podmínkách, při vystavení přirozeným vlivům okolního prostředí, nebyl jejich pozitivní vliv vysloveně prokázán. Z toho důvodu je třeba provádět i nadále výzkumy, které přinesou nové poznatky.

Bylo prokázáno, že **biouhel** účinkuje jako účinný sorbent pro různé chemické látky, včetně fosforu. Dle mnoha zdrojů byl biouhel vnímán jako cenný zdroj s velkým potenciálem využití i pro doplnění fosforečných konvenčních hnojiv. Nejvýznamnější účinek biouhlu byl zaznamenán v ovlivnění složení bakteriálního společenství, což poskytlo nový významný směr pro následující studium jeho účinků na dostupnost půdního fosforu.

Velký potenciál má využití **moderních šlechtitelských metod**, které by zvyšovaly schopnost rostlin využít fosfor pro svůj příznivý růst a vývoj a eliminovala by se tak závislost na neobnovitelných zdrojích.

Pozitivních výsledků lze dosáhnout především kombinací předchozích strategií. Nejefektivněji se jeví cesta vyšlechtění vhodné odrůdy s lepší osvojovací schopností příjmu fosforu a následně využívání technologií precizního zemědělství a aplikací odpadních materiálů s obtížně přístupným P spolu s biostimulanty.

Ačkoliv již existuje mnoho studií, které se zabývají problematikou fosforu, je třeba dalších nových výzkumů, které se zaměří na danou problematiku o něco hlouběji – zejména na možnosti, jak lze předcházet negativním vlivům u jednotlivých aktuálních trendů ve výživě rostlin fosforem.

5 Seznam literatury

Abdala DB, Silva IR, Vergütz L, Sparks DL. 2015. Long-term manure application effects on phosphorus speciation, kinetics and distribution in highly weathered agricultural soils. *Chemosphere* **119**:504–514.

Acevedo B, Camina C, Corona JE, Borrás L, Barat R. 2015. The metabolic versatility of PAOs as an opportunity to obtain a highly p–enriched stream for further p–recovery. *Chemical Engineering Journal* **270**:459–467.

Amadou I, Faucon MP, Houben D. 2022. Role of Soil Minerals on Organic Phosphorus Availability and Phosphorus Uptake by Plants. *Research Square*
DOI: 10.21203/rs.3.rs-1310515/v1

Assis MR, Brancheriau L, Napoli A, Trugilho PF. 2016. Factors affecting the mechanics of carbonized wood: literature review. *Wood Science and Technology* **50**:519–536.

Atienza–Martínez M, Gea G, Arauzo J, Kersten SRA, Kootstra AMJ. 2014. Phosphorus recover from sewage sludge char ash. *Biomass and Bioenergy* **65**:42–50.

Aziz A, Sabir M, Farooq M, Maqsood MA, Ahmad HR. 2013. Phosphorus Deficiency in Plants: Responses, Adaptive Mechanisms, and Signaling. Springer, Indie.
DOI:10.1007/978-81-322-1542-4-7

Bai SH, Xu CY, Xu Z, Blumfield TJ, Zhao H, Wallace H, Reverchon F, Zwieten LV. 2015. Soil and foliar nutrient and nitrogen isotope composition ($\delta^{15}\text{N}$) at 5 years after poultry litter and green waste biochar amendment in a macadamia orchard. *Environmental Science and Pollution Research* **22**:3803–3809.

Balík J, Kulháněk M, Černý J, Vaněk V. 2008. Racionální použití hnojiv. Česká zemědělská univerzita, Praha.

Barber SA. 1995. Soil nutrient bioavailability. Wiley, New York.

Barnett GM. 1994. Phosphorus forms in animal manure. *Bioresource Technology* **49**:139–147.

Batjes NH. 1997. A world data set of derived soil properties by FAO-UNESCO soil unit for global modelling. *Soil Use and Management* **13**:9–16.

Battacharyya D, Babgohari MZ, Rathor P, Prithiviraj B. 2015. Seaweed extracts as biostimulants in horticulture. *Scientia Horticulturae* **196**:39–48.

Biswas BK, Inoue K, Harada H, Ohto K, Kawakita H. 2009. Leaching of phosphorus from incinerated sewage sludge ash by means of acid extraction followed by adsorption on orange waste gel. *Journal of Environmental Sciences* **21**:1753–1760.

Blevins DG. 1999. Why Plants Need Phosphorus. *Better Crops* **83**:29–30.

- Blöcher Ch, Niewersch C, Melin T. 2012. Phosphorus recovery from sewage sludge with a hybrid process of low pressure wet oxidation and nanofiltration. *Water Research* **46**:2009–2019.
- Brezak-Mazur E, Stoińska R. 2013. The importance of phosphorus in the environment – review article. *Archives of Waste Management and Environmental Protection, Polsko*.
- Bridgwater AV, Meier D, Radlein D. 1999. An overview of fast pyrolysis of biomass. *Organic Geochemistry* **30**:1479–1493.
- Bulgari R, Cocetta G, Trivellini A, Vernieri P, Ferrante A. 2014. Biostimulants and crop responses: a review. *Biological Agriculture & Horticulture* **31**:1–17.
- Calvo P, Nelson L, Kloepper JW. 2014. Agricultural uses of plant biostimulants. *Plant and Soil* **383**:3–41.
- Cameron KC, Di HJ, McLaren RG. 1997. Is soil an appropriate dumping ground for our wastes? *Australian Journal of Soil Research* **35**:995–1036.
- Castiglione AM, Mannino G, Contartese V, Berteà CM, Ertani A. 2021. Microbial Biostimulants as Response to Modern Agriculture Needs: Composition, Role and Application of These Innovative Products. *Plants* **10**:1533.
- Cesar A, Hodge A, Baker A, Baldwin SA. 2014. Phosphate Concentration and Arbuscular Mycorrhizal Colonisation Influence the Growth, Yield and Expression of Twelve PHT1 Family Phosphate Transporters in Foxtail Millet (*Setaria Italica*). *PLoS One* **9**:1–12.
- Čermák P, Mühlbachová G, Káš M, Pechová M, Lošák T, Hlušek J, Kulhánek M, Sedlář O, Balík J. 2018. Metodický postup pro optimalizaci hnojení fosforem na zemědělských půdách, včetně půd karbonátových. Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i., Praha.
- Čermák P, Mühlbachová G, Lošák T, Hlušek J. 2019. Aktualizovaná kritéria hodnocení obsahu přístupného fosforu na karbonátových půdách pro harmonickou výživu rostlin. Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i., Praha.
- Černý J, Balík J, Kulhánek M, Časová K, Nedvěd V. 2010. Mineral and organic fertilization efficiency in long-term stationary experiments. *Plant Soil and Environment* **56**:28–36.
- Cerozi BS, Fitzsimmons K. 2016. The effect of pH on phosphorus availability and speciation in an aquaponics nutrient solution. *Bioresource Technology* **219**:778–781.
- Ch'ng HY, Ahmed OH, Majid NMA. 2014. Improving Phosphorus Availability in an Acid Soil Using Organic Amendments Produced from Agroindustrial Wastes. *The Scientific World Journal* (e506356) DOI: 10.1155/2014/506356.
- Chen B, Zhou D, Zhu L. 2008. Transitional Adsorption and Partition of Nonpolar and Polar Aromatic Contaminants by Biochars of Pine Needles with Different Pyrolytic Temperatures. *Environmental Science & Technology* **42**:5137–5143.

- Childers D, Corman J, Edwards M, Elser J. 2011. Sustainability challenges of phosphorus and food: solutions from closing the human phosphorus cycle. *Bio Science* **61**:117–124.
- Chintala R, Schumacher TE, McDonald LM, Clay DE, Malo DD, Papiernik SK, Clay SA, Julson JL. 2013. Phosphorus Sorption and Availability from Biochars and Soil/Biochar Mixtures. *CLEAN – Soil, Air, Water* **42**:626–634.
- Cieślik B, Konieczka P. 2017. A review of phosphorus recovery methods at various steps of wastewater treatment and sewage sludge management. The concept of “no solid waste generation” and analytical methods. *Journal of Cleaner Production* **142**:1728–1740.
- Cieślik MB, Namieśnik J, Konieczka P. 2015. Review of sewage sludge management: standards, regulations and analytical methods. *Journal of Cleaner Production* **90**:1–15.
- Coker EG, Carlton-Smith CH. 1986. Phosphorus in sewage sludges as a fertilizer. *Waste Management & Research* **4**:303–319.
- Corbridge DEC. 2013. *Phosphorus: chemistry, biochemistry and technology*. CRC Press, Florida.
- Cordell D, Drangert JO, White S. 2009. The story of phosphorus: Global food security and food for thought. *Global Environmental Change* **19**:292–305.
- Cordell D, Rosemarin A, Schroder JJ, Smit AL. 2011. Towards global phosphorus security: a systems framework for phosphorus recovery and reuse options. *Chemosphere* **84**:747–758.
- Cornel P, Schaum C. 2009. Phosphorus recovery from wastewater: needs, technologies and costs. *Water Science and Technology* **59**:1069–1076.
- DeLuca JO, Gundale MJ, MacKenzie MD, Jones DL. *Biochar effects on soil nutrient transformations*. Routledge, New York.
- Demirbas MF, Balat M, Balat H. 2009. Potential contribution of biomass to the sustainable energy development. *Energy Conversion and Management* **50**:1746–1760.
- Dey R, Pal KK, Bhatt DM, Chauhan SM. 2004. Growth promotion and yield enhancement of peanut (*Arachis hypogaea* L.) by application of plant growth-promoting rhizobacteria. *Microbial Research* **159**:371–394.
- Dobermann A, Cassman KG, Mamaril CP, Sheehy JE. 1998. Management of phosphorus, potassium, and sulfur in intensive, irrigated lowland rice. *Field Crops Research* **56**:113–138.
- Du Jardin. 2015. Plant biostimulants: Definition, concept, main categories and regulation. *Scientia Horticulturae* **196**:3–14.
- Dume B, Ayele D, Regassa A, Berecha G. 2015. Improving available phosphorus in acidic soil using biochar. *Journal of Soil Science and Environmental Management* **8**:87–94.

- Eduah JO, Nartey EK, Abekoe MK, Breuning-Madsen H, Andersen MN. 2019. Phosphorus retention and availability in three contrasting soils amended with rice husk and corn cob biochar at varying pyrolysis temperatures. *Geoderma* **341**:10–17.
- Ekholm P, Turtola E, Grönroos J, Seuri P, Ylivainio K. 2005. Phosphorus loss from different farming systems estimated from soil surface phosphorus balance. *Agriculture, Ecosystems & Environment* **110**:266–278.
- Etiégni L, Campbell AG. 1991. Physical and chemical characteristics of wood ash. *Bioresource Technology* **37**:173–178.
- Fecenko J, Ložek O. 2000. Výživa a hnojenie pol'ných plodín. Slovenská pol'nohospodárska univerzita, Nitra.
- Geudes P, Couto N, Ottosen LM, Ribeiro AB. 2014. Phosphorus recovery from sewage sludge ash through an electro-dialytic process. *Waste Management* **34**:886–892.
- Ghosh S, Wilson B, Ghoshal S, Senapati N, Mandal B. 2012. Organic amendments influence soil quality and carbon sequestration in the Indo-Gangetic plains of India. *Agriculture, Ecosystems & Environment* **156**:134–141.
- Gichangi EM, Mnkeni PNS, Brookes PC. 2009. Effects of goat manure and inorganic phosphate addition on soil inorganic and microbial biomass phosphorus fractions under laboratory incubation conditions. *Soil Science and Plant Nutrition* **55**:764–771.
- Glaser B, Lehr VI. 2019. Biochar effects on phosphorus availability in agricultural soils: A meta-analysis. *Scientific Reports* **9** (e9338) DOI: 10.1038/s41598-019-45693-z.
- Guppy CN, Menzies NW, Moody PW, Blamey FPC. 2005. Competitive sorption recreations between phosphorus and organic matter in soil: a review. *Australian Journal of Soil Research* **43**:189–202.
- Halpern M, Bar-Tal A, Ofek M, Minz D, Muller T, Yermiyahu U. 2015. Chapter Two – The Use of Biostimulants for Enhancing Nutrient Uptake. *Advances in Agronomy* **130**:141–174.
- Hamza BB, Suggars A. 2001. A Biostimulants: Myths and Realities. *TurfGrass Trends* **8**:6–10.
- Harrison MJ, Dewbre GR, Liu J. 2002. A phosphate transporter from *Medicago truncatula* involved in the acquisition of phosphate released by arbuscular mycorrhizal fungi. *Plant Cell* **14**:13–24.
- Havukainen J, Nguyen MT, Hermann L, Horttanainen M, Mikkilä M, Deviatkin I, Linnanen L. 2016. Potential of phosphorus recovery from sewage sludge and manure ash by thermochemical treatment. *Waste Management* **49**:221–229.
- Holford ICT. 1997. Soil phosphorus: its measurement, and its uptake by plants. *Australian Journal of Soil Research* **35**:227–240.

Hooda PS, Truesdale VW, Edwards AC, Withers PJA, Aitken MN, Miller A, Rendell AR. 2001. Manuring and fertilization effects on phosphorus accumulation in soils and potential environmental implications. *Advances in Environmental Research* **5**:13–21.

Hopkins B, Hansen NC. 2019. Phosphorus Management in High-Yield Systems. *Journal of Environmental Quality* **48**:12665–1280.

Horta C. Fertilisation with Compost: Effects on Soil Phosphorus Sorption and on Phosphorus Availability in Acid Soils. *Open Journal of Soil Science* **9**:255–268.

Huang J, Xu Ch, Ridoutt BG, Wang X, Ren P. 2017. Nitrogen and phosphorus losses and eutrophication potential associated with fertilizer application to cropland in China. *Journal of Cleaner Production* **159**:171–179.

Iho A, Laukkanen M. 2012. Precision phosphorus management and agricultural phosphorus loading. *Ecological Economics* **77**:91–102.

Islam T, Hossain M. 2012. Plant Probiotics in Phosphorus Nutrition in Crops, with Special Reference to Rice. *Plant probiotics*.

Ivanič J, Havelka B, Knop K. 1984. *Výživa a hnojenie rastlín. Príroda, Bratislava.*

Jacobsen I, Leggett ME, Richardson AE. 2005. Rhizosphere Microorganisms and Plant Phosphorus Uptake. *Phosphorus Agriculture and the Environment* **46**:437–494.

Jasinski SM. 2013. Phosphate rock. In U.S. Geological Survey (ed.) *Mineral. Yearbook*, U.S. Government Publishing Office, Washington DC, USA.

Jin J, Wang G, Liu X, Pan X, Herbert SJ. 2005. Phosphorus Application Affects the Soybean Root Response to Water Deficit at the Initial Flowering and Full Pod Stages. *Soil Science and Plant Nutrition* **51**:953–960.

Johnston AE. 2000. *Soil and Plant Phosphate*. International Fertilizer Industry Association, Paris.

Kaeppler SM, Parke JL, Mueller SM, Senior L, Stuber C, Tracy WF. 2000. Variation among Maize Inbred Lines and Detection of Quantitative Trait Loci for Growth at Low Phosphorus and Responsiveness to Arbuscular Mycorrhizal Fungi. *Crop Breeding, Genetics & Cytology* **40**:358–364.

Karunanithi R, Szogi A, Bolan N, Naidu R, Loganathan P, Hunt PG, Vanotti MB, Saint CP, Ok YS, Krishnamoorthy S. 2015. Chapter Three – Phosphorus Recovery and Reuse from Waste Streams. *Advances in Agronomy* **131**:173–250.

Kloepper JW, Lifshitz R, Zablotowicz RM. 1989. Free-living bacterial inocula for enhancing crop productivity. *Trends in Biotechnology* **7**:39–44.

Kumar K, Goh KM. 1999. Crop Residues and Management Practices: Effects on Soil Quality, Soil Nitrogen Dynamics, Crop Yield, and Nitrogen Recovery. *Advances in Agronomy* **68**:197–319.

- Kunicki E, Grabowska A, Sekara A, Wojciechowska R. 2010. The effect of cultivar type, time of cultivation, and biostimulant treatment on the yield of spinach (*Spinacia oleracea* L). *Folia Horticulture* **22**:9–13.
- Kunzová E. 2009. Výživa rostlin a hnojení fosforem. Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i., Praha.
- Lal R, Stewart BA. 2015. *Soil-Specific Farming: Precision Agriculture*. CRC Press. Boca Raton, Florida, USA.
- Lambers H, Cawthray GR, Giavalisco P, Kuo J, Laliberté E, Pearse SJ, Scheible WR, Stitt M, Teste F, Turner BL. 2012. Proteaceae from severely phosphorus-improverished soils extensively replace phospholipids with galactolipids and sulfolipids during leaf development to achieve a high photosynthetic phosphorus-use-efficiency. *New Phytologist* **196**:1098–1108.
- Lata Verma S, Marschner P. 2013. Compost effects on microbial biomass and soil P pools as affected by particle size and soil properties. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* **13**:313–328.
- Lehmann J, Joseph S. 2009. *Biochar for Environmental management: Science and Technology*. Earthscan, London.
- Lehmann J, Rondon M, Greenwood J. 2012. Slash-and-char: a feasible alternative for soil fertility management in the Central Amazon? Cornell University, USA.
- Levine JSE. 1991. *Global Biomass Burning: Atmospheric Climatic and Biospheric Implications*. The MIT Press, Cambridge.
- Li R, Yin J, Wang W, Li Y, Zhang Z. 2014. Transformation of phosphorus during drying and roasting of sewage sludge. *Waste Management* **34**:1211–1216.
- Liu S, Meng J, Jiang L, Yang X, Lan Y, Cheng X, Chen W. 2017. Rice husk biochar impacts soil phosphorus availability, phosphatase activities and bacterial community characteristics in three different soil types. *Applied Soil Ecology* **116**:12–22.
- Lucas V, Ryant P, Neudert L, Dryšlová T, Gnip P, Smutný V. 2012. Stanovení a optimalizace diferencovaných dávek dusíkatých hnojiv v precizním zemědělství. Mendelova univerzita v Brně, Brno.
- Lynch JP. 2007. Roots of the second green revolution. *Australian Journal of Botany* **55**:493–512.
- MacDonald GK, Benerr EM, Potter PA, Ramankutty N. 2011. Agronomic phosphorus imbalances across the world's croplands. *Proc. Natl. Acad. Sci* **108**:3086–3091.
- Malamy JE. 2005. Intrinsic and environmental response pathways that regulate root system architecture. *Plant, Cell & Environment* **28**:67–77.

Mallarino AP, Schepers JS. 2005. Role of Precision Agriculture in Phosphorus Management Practices. *Agronomy Monographs* **27** <https://doi.org/10.2134/agronmonogr46.c27>.

Mandal A, Patra AK, Singh D, Swarup A, Ebhin Masto R. 2007. Effect of long-term application of manure and fertilizer on biological and biochemical activities in soil during crop development stages. *Bioresource Technology* **98**:3585–3592.

Mbagwu JS, Piccolo A. 1997. Effects of Humic Substances from Oxidized Coal on Soil Chemical Properties and Maize Yield. Polish Society of Humic Substances, Poland.

Mbagwu JSC, Piccolo A, Spallacci P. 1991. Effects of field applications of organic wastes from different sources on chemical, rheological and structural properties of some Italian surface soils. *Bioresource Technology* **37**:71–78.

Mehmood A, Akhtar MS, Imran M, Rukh S. 2018. Soil apatite loss rate across different parent materials. *Geoderma* **310**:218–229.

Mikanová O, Šimon T. 2011. Alternativní výživa rostlin fosforem. Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i., Praha.

Montag D, Gethke K, Pinnekamp J. 2007. A feasible approach of integrating phosphate recovery as struvite at waste water treatment plants. Institute of Environmental Engineering, Germany.

Naidu R, Lamb D, Bolan N, Gawandar J. 2012. Recovery and reuse of phosphorus from wastewater sources. *Occasional Report* **25**.

Neudert L, Širůček P, Lucas V. 2018. Optimalizace intenzity hnojení ječmene jarního ve vztahu ke zjištěné úrovni heterogenity pozemků. Mendelova univerzita v Brně, Brno.

Noack SR, McLaughlin MJ, Smernik RJ, McBeath TM, Armstrong RD. 2012. Crop residue phosphorus: speciation and potential bioavailability. *Plant and Soil* **359**:375–385.

Nweke IA. 2018. Contrasting tillage systems and wood ash effect on soil chemical properties. *British Journal of Environmental Sciences* **7**:8–25.

Oenema O, Chardon W, Ehlert P, Dijk K, Schoumans O, Rulkens W. 2012. Phosphorus fertilisers from by-products and wastes. The International Fertilizer Society, UK.

Parniske M. 2008. Arbuscular mycorrhiza: the mother of plant root endosymbiosis. *Nature Reviews Microbiology* **6**:763–775.

Partanen K, Siljander-Rasi H, Karhapää, Ylivainio K, Tupasela T. 2010. Responses of growing pigs to different levels of dietary phosphorus-performance, bone characteristics, and solubility of facial phosphorus. *Livestock Science* **134**:109–112.

Prasad R, Chakraborty D. 2019. Phosphorus Basics: Understanding Phosphorus Forms and Their Cycling in the Soil. Available from https://www.aces.edu/wp-content/uploads/2019/04/ANR-2535-Phosphorus-Basics_041719L.pdf (Accessed April 2022).

- Preston CL, Ruiz Diaz DA, Mengel DB. 2019. Corn response to long-term phosphorus fertilizer application rate and placement with strip-tillage. *Agronomy Journal* **111**:841–850.
- Preuss CP, Huang CY, Gilliam M, Tyerman SD. 2010. Channel-like characteristics of the low-affinity barley phosphate transporter PHT1;6 when expressed in *Xenopus* oocytes. *Plant Physiol* **152**:1431–1441.
- Qian K, Kumar A, Zhang H, Bellmer D, Huhnke R. 2015. Recent advances in utilization of biochar. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **42**:1055–1064.
- Qian K, Kumar A, Zhang H, Bellmer D, Huhnke R. 2015. Recent advances in utilization of biochar. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **42**:1055–1064.
- Rafique M, Ortas I, Rizwan M, Chaudhary HJ, Gurmani AR, Munis MFH. 2020. Residual effects of biochar and phosphorus on growth and nutrient accumulation by maize (*Zea mays* L.) amended with microbes in texturally different soils. *Chemosphere* 238 (e124710) DOI: 10.1016/j.chemosphere.2019.124710.
- Raghothama KG. 1999. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology. Phosphate Acquisition **50**:665–693.
- Ramaekers L, Remans R, Rao IM, Blair MW, Vanderleyden J. 2010. Strategies for improving phosphorus acquisition efficiency of crop plants. *Field Crops Research* **117**:169–176.
- Rausch C, Bucher M. 2002. Molecular mechanisms of phosphate transport in plants. *Planta* **216**:23–37.
- Rodriguez H, Vidal RF. 1999. Phosphate solubilizing bacteria and their role in plant growth promotion. *Biotechnology Advances* **17**:319–339.
- Römer W, Steingrobe B. 2018. Fertilizer Effect of Phosphorus Recycling Products. Sustainability.
- Rouphael Y, Franken P, Schneider C, Schwarz D, Giovannetti M, Agnolucci M, Pascale SD, Bonini P, Colla G. 2015. Arbuscular mycorrhizal fungi act as biostimulants in horticultural crops. *Scientia Horticulturae* **196**:91–108.
- Ruttenberg KC. 2003. The Global Phosphorus Cycle. *Treatise on Geochemistry* **8**:585–643.
- Ruzzi M, Aroca R. 2015. Plant growth-promoting rhizobacteria act as biostimulants in horticulture. *Scientia Horticulturae* **196**:124–134.
- Saarsalmi A, Smolander A, Kukkola M, Moilanen M, Saramäki. 2012. 30-Year effects of wood ash and nitrogen fertilization on soil chemical properties, soil microbial processes and stand growth in a Scots pine stand. *Forest Ecology and Management* **278**:63–70.
- Schachtman DP, Reid RJ, Ayling SM. 1998. Phosphorus Uptake by Plants: From Soil to Cell. *Plant Physiology* **116**:447–453.

Schoumans OF, Bouraoui F, Kabbe Ch, Oenema O, Dijk KC. 2015. Phosphorus management in Europe in a changing world. *AMBIO* **44**:180–192.

Sekiya N, Yano K. 2010. Seed P-enrichment as an effective P supply to wheat. *Plant and Soil* **327**:347–354.

Sharma HSS, Fleming C, Selby C, Rao JR, Martin T. 2014. Plant biostimulants: a review on the processing of macroalgae and use of extracts for crop management to reduce abiotic and biotic stresses. *Journal of Applied Phycology* **26**:465–490.

Sharpley AN, Foy B, Withers P. 2000. Practical and innovative measures for the control of agricultural phosphorus losses to water: an overview. *Journal of Environmental Quality* **29**:1–9.

Sharpley AN, Chapra SC, Wedepohl R, Sims JT, Daniel TC, Reddy KR. 1994. Managing agricultural phosphorus for protection of surface waters: Issues and options. *J. Environ. Qual.* **23**:437–451.

Shen J, Yuan L, Zhang J, Li H, Bai Z, Chen X, Zhang F. 2011. Phosphorus Dynamics: From Soil to Plant. *Plant Physiology* **156**:997–1005.

Simpson RJ, Oberson A, Culvenor RA, Ryan MH, Veneklaas EJ, Lambers H, Lynch JP, Ryan PR, Delhaize E, Smith FA. 2011. Strategies and agronomic interventions to improve the phosphorus-use efficiency of farming systems. *Plant Soil* **349**:89–120.

Sims JT. 1993. Environmental soil testing for phosphorus. *Journal of Agricultural Production* **6**:501–507.

Smith KA, Chalmers AG, Chambers BJ, Christie P. 1998. Organic manure phosphorus accumulation, mobility and management. *Soil Use Manage* **14**:160–167.

Smith SE, Jakobsen I, Grønlund M, Smith A. 2011. Roles of Arbuscular Mycorrhizas in Plant Phosphorus Nutrition: Interactions between Pathways of Phosphorus Uptake in Arbuscular Mycorrhizal Roots Have Important Implications for Understanding and Manipulating Plant Phosphorus Acquisition. *Plant Physiology* **156**:1050–1057.

Smith SE, Read DJ. 1997. *Mycorrhizal Symbiosis*. Academic Press, New York.

Sorensen BL, Dall OL, Habib K. 2015. Environmental and resource implications of phosphorus recovery from waste activated sludge. *Waste Management* **45**:391–399.

Stevenson FJ, Cole MA. 1999. *Cycles of soil: carbon, nitrogen, phosphorus, sulfur, micronutrients*. Wiley, New York.

Suciu NA, Lamastra L, Trevisan M. 2015. PAHs content of sewage sludge in Europe and its use as soil fertilizer. *Waste Management* **41**:119–127.

Tarayre C, Clercq LD, Charlier R, Michels E, Meers E, Camargo-Valero M, Delvigne F. 2016. New perspectives for the design of sustainable bioprocesses for phosphorus recovery from waste. *Bioresource Technology* **206**:264–274.

- Toužín J. 2008. *Stručný přehled chemie prvků*. vyd. 1. Brno, Tribun EU.
- Traon D, Amat L, Zotz F, Jardin P. 2014. *A Legal Framework for Plant Biostimulants and Agronomic Fertiliser Additives in the EU*. Arcadia International, Belgium.
- Trippe KM, Manning VA, Reardon CL, Klein AM, Weidman C, Ducey TF, Novak JM, Watts DW, Rushmiller H, Spokas KA, Ippolito JA, Johnson MG. 2021. Phytostabilization of acidic mine tailings with biochar, biosolids, lime, and locally-sourced microbial inoculum: Do amendment mixtures influence plant growth, tailing chemistry, and microbial composition? *Applied Soil Ecology* 165 (e103962) DOI: 10.1016/j.apsoil.2021.103962.
- Troeh FR, Thompson LM. 2005. *Soils and soil fertility*, sixth edition. Blackwell Publishing Professional, Iowa, USA.
- Tryon EH. 1948. Effect of Charcoal on Certain Physical, Chemical, and Biological Properties of Forest Soils. *Ecological Monographs* **18**:81–115.
- Turner BL, Leytem AB. 2004. Phosphorus compounds in sequential extracts of animal manures: chemical speciation and a novel fractionation procedure. *Environmental science & technology* **38**:6101–6108.
- Vance CP, Uhde-Stone C, Allan DL. 2003. Phosphorus acquisition and use: critical adaptations by plants for securing a nonrenewable resource. *New Phytologist* **157**:423–447.
- Vaněk V, Balík J, Černý J, Pavlík M, Pavlíková D, Tlustoš P, Valtera J. 2012. *Výživa zahradních rostlin*. Academia, Praha.
- Vaněk V, Balík J, Pavlík M, Pavlíková D, Tlustoš P. 2016. *Výživa a hnojení polních plodin*. Profi Press, Praha.
- Veneklaas EJ, Lambers H, Bragg J, Finnegar PM, Lovelock CE, Plaxton WC, Price CA, Scheible WR, Shane MW, White PJ, Raven JA. 2012. Opportunities for improving phosphorus-use efficiency in crop plants. *New Phytologist* **195**:306–320.
- Verheijen F, Jeffery S, Bastos AC, van der Velde M, Diafas. 2010. *Biochar Application to Soils*. JRC Scientific and Technical Reports, Luxembourg.
- Verschaete W, Van de Caveye P, Diamantis V. 2009. Maximum use of resources present in domestic “used water”. *Bioresource Technology* **100**:5537–5545.
- Wagar 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 soil. *Canadian Journal of Soil Science* **66**: 237–248.
- Walsh CT. 2020. *The Chemical Biology of Phosphorus*. Royal Society of Chemistry, Cambridge.

Wang L, Wang X, Maimaitiaili B, Kafle A, Khan KS, Feng G. 2021. Breeding Practice Improves the Mycorrhizal Responsiveness of Cotton (*Gossypium* spp. L.). *Frontiers in Plant Science* (e780454) DOI: 10.3389/fpls.2021.780454.

Wang X, Yan X, Liao H. 2010. Genetic improvement for phosphorus efficiency in soybean: a radical approach. *Annals of Botany* **106**:215–222.

Weber K, Quicker P. 2018. Properties of biochar. *Fuel* **217**:240–261.

Wiel CC, Linden CG, Scholten OE. 2016. Improving phosphorus use efficiency in agriculture: opportunities for breeding. *Euphytica* **207**:1–22.

Withers PJA, Edwards AC, Foy B. 2006. Phosphorus cycling in UK agriculture and implications for phosphorus loss from soil. *Soil Use and Management* **17**:139–149.

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. *Environmental Science & Technology* **48**:6523–6530.

Yakhin OI, Lubyantsev AA, Yakhin IA, Brown PH. 2017. Biostimulants in Plant Science: A Global perspective. *Frontiers in Plant Science* <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.02049>

Yan X, Wang D, Zhang H, Zhang G, Wei Z. 2013. Organic amendments affect phosphorus sorption characteristics in a paddy soil. *Agriculture, Ecosystems & Environment* **175**:47–53.

Yuan H, Liu D. 2008. Signaling Components Involved in Plant Responses to Phosphate Starvation. *Journal of Integrative Plant Biology* **50**:849–859.

Yuan Z, Pratt S, Batstone DJ. 2012. Phosphorus recovery from wastewater through microbial processes. *Current Opinion in Biotechnology* **23**:878–883.

Zhang Q. 2007. Strategies for developing Green Super Rice. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. **104**:16402–16409.

Zhang S, Lehmann A, Zheng W, You Z, Rillig MC. 2018. Arbuscular mycorrhizal fungi increase grain yields: a meta-analysis. *New Phytologist* **222**:543–555.