

Česká zemědělská univerzita v Praze

**Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních
zdrojů**

Katedra agroenvironmentální chemie a výživy rostlin



**Česká zemědělská
univerzita v Praze**

**Různé systémy hnojení ječmene jarního
v dlouhodobých polních pokusech**

Diplomová práce

Autor práce: Bc. Monika Radimská

Obor studia: Rozvoj venkovského prostoru

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

© 2021 ČZU v Praze

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci "Různé systémy hnojení ječmene jarního v dlouhodobých polních pokusech" jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucího diplomové 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 diplomové práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušila autorská práva třetích osob.

V Praze dne 14. dubna 2021

Poděkování

Ráda bych touto cestou poděkovala doc. Ing. Martinu Kulhánkovi, Ph.D., za pomoc, cenné rady, odborné vedení mé diplomové práce a jeho vždy ochotný přístup. Dále děkuji své rodině za pomoc, pochopení a podporu po dobu mého studia.

Různé systémy hnojení ječmene jarního v dlouhodobých polních pokusech

Souhrn

Fosfor je ve výživě rostlin důležitým a nezastupitelným makrobiogenním prvkem. V současné době v České republice klesá zásoba rostlinám přístupného fosforu, a proto je stále častěji považován za limitující prvek ve výživě rostlin. K jeho doplnění lze aplikovat organická a minerální hnojiva, případně lze použít hnojiva v podobě odpadních látek jako např. čistírenské kaly.

Cílem diplomové práce bylo shrnutí poznatků o důležitosti fosforu v půdě i v rostlinách a také zhodnocení jednotlivých systémů hnojení v dlouhodobých přesných polních pokusech.

V experimentální části diplomové práce byla nehnojená (kontrolní) varianta porovnávána následujícími variantami: 1) čistírenské kaly, 2) hnůj, 3) hnůj v kombinaci s minerálním dusíkem, 4) minerální dusík a 5) minerální N, P a K (NPK). Byly sledovány následující parametry: obsah okamžitě přístupného, potenciálně přístupného a reziduálního fosforu. Tento dlouhodobý polní pokus probíhá nepřetržitě již od roku 1996 na pěti stanovištích, přičemž pro účely této diplomové práce byla zvolena 3 z nich (Červený Újezd, Lukavec, Suchdol). Dále byly hodnoceny výnosy ječmene jarního a orientačně doloženy i odběry fosforu.

Nejvyšší obsahy přístupného fosforu v půdě měřené všemi použitými metodami vykazovala varianta hnojená čistírenskými kaly. Důvodem byla pravděpodobně nejvyšší dávka fosforu aplikovaná tímto hnojivem. Následovaly zpravidla varianty hnůj, kde je forma přístupného fosforu nejstabilnější, a varianta NPK.

Vyšších výnosů dosahovaly varianty hnojené minerálními hnojivy oproti variantám hnojených organickými hnojivy. Nejvyšší průměrné výnosy, a proto i doložené odběry P byly naměřeny na všech stanovištích u varianty NPK. Nejvyšší efekt hnojení se projevil na stanovišti Lukavec, pravděpodobně z důvodu přirozeně nízké úrodnosti stanoviště. Naopak nejnižší efekt byl z opačných důvodů zaznamenán na stanovišti Suchdol.

Z vysokých výnosů na variantě hnojené pouze minerálním dusíkem je zřejmé, že dochází i k zvýšenému odběru P. Lze tak očekávat, že fosfor se zde stane limitující živinou mnohem dříve než u kontrolní nehnojené varianty.

Klíčová slova: Výživa rostlin, hnůj, čistírenské kaly, minerální hnojiva, udržitelný rozvoj

Different fertilizing systems of spring barely in long-term field experiments

Summary

Phosphorus is a very important and irreplaceable macronutrient in the plant nutrition. The supply of the phosphorus in the soil is decreasing in the Czech Republic, thus it is often considered as a limiting element in the plant nutrition. Organic and inorganic fertilizers can be used to replenish the phosphorus in soil and alternative fertilizers such as sewage sludge from the waste-water treatment process can be also used.

Main goals of this thesis were to summarize the scientific findings about the importance of the phosphorus in soil and plants and also to evaluate different fertilization systems in the precise long-term field fertilization experiment.

In the experimental part of this master thesis was the control treatment without fertilization compared with the following treatments: 1) sewage sludge, 2) farmyard manure, 3) manure combined with the mineral nitrogen, 4) mineral nitrogen and 5) mineral N, P, K (NPK). Contents of the readily available, potentially available and residual phosphorus were analyzed in the collected soil samples. This long-term field experiment is running since 1996 without any interruptions on five sites, whereas three of them were chosen for this experiment (namely Červený Újezd, Lukavec, Suchdol). Barley yields from these sites were also analyzed as well as P content in grain and straw. Furthermore, phosphorus uptake were estimated.

The highest contents of the available soil phosphorus (measured by all used methods) were found in the treatment fertilized with sewage sludge. It was due to the highest amount of the phosphorus added by using this fertilizer. Then followed the farmyard manure treatment, where the phosphorus is present in the most stable form, and the treatment NPK respectively.

Higher yields were found in the sites fertilized by the mineral fertilizers than by the organic fertilizers. The highest average yields and estimated phosphorus uptakes were also found in all sites at the treatment NPK. The highest fertilization effect was proven for the Lukavec site, probably due to the naturally low fertility at this site. On the contrary, the lowest effect was found at the Suchdol site due to the opposite reason.

Based on the higher yields at the treatment fertilized by mineral N it can be concluded, that P uptake is also higher. Therefore, it can be expected, that phosphorus will become limiting nutrient much sooner, than at the control treatment without any fertilization.

Keywords: Plant nutrition, farmyard manure, sewage sludge, mineral fertilizers, sustainable development

Obsah

1	Úvod	8
2	Vědecká hypotéza a cíle práce	9
2.1	Hypotézy	9
2.2	Cíle práce	9
3	Literární rešerše	10
3.1	Fosfor	10
3.1.1	Fosfor v půdě	11
3.1.1.1	Organické formy fosforu	12
3.1.1.2	Minerální formy fosforu	13
3.1.2	Fosfor v rostlině	13
3.1.2.1	Význam fosforu a jeho příjem rostlinou	13
3.2	Různé strategie hnojení fosforem	16
3.2.1	Využití odpadů ke hnojení	16
3.2.1.1	Struvit	17
3.2.1.2	Čistírenské kaly	18
3.2.1.3	Popel	20
3.2.1.4	Digestát	21
3.2.2	Biostimulanty	23
3.2.3	Šlechtění rostlin	24
3.2.4	Nanotechnologie	24
3.2.5	Lokální aplikace	25
3.2.6	Běžně používaná hnojiva	25
3.2.6.1	Statková hnojiva	25
3.2.6.2	Minerální hnojiva	29
3.2.6.3	Spotřeba hnojiv	30
3.2.6.4	Aplikace hnojiv	30
3.2.6.5	Používání minerálních a statkových hnojiv	30
3.3	Hnojení ječmene jarního	31
3.3.1	Požadavky na prostředí	31
3.3.2	Zpracování půdy k jarnímu ječmeni	32
3.3.3	Zařazení v osevním postupu	32
3.3.4	Výživa a hnojení ječmene jarního	32
4	Metodika	34
4.1	Analytická stanovení	35
4.1.1	Extrakce půdy demineralizovanou vodou	35

4.1.2	Obsah fosforu v půdě stanovený metodou CAD.....	35
4.1.3	Obsah fosforu stanovený metodou Mehlich 3.....	35
4.1.4	Stanovení obsahu reziduálního fosforu lučavkou královskou.....	36
4.1.5	Měření obsahu P ve výlužích	36
4.1.6	Výnosy rostlin	36
4.2	Statistické vyhodnocení	36
5	Výsledky	37
5.1	Výsledky rozborů půd	37
5.1.1	Extrakce půdy demineralizovanou vodou	37
5.1.2	Obsah fosforu v půdě stanovený výluhem CAD.....	38
5.1.3	Obsah fosforu v půdě stanovený metodou Mehlich 3	40
5.1.4	Obsah reziduálního fosforu stanoveného lučavkou královskou.....	42
5.2	Výnosy ječmene a odběr fosforu.....	43
6	Diskuse	47
6.1	Výsledky rozborů půd	47
6.2	Výnosy ječmene a odběr fosforu.....	50
7	Závěr	52
8	Literatura.....	53

1 Úvod

Fosfor je ve výživě rostlin společně s dusíkem a draslíkem jedním ze základních a nezastupitelných prvků, současně patří také mezi nejdůležitější stavební živiny a je velmi důležitou součástí pro zakládání i tvorbu květů. Obsah fosforu v půdě je poměrně nízký i přes jeho nezbytnost v rostlinném metabolismu. Rostliny přijímají fosfor rozpuštěný v půdním roztoku pomocí kořenů. Jeho příjem rostlinou je během vegetace rovnoměrný.

Primárním zdrojem fosforu pro rostlinu je půda. Přirozený obsah je dán půdotvorným substrátem, přičemž vyšší obsah fosforu většinou vykazují půdy, které obsahují více organické hmoty, zatímco v půdách lehkých s nízkým obsahem organické hmoty je obsah fosforu nižší. Převážná část fosforu přístupného pro rostliny se nachází ve svrchní vrstvě půdy, ze které ho rostlina přijímá největší množství. Fosfor není v půdě příliš pohyblivý a jeho obsah v půdním roztoku je nízký. Značná část celkového množství fosforu v půdách je pro rostliny nepřístupná, tj. pevně vázaná, nebo slouží jako zdroj pro výživu půdních mikroorganismů.

S rozvojem společnosti a současně s růstem světové populace roste současně poptávka po fosforečných hnojivech. Zdroje pro výrobu těchto hnojiv jsou však omezené. V České republice dnes klesá zásoba rostlinám přístupného fosforu, a proto je fosfor stále častěji považován za limitující prvek ve výživě rostlin. K jeho doplnění lze aplikovat organická hnojiva; např. formou chlévského hnoje, kejdy či slámy. Tato statková hnojiva příznivě ovlivňují půdní vlastnosti, díky kterým je fosfor lépe využíván, zvyšují schopnost půdy zadržovat vodu, což následně zlepší i využití fosforu. V současné době je kladen důraz na racionální využití organických i minerálních hnojiv.

Dále lze fosfor do půdy doplnit pomocí minerálních hnojiv, což jsou látky, které také mají pozitivní vliv na výnosy plodin. Jedná se o fosforečná či vícesložková hnojiva, případně jejich kombinace, která se také jeví jako vhodná.

Lze také použít alternativy v podobě odpadních látek, kterými mohou být např. čistírenské kaly, jejichž použití v zemědělské výrobě je v posledních dvaceti letech často diskutováno. Čistírenské kaly jsou bohaté jak na organickou hmotu, tak i na základní živiny včetně fosforu. Mimo to mají příznivý vliv na růst i výnos pěstovaných plodin. Organické látky čistírenských kalů vykazují nižší stabilitu v porovnání například s chlévským hnojem. V půdě jsou tak poměrně rychle mineralizovány. Při krátkodobém hodnocení je jejich největší vliv na výnos plodin v prvním, případně druhém roce po jejich aplikaci na zemědělskou půdu. V případě pravidelného hnojení čistírenskými kaly je ale příznivě hodnoceno i jejich dlouhodobé působení, jelikož z časového hlediska mají čistírenské kaly příznivý vliv na obsah živin i organických látek v půdě a také na jejich přijatelnost pro rostliny. V případě využití kalů je však nutno brát ohled i na jejich potenciálně negativní vlastnosti, jako je obsah rizikových prvků nebo organických polutantů.

2 Vědecká hypotéza a cíle práce

2.1 Hypotézy

Hnojení organickými i minerálními hnojivy obsahujícími fosfor povede nejen ke zvýšení výnosu jarního ječmene, ale i ke zvýšenému odběru P.

Obsah fosforu v půdě se bude v dlouhodobém pokusu měnit v závislosti na použitých hnojivech.

2.2 Cíle práce

Cílem práce bylo vyhodnotit vliv různých systémů hnojení na obsah různých forem fosforu v půdě, výnos jarního ječmene a odběr fosforu touto plodinou.

3 Literární rešerše

3.1 Fosfor

Fosfor je nezastupitelný prvek ve výživě rostlin, je jedním ze základních a nezbytných makrobiogenních prvků, zároveň patří mezi nejdůležitější stavební živiny ve výživě rostlin a je tedy přirozenou součástí životního prostředí (Troeh & Thompson 2005; Kunzová 2009).

Dle Duro et al. (2020) lze předpokládat, že se světová spotřeba potravin bude v následujících letech rapidně zvyšovat, a to v důsledku narůstající světové populace. S touto skutečností souvisí rostoucí nároky na rostlinnou i živočišnou výrobu, které na sebe úzce navazují prostřednictvím výroby krmiv či píce. Přiměřená zásoba fosforu v půdě je důležitá zejména na počátku růstu rostlin na jaře. Přitom výzkumy poukazují na skutečnost, že zdroje fosforu budou v následujících dekádách vyčerpány (Vance et al. 2003).

V České republice v současné době zásoba přijatelného fosforu v půdách klesá, přičemž se fosfor postupně stává limitujícím prvkem kvality a výnosu produktu. Tento pokles množství fosforu v půdách je důsledkem omezení hnojení organickými i minerálními hnojivy (Kunzová 2009; Mikanová & Šimon 2011). Fosfor, který je obsažen v zemědělských půdách, může mít vliv na životní prostředí, a proto je důležité zajistit, aby pěstované rostliny fosfor využily a současně nedocházelo k jeho únikům do povrchových vod a k následné eutrofizaci (Withers et al. 2014). Mackey & Paytan (2009) a Liu & Chen (2014) se shodují, že přírodní biochemický cyklus fosforu je velice pomalý. Lidská činnost jako například zemědělství, těžba či krmení zvířat nebo spotřeba domácností přírodní cyklus fosforu výrazně zintenzivňuje a z toho důvodu má urychlený cyklus P za následek některé ekologické problémy, kterým v dnešní době moderní společnost čelí. Zvláštní pozornost je věnována celkovému množství fosforu v zemědělské půdě, jeho transformaci a pohybu, protože tyto toky i v souvislosti s odvětvím zemědělství představují výrazné položky, jež dominují antropogennímu cyklu P. Globální vstup organických i anorganických forem fosforu na zemědělskou půdu z různých zdrojů nelze kompenzovat odběrem fosforu sklizní či ztrátami erozí. Samotná ztráta fosforu ze světové orné půdy je odhadována na 10,5 milionu tun fosforu ročně. To je téměř polovina ročního množství vytěženého fosforu. Drohan et al. (2019) proto zmiňují, že v současné době je třeba věnovat fosforu mimořádnou pozornost, především pak předcházet jeho nevratným ztrátám.

Fosfor je významnou částí protoplazmy, do sloučenin vstupuje s nukleovými kyselinami a s nukleotidy a ekosystémy prochází v různých formách. Původním zdrojem fosforu je rozpad hornin, ale některé horniny mají obsah fosforu nízký. Fosfor je v půdě zachycen ve formě nerozpustných sloučenin. Nerozpustný fosforečnan (fosfát) vzniká ve velice kyselém prostředí vazbami s Al, Fe, Mn, oproti tomu při nadbytku vápníku dochází k tvorbě fosforečnanu vápenatého (apatit) (Duvigneaud 1988).

3.1.1 Fosfor v půdě

V zemské kůře je fosfor obsažen ve formě nerozpustných fosforečnanů vápníku, hliníku, železa a hořčíku. Nahromaděním zmíněných sloučenin vznikají ložiska fosfátových nerostů (Lellák & Kubíček 1991). Dle Vaňka et al. (2016) celkový obsah fosforu v půdách kolísá v rozmezí od 0,01 % až do 0,15 %. Podobně Marschner (2012) uvádí, že celkový obsah P závisí na typu a textuře půdy a pohybuje se v rozmezí mezi 0,01 % až 0,20 %. Vyšší obsah fosforu většinou vykazují půdy, které obsahují více organické hmoty, zatímco v půdách lehkých s nízkým obsahem organické hmoty je obsah fosforu nízký (Vaněk et al. 2016). Fosfor je v půdě nepřilíživý a jeho obsah v půdním roztoku je nízký (Čermák et al. 2018). Značná část celkového množství P v půdách je pro rostliny nepřijatelná, tj. pevně vázaná, nebo slouží jako zdroj pro výživu půdních mikroorganismů. V půdě je fosfor obsažen v minerálních i organických formách (Sharpley 1995; Prášková & Němec 2016). Přijatelnou část pak tvoří sloučeniny fosforu (kyselina trihydrogenfosforečná – H_3PO_4 a v menším množství kyselina pyrofosforečná – $H_4P_2O_7$), které jsou potencionálním zdrojem pro rostlinnou výživu (Čermák et al. 2018). Větší část fosforu přístupného pro rostliny se nachází ve svrchní vrstvě půdy (cca do 20 cm), z této vrstvy rostlina přijímá největší množství fosforu (Barber et al. 1998).

Obsah fosforu v půdě je jedním ze základních agronomických parametrů, které jsou sledovány pomocí agrochemického zkoušení zemědělských půd. Stanovením přístupné formy fosforu lze získat informace, dle kterých je možné určit parametry půdní úrodnosti (Kunzová 2009). Koncentrace fosforu v půdách závisí na půdním horizontu, struktuře (pastvina, les) a intenzitě obhospodařování (extenzivní, intenzivní) (Kruse et al. 2015). Adsorpce fosforu závisí na množství organických látek v půdě, na pH půdy a na typu jílových minerálů (Souza et al. 2010). Alkalické i kyselé půdy snižují biologickou dostupnost fosforu (Kondratowicz-Maciejewska & Kobierski 2011). Pierzynski et al. (2005) uvádí, že se celkový obsah P ve většině zemědělských půd pohybuje mezi 50 až 1500 mg/kg, Lindsay (1979) uvádí rozmezí 200 do 5000 mg/kg. Pro rostliny je však k dispozici pouze velmi nízký poměr fosforu v půdě. O organických zdrojích je známo, že dlouhodobě zvyšují dostupnost P více než hnojiva anorganická a současně zvyšují i efektivní využití aplikovaného hnojiva (Mohanty et al. 2006). Biologicky dostupný fosfor je jedním z ukazatelů úrodnosti půdy, který rozhoduje o pohyblivosti P a tedy i růstu rostlin. Monitorování obsahu fosforu dostupného v obdělávané půdě je významné pro úpravu úrodnosti, zlepšení výnosu a pro udržitelný rozvoj zemědělství (Gu et al. 2016). Ivanič et al. (1984) rozlišuje tři základní skupiny dle vazeb fosforu, a to na organicky vázaný fosfor, anorganické sloučeniny fosforu a také výměnně sorbovaný fosfor.

Sanchez (2007) rozděluje celkový obsah fosforu v půdě pouze na dvě základní formy:

- fosfor organický
- fosfor anorganický

Podíl těchto dvou forem fosforu je v jednotlivých půdách rozdílný, a to v závislosti na druhu půdy a na obsahu organických látek obsažených v půdě, kdy podíl organického fosforu kolísá mezi 2 až 75 % a podíl anorganického fosforu tvoří 25 až 98 % z celkového obsahu (Fecenko & Ložek 2000). Vaněk et al. (2016) uvádí, že fosfor je v půdě málo pohyblivý, jeho obsah v půdním roztoku je nízký a jeho průnik do hlubších horizontů je i při dlouhodobém hnojení malý. Při porovnání obsahu fosforu v orné půdě a v trvalých travních porostech lze říci, že vyšší přísun P je u travních porostů, kde je pravděpodobně transport - ačkoli omezený -

ovlivněn drnovou vrstvou, vyšším obsahem organické hmoty v půdě, nižší hodnotou pH i činností kořenů. Tyto skutečnosti mohou mírně zvýšit pohyb sloučenin fosforu do hlubších horizontů. Při aplikaci hnojiva na povrch půdy není možné předpokládat významné zlepšení výživy rostlin fosforem, neboť povrch půdy snadno přesychá, tudíž se netvoří podmínky pro příjem živin, nehledě na to, že se v povrchové vrstvě nesoustředí kořeny rostlin. Zdrojů fosforu vyskytujících se v půdě je celá řada. Existují čistě přírodní zdroje jako např. apatit, kdy zvětráváním minerálu apatitu dochází buď k rozkladu organických zbytků, nebo ke vzniku anorganické sloučeniny fosforu (Ivanič et al. 1984).

Významným antropogenním zdrojem anorganického P jsou odpadní vody z prádeln i z domácností, do kterých se fosforečnany dostávají z pracích prostředků, a také aplikace fosforečných hnojiv na zemědělskou půdu. Dalším antropogenním zdrojem P jsou polyfosforečnany, které se používají v čistících a odmašťovacích prostředcích. Zdrojem organického P je fosfor obsažený v živočišných odpadech nebo rozkládající se biomasa zooplanktonu a fytoplanktonu, jež se usazuje na dně jezer a toků (Pitter 1999).

3.1.1.1 Organické formy fosforu

Nedílnou součástí organické půdní hmoty jsou organické formy fosforu, proto obsah organického fosforu v půdě koresponduje s rozdělením organické hmoty půdního profilu. Je uváděno, že běžný podíl takto vázaného fosforu tvoří 30-50 % celkového obsahu fosforu v půdě (Vaněk et al. 2016). Ivanič et al. (1984) publikuje, že na území České republiky obsahují půdy 11,5-55 % z celkového obsahu organického fosforu. Organický fosfor je vázán v humifikované organické hmotě (Sharpley et al. 2003), ve zbytcích živočišných a rostlinných těl a půdních mikrobů. Hromadí se převážně ve svrchním humusovém horizontu a jeho podíl klesá s hloubkou půdního profilu (Ivanič et al. 1984). Významnou část organického P tvoří fytyl, fosfolipidy, nukleoproteidy, nukleové kyseliny i fosforylované glycidy, jež se nacházejí v kořenové hmotě a následně se do půdy dostávají posklizňovými zbytky (strniště, opad listů, vedlejší produkty – seno, nať) a také organickými hnojivy. Významná část organicky vázaného fosforu v půdách je výsledkem sorpce P půdními mikroorganismy, které fosfor imobilizují do svých těl. Po odumření mikroorganismů může být takto vázaný P v procesech mineralizace uvolněn a následně zpřístupněn rostlinám, je tedy významnou možností pro zajištění výživy rostlin fosforem (Vaněk et al. 2016). Dle Macháčka et al. (2004) je podíl organicky vázaného fosforu vyšší u travních porostů než v orných půdách. Přitom je z dlouhodobých sledování zřejmé, že po zaorání trvalých travních porostů se výrazněji snižuje obsah dusíku a uhlíku než obsah fosforu. Toto způsobují tři faktory: odběr dusíku rostlinami je vyšší než odběr fosforu, ztráty dusíku vyplavením jsou vyšší než ztráty fosforu a svou roli sehrávají také ztráty dusíku denitrifikací (Balík et al. 2008).

Fosforylace a defosforylace organických látek jsou nejdůležitějšími přeměnami energie při procesu látkové výměny v půdě. Nadbytek P v půdě zlepšuje produktivitu humifikace a jiných procesů probíhajících v půdě (Vaněk et al. 2007). Fosfor má pozitivní vliv na půdní bilanci organické hmoty. Ke zlepšení fyziologické využitelnosti fosforu z půdy i z hnojiv výrazně přispívá půdní humus (Sharpley et al. 2003).

3.1.1.2 Minerální formy fosforu

V zemědělství je nutné vědět, kolik se v půdě nachází přístupného fosforu, aby následně bylo možné určit dávku fosforečných hnojiv (Kara et al. 1997).

Množství anorganického P obsaženého v půdách se liší. Nejvýznamnější vliv na tuto skutečnost má typ a druh půdy, hloubka půdního profilu a úroveň hnojení (Macháček et al. 2004). Zdrojem P pro rostliny i pro půdní mikroorganismy jsou primární fosforečné minerály (apatity), sekundární vysrážené a adsorbované fosfáty, fosforečná hnojiva a organické sloučeniny fosforu. Primární fosforečné minerály - apatity - se nacházejí v magmatických horninách. Jedná se o vápenaté sloučeniny, které jsou tvořeny třemi molekulami $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ a jednou molekulou chloridu, hydroxidu nebo fluoridu, a podle uvedené doprovodné molekuly je odvozen jejich název - např. chlorapatit, fluorapatit, hydroxylapatit. Podíl apatitu je vyšší v bazických horninách (Ivanič et al. 1984; Vaněk et al. 2016). V menším množství se v půdách vyskytují jako primární minerály fosforečnany železa s příměsí manganu (tripity), vodnaté fosforečnany hliníku (wawelity) či fosforečnan železnatý (vivianit), který se vyskytuje v málo provzdušněných a zamokřených půdách (Ivanič et al. 1984).

Sekundární vysrážené a adsorbované fosfáty vznikají přeměnami P v půdě zvětráváním primárních fosfátových minerálů, jež následně uvolňují anionty kyseliny ortofosforečné, které poté v důsledku sorpční schopnosti přecházejí do dalších forem minerální či organické povahy (Mehmood et al. 2018). Přeměny P jsou podmíněny třemi různými druhy sorpce, a to sorpcí chemickou, biologickou či výměnnou. Vznik sekundárních fosfátových minerálů je dán obsahem organické hmoty, jílových minerálů, stupněm zvětralosti půdy, obsahem uhličitanu vápenatého a výměnného vápníku, jakož i volných oxidů hliníku a železa. Sekundární fosfátové minerály vznikají především chemickou sorpcí P (Ivanič et al. 1984).

3.1.2 Fosfor v rostlině

3.1.2.1 Význam fosforu a jeho příjem rostlinou

Dle Vaňka et al. (2016) je pro výživu rostlin důležitý P z půdy, ze kterého se tvoří významná část rostlinné produkce. Fosfor je jedním z klíčových prvků ve výživě rostlin. Přesto je jeho přístupný obsah v půdě nízký (Blume et al. 2002). Příjem a metabolismus fosforu kladně koreluje s mnoha biochemickými procesy, které probíhají v buňkách kořenového systému, ale i v nadzemních částech rostlin (Fecenko & Ložek 2000). Rostliny fosfor přijímají ve formě aniontů kyseliny trihydrogenfosforečné, převážně ve formách HPO_4^{2-} a H_2PO_4^- . Přijatý minerální fosfor je následně rychle zabudován do organických sloučenin a poté je transportován do míst jeho nejvyšší potřeby, tedy do vegetačního vrcholu, mladých listů a později do květů a plodů, přičemž nejvyšší obsah fosforu v rostlině vykazují generativní orgány a semena. V semenech je P vázán převážně ve formě fytinu (fytin je zásobní látka P i Mg). Fosforečná kyselina, která se nachází v živých systémech, snadno reaguje s organickými látkami (hlavně s estery sacharidů nebo glycerolu) za vzniku organofosfátů (Vaněk et al. 2016). Rostliny přijímají z celkového obsahu fosforu v půdě 1-8 % a jsou schopny přijmout okamžitě fosfor pouze z vodorozpustných forem (Ivanič et al. 1984; Neuberger 1998). Podíl vodorozpustných sloučenin je nízký, většina fosforečných sloučenin jsou látky ve vodě nerozpustné, proto jsou

pro rostliny nepřijatelné (Sharpley et al. 2003). Dle Marschner (2012) je fosfor mezi hlavními živinami nejméně mobilní, jeho vysoká sorpční kapacita v půdě, fixace v organických půdních materiálech a mineralizace vedou k jeho nízké dostupnosti i příjmu rostlinami.

Úloha fosforu spočívá v jeho podílu na akumulaci, přenosu či výdeji energie, také je součástí mnoha klíčových sloučenin, které se podílejí na procesech fotosyntézy, výstavby buněk, přenosu genetické informace i tvorby zásobních nebo stavebních látek. Mimo to je fosfor důležitou součástí systémů, jež zabezpečují přenos signálů jak na vnitro-, tak i na mezibuněčné úrovni (Pavlíková et al. 2008). Rostliny mohou přijímat P při velmi nízké koncentraci v půdním roztoku, musí však překonat značný koncentrační gradient. Příjem fosforu je aktivní proces, který vyžaduje dostatek energie, jejíž zásobárnou jsou makroenergetické vazby v ATP, která je uvolňována pomocí enzymů ATPázy. Při nízkých teplotách mohou mít rostliny (zejména teplomilné, u nichž asimilační procesy startují při vyšších teplotách) k dispozici málo energie pro příjem fosforu a mohou tak přechodně vykazovat jeho nedostatek, a to i při jeho dostatečném množství v půdě. Do jisté míry jsou rostliny schopny příjem P i ovlivňovat. Pokud se ho v jejich pletivech nenachází dostatek, pak v membránách kořenů aktivují fosfatázy a přenašeče s vysokou afinitou k fosforečnanům, aby se příjem fosforu zlepšil. Při zvýšeném růstu kořenů na úkor nadzemní biomasy rostliny prokořeňují větší objem půdy, ze které získávají P. Současně se zvyšuje i kořenová sekrece, která umožňuje zvýšení rozpustnosti, a tím i přijatelnosti fosforu v rhizosféře. Právě vytvoření bohaté kořenové soustavy je významným předpokladem pro příjem P. Z tohoto důvodu je kritickým obdobím z hlediska příjmu fosforu u většiny rostlin počátek vegetace, kdy jsou vyčerpány zásoby fosforu ze semen a rostlina zároveň postupně přechází na autotrofní výživu, přičemž ještě nemá dostatečný kořenový systém, jež by zajistil dostatek P pro rostlinu (zvláště na stanovištích s nízkým obsahem P) (Vaněk et al. 2016). Celkový obsah fosforu v rostlině se v průběhu vegetace snižuje, a to díky zředovacímu efektu, ale současně také roste množství fosforu vydávaného ve sloučeninách kořenových exudátů (Černý et al. 2020).

Pozitivně na příjem P působí dostatečná vlhkost půdy, přiměřené množství organických látek v půdě s dostatečnou biologickou činností, příznivá hodnota pH (cca 5,5-7,0) a přiměřený obsah přijatelného fosforu v půdě (40-80 ppm P) (Sharpley et al. 2003; Vaněk et al. 2016). V biochemických reakcích a při přenosu energie má fosfor v rostlinách významné postavení. Při omezeném příjmu fosforu rostlinami jsou narušeny důležité procesy, které souvisí hlavně s fotosyntézou, s nežádoucími důsledky, k nimž náleží především snížení výnosů plodin a také snížení obsahu těch složek v produktech, pro které jsou rostliny pěstovány (škrob, sacharóza, bílkoviny). Rostliny s dostatkem fosforu přecházejí do generativní fáze růstu dříve, také dříve dozrávají, tudíž mají kratší vegetační období. Fosfor má významnou úlohu také při tvorbě a zakládání květů, rostliny s dostatkem P mají předpoklady pro tvorbu větších květenství, většího počtu kvítků či květů a také tvorby semen. Rostliny fosfor přijímají během celé vegetace rovnoměrně, pro kvalitu produkce a dobrý výnos je však rozhodující, aby jeho obsah v mladých rostlinách se většinou pohyboval nad 0,4 %. Později se jeho obsah pohybuje v rozmezí 0,3-0,4 %, pokles obsahu fosforu v rostlinách pod 0,1 % v sušině se již projevuje zjevnými příznaky. Ve schopnostech rostlin osvojovat si P z půdy i z méně rozpustných sloučenin jsou značné rozdíly. Např. ječmen má oproti bobovitým rostlinám a jetelovinám nejmenší osvojovací schopnost (Vaněk et al. 2016).

Příznaky nadbytku fosforu

Dle Vaňka et al. (2016) se v našich podmínkách nadbytek fosforu téměř nevyskytuje. To je způsobeno tím, že P je velice dobře sorbován půdou a jeho obsah prozatím nedosahuje takových hodnot, kdy by při vyšších koncentracích přecházel do půdního roztoku. Pokud by v České republice byly zaznamenány příznaky poškození rostlin nadbytkem fosforu, pak by to většinou bylo při vysokém zásobním či melioračním hnojení nebo při předzásobním hnojení fosforečnými hnojivy. Vysoké dávky P mohou zapříčinit krátkodobé snížení přijatelnosti určitých kovů tak, že se rozpustné fosforečnany vážou na tyto kovy a vytváří různé sloučeniny. V těchto případech se může projevit např. nedostatek zinku.

Příznaky nedostatku fosforu

U rostlin se nedostatek fosforu příliš často neprojevuje, a pokud ano, pak se většinou jedná o tzv. latentní nedostatek, kdy na rostlinách nejsou sice žádné zjevné příznaky jeho nedostatku, ale z důvodu nízkého obsahu fosforu nemohou probíhat všechny biochemické funkce na potřebné úrovni. Kritickým obdobím pro příjem fosforu je počátek rostlinné vegetace, zvláště za chladného či suchého počasí. Tehdy je příjem fosforu pro rostliny výrazně ztížen. Díky postupnému růstu kořenů se po zlepšení povětrnostních podmínek může příjem P zlepšit, ale výrazný deficit se většinou již nedá plně nahradit. Rostliny reagují vnějšími příznaky až při déletrvajícím a výrazném nedostatku - jsou nízké, listy jsou menší, užší a vzpřímené, stonky jsou slabší a u obilnin je omezeno odnožování. Zároveň je omezena tvorba kořenů. Listy a části stébel se zbarvují do červeného až fialového odstínu, což způsobuje vyšší tvorba antokyanů. Tyto příznaky se běžně objevují na řepce v podzimním období a na jaře na ječmeni, a to především na suchých stanovištích, utužených půdách či na okrajích pozemků, kdy je počasí chladnější a biologická činnost půd nižší (Vaněk et al. 2016). Dlouhodobý deficit P může vyvolat hluboké poruchy fosforečného metabolismu i metabolismu dusíku, což způsobuje snížení syntézy bílkovin i zvýšení podílu nízkomolekulárních N-sloučenin (amidy, volné nukleotidy). Dlouhodobý nedostatek P také způsobuje snížení jeho transportu z kořenů do nadzemních orgánů. Rostliny jsou do určité míry schopny se na tyto podmínky adaptovat tím, že vytváří dodatečné kořeny. S nedostatkem P souvisí i vláhové podmínky, kdy se při deficitu vody přenos P uskutečňuje převážně pasivně (Michalík 2001).

Příznaky nedostatku fosforu u ječmene jarního *Hordeum vulgare* nebývají příliš výrazné, většinou se jedná o výše zmíněný latentní deficit, kdy se na rostlinách neobjevují zjevné příznaky nedostatku P. Nedostatek P v rostlinách (pod 0,3 %) znemožňuje některé biochemické procesy na určité úrovni. Vnější příznaky jsou výrazné při déletrvajícím nedostatku P, např. pod vlivem nízkých teplot či sucha, kdy ječmen méně odnožuje, stébla má krátká a slabá, listy ječmene jsou úzké a tmavozelené a je omezena tvorba kořenů. Pokud obsah P klesne pod optimální hodnotu 0,3 %, pak může dojít k hyperchlorofylaci listů a následně v důsledku vysokého obsahu antokyanů se stébla a čepele listů zbarví červenofialově (Zimolka et al. 2006). Dle Jones et al. (2003) deficit fosforu společně s nedostatkem vody významně snižuje výnos ječmene jarního.

3.2 Různé strategie hnojení fosforem

V současné době nabývá dle Smatanové et al. (2017) problém správného hnojení zemědělských plodin fosforem na aktuálnosti, a to z důvodu dlouhodobě nízké spotřeby fosforečných hnojiv, která následně způsobuje klesající zásobu přístupného fosforu na zemědělských půdách České republiky. V posledních 25-30 letech se průměrná roční dávka fosforu na 1 hektar pohybuje okolo 12 kg oxidu fosforečného (P_2O_5), tj. pouze 5,3 kg čistého P. V České republice lze půdy z pohledu zásobenosti fosforem rozdělit následovně: 26,5 % nízká zásobenost, 27,9 % vyhovující zásobenost, 21,5 % dobrá zásobenost, 17 % vysoká zásobenost a 7 % velmi vysoká zásobenost. Je zřejmé, že na základě výsledků agrochemického zkoušení zemědělských půd je pozorován zcela jasný trend úbytku přístupného fosforu. Od začátku 90. let minulého století až do současnosti je za všechny druhy pozemků v zemědělských půdách České republiky vykazován cca 15% úbytek přístupného fosforu, přičemž není jasné, jak tuto situaci do budoucna zlepšit. Od roku 2008 ceny fosforu vzrostly až o 800 %, což ukazuje na blížící se problém, který je společný pro zemědělství, odpadové hospodářství, životní prostředí a případně i jiné oblasti lidské společnosti. Zdroje fosforu nejsou neomezené, přičemž 90 % zdrojů fosforu disponuje 6 zemí světa (Maroko, Čína, Sýrie, Alžírsko, Jordánsko, region jižní Afriky), a proto bude do budoucna nezbytné vyvíjet postupy a technologie, které umožní do nějaké míry fosfor nahradit a současně ho efektivně využívat z dalších zdrojů, např. z odpadového hospodářství (Čermák et al. 2018).

Hnojením je doplňováno množství fosforu, který byl odebrán při sklizni. Hnojení fosforečnými hnojivy je tedy třeba provádět tak, aby se následně po zpracování do půdy dostalo hnojivo do celého půdního profilu (Vaněk et al. 2016). Výživa rostlin je závislá na zásobě přijatelného P v půdách, ta však klesá a fosfor se tedy postupně stává limitujícím prvkem kvality a výnosu produktu. V současnosti dochází k omezenému hnojení organickými hnojivy (např. kompost) i statkovými hnojivy (např. hnůj), případně minerálními hnojivy, přičemž dochází k odčerpání P z půdy, které bilančně přesahuje vstupy. Následkem je snížení množství přístupného půdního fosforu. Současně s klesající úrovní hnojení na všech druzích půd klesá podíl kategorií s vysokým a velmi vysokým obsahem P a začíná tak přechod do nižších kategorií zásobenosti. Dlouhotrvající deficit v používání fosforečných hnojiv poukazuje na zvýšené čerpání fosforu z půdy a současně i na snižující se půdní úrodnost. Měl by tedy být kladen důraz na takovou úroveň hnojení fosforem, při kterém by nedocházelo k jeho trvalému deficitu v půdě, jež následně ohrožuje rostlinnou produkci (Kunzová 2009).

3.2.1 Využití odpadů ke hnojení

Se zvyšující se životní úrovní roste i množství odpadů, jež mohou mít nepříznivý vliv na životní prostředí, ale právě lidskou činností vzniká také množství produktů sloužících k přímé spotřebě, popřípadě k následnému zpracování. Snaha využívat vedlejší produkty je charakteristickou pro zemědělskou výrobu, především např. formou, jakou je zaorání posklizňových zbytků či produkcí kompostů. Tím v podstatě pak rozumná zemědělská výroba představuje bezodpadovou technologii. V současné době je stále intenzivněji vyžadováno, aby jednotlivé sféry národního hospodářství produkovaly co nejmenší množství odpadů. Současně však stále vznikají odpadní látky, jejichž produkce souvisí s vyšší životní úrovní nebo s vyšší

spotřebou vody a elektřiny. Vysoké nároky, které jsou kladeny na kvalitu povrchových vod, vedou k významnému růstu produkce čistírenských kalů, zvýšené množství odpadů z bioplynových stanic plyne zase z požadavku na zvýšení podílu energie z obnovitelných zdrojů. S ohledem na obsah živin a organických látek je snaha po využívání vedlejších produktů či odpadů v zemědělství, ovšem při použití odpadních hmot je důležité zvážit jak kladné, tak i záporné vlastnosti zmíněných odpadů. Je třeba dbát na obsah organických polutantů, rizikových prvků či možnou přítomnost patogenů (Vaněk et al. 2016).

Zvyšující se množství organických materiálů či vedlejších produktů, které byly donedávna považovány za odpad, se nyní stává surovinou pro případnou recyklaci a možností pro znovuvyužití fosforu v zemědělství. Jedná se o komposty, popel, zbytky po anaerobní fermentaci či pevné komunální odpady. Společně s hnojem hospodářských zvířat mohou tyto biologické zdroje obsahovat mimo fosfor a také cenné množství organických látek a živin, které mají potenciál pro zlepšení struktury a úrodnosti půdy. Tak by bylo v budoucnu možné nahradit anorganická hnojiva. V posledních letech došlo k pokroku v získávání P zpracováním odpadních vod, kalů nebo hnoje a dalších vedlejších produktů na potenciálně užitečná hnojiva, jež neobsahují kontaminující látky - např. na struvit (fosforečnan amonný) (Withers et al. 2014).

3.2.1.1 Struvit

Zvýšené zatížení povrchových vod živinami (fosforem a dusíkem) vede k negativním změnám vodního ekosystému a v konečném důsledku i ke snížení kvality a omezení využitelnosti těchto vod. Ačkoli postupy pro odstranění živin přímo z povrchových vod existují, jejich využití je značně nákladné a mnohdy i neúčinné. Z tohoto důvodu je vhodnější vstup živin do povrchových vod zamezit. Současné postupy odstraňování fosforu z odpadních vod jsou založeny na jeho inkorporaci do biomasy ve formě aktivovaného kalu či rostlinné biomasy nebo na jeho vysrážení v podobě nerozpustných sloučenin.

Jedním z novějších postupů, který umožňuje snížit zatížení podzemních i povrchových vod živinami, je srážení fosforečnanů a amoniakálního dusíku z odpadních vod ve formě fosforečnanu hořečnato-amonného, tedy struvitu ($\text{NH}_4\text{MgPO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$). Pomocí tohoto postupu je tedy možné z odpadních vod odstranit živiny, a to s poměrně vysokou účinností. Zároveň lze struvit použít jako hnojivo, které omezuje splach živin ze zemědělsky obdělávané půdy. Struvit je totiž málo rozpustný, tudíž se z něho fosforečnany a amoniakální dusík uvolňují pomalu a v množstvích, která jsou rostlinami rychle zpracována. Ke srážení struvitu dochází ve vodách s vysokými koncentracemi fosforu, hořčíku a amoniakálního dusíku při alkalickém pH. Srážení struvitu se jeví jako vhodná metoda pro odstranění orthofosforečnanů (Lhotský et al. 2013).

Dle Sýkorové et al. (2014) lze touto cestou získat až 90 % fosforečnanového fosforu (P-PO_4^{3-}) a 80-90 % celkového fosforu. Další výhodou autoři spatřují v eliminaci poškození zařízení kalového hospodářství, protože velké množství fosforu vytváří např. povlaky. Struvit je velice kvalitní a biologicky dostupné hnojivo. Živiny jsou z něho uvolňovány pomalu. Proces tvorby struvitu začíná v kalové vodě, která má přidáním hydroxidu vápenatého nebo okysličováním hodnoty pH zvýšené na 8,5-9. Do této vody se aplikují soli hořčíku v takovém množství, aby se dosáhlo požadovaného molárního poměru Mg : N : P, nutného pro účinnou tvorbu struvitu.

3.2.1.2 Čistírenské kaly

Čistírenské kaly vznikají během procesu čištění odpadních vod, ze kterých jsou fyzikálními, biologickými, chemickými či fyzikálně-chemickými procesy separovány znečišťující látky. Čistírenské kaly obsahují škodliviny, kterými jsou těžké kovy či patogenní organismy, ale zároveň jsou bohaté na živiny (dusík a fosfor) a cennou organickou hmotu. Právě díky obsahu organické hmoty a živin je vhodné použít tento typ odpadu jako hnojivo nebo přípravek zlepšující půdní vlastnosti. Největší množství tohoto odpadu (kalů) v rámci ČR je využito v kraji Vysočina (cca 15 tis. tun), dále ve Středočeském kraji (cca 5 tis. tun) a v kraji Olomouckém (cca 3 tis. tun), nejméně kalů je využito v Praze či Královéhradeckém kraji. V kraji Karlovarském prozatím nebylo použití kalů na zemědělské půdě zaznamenáno (ECO trend 2015).

Tlak vyvíjený na kvalitu povrchových vod vede ke zvýšené péči o odpadní vody, což současně přispívá k narůstající produkci čistírenských kalů. Likvidaci čistírenských kalů lze provést skládkováním, spalováním a také aplikací na zemědělskou půdu. Ve vyspělých státech Evropské unie je v zemědělství využíváno zhruba 40 % z celkové produkce čistírenských kalů. Při aplikaci čistírenských kalů je nutné zvážit jejich kladné i záporné vlastnosti. Jako pozitivum lze jmenovat obsah živin a organických látek. K negativním vlastnostem patří potenciální přítomnost rizikových prvků či patogenů (Balík et al. 1999). Požadavky na zlepšení kvality povrchových vod bezprostředně vedly k nárůstu produkce čistírenských kalů. Významným kladem kalů z čistíren odpadních vod je vysoký obsah organických látek a živin, a to především fosforu a dusíku. Obsah živin úzce souvisí s původem čistírenského kalu a způsobem jeho ošetření. Kaly z čistíren odpadních vod vykazují vysoký a kolísavý obsah vody (cca 70 %) a z toho důvodu je třeba uvádět obsah živin v sušině. Upravenými kaly je do půdy dodáváno velké množství dobře a rychle rozložitelných organických látek, a proto tyto kaly příznivě ovlivňují biologickou činnost půd. Mineralizací jsou uvolňovány živiny jako dusík a fosfor, takže částečně mohou nahradit funkci klasických organických hnojiv, oproti kterým je v čistírenských kálech nižší obsah draslíku (Vaněk et al. 2016).

Monitoring kalů čistíren odpadních vod je prováděn na základě zákona č. 147/2002 Sb., o Ústředním kontrolním a zkušebním ústavu zemědělském, ve znění pozdějších předpisů. Kaly jsou monitorovány jako jedna z možností vstupů do půdy. Monitoring se zaměřuje především na čistírny odpadních vod, u kterých se předpokládá, že jistá část jejich produkce je v konečné fázi směřována na zemědělskou půdu (Prášková 2020). Novelizovaný zákon č. 185/2001 Sb., o odpadech a o změně některých dalších zákonů, společně s prováděcí vyhláškou č. 437/2016 Sb., o podmínkách použití upravených kalů na zemědělské půdě, upravuje nakládání s kaly z čistíren odpadních vod. Právě prováděcí vyhláška č. 437/2016 přinesla výrazné zpřísnění podmínek pro používání čistírenských kalů na půdě, např. zpřísnila požadavky pro používání kalů z čistíren odpadních vod v zemědělství a mnoha subjektům tím znemožnila přímé využití čistírenských kalů na zemědělské půdě. Vyhláška také zpřísnila mikrobiologická kritéria a stanovila povinnost ověření účinnosti hygienizace kalů, přičemž právě povinnost ověření účinnosti technologie úpravy kalů by mohla být příčinou vysokých finančních nákladů v souvislosti s nutností modernizovat stávající hygienizační zařízení nebo budovat nová zařízení na čistírnách odpadních vod. Tyto legislativní požadavky lze splnit např. hygienizací kalů vápněním, kdy tato metoda nepředstavuje příliš vysoké náklady, avšak produkuje značné

emise amoniaku a vzniklý kal není na některé půdy vhodný vzhledem k jeho pH a dostupnosti organických složek. Alternativou je sušení kalů (např. solární sušárny či pásové nízkoteplotní sušárny). Tento proces zredukuje množství kalů a současně zajistí hygienizaci kalu, jelikož ve vzniklých granulích je minimální obsah vody, což zároveň zabrání i druhotnému mikrobiologickému růstu. Produkt vzniklý sušením lze energeticky nebo materiálově využít ve stavebnictví, zemědělství či pro výrobu energie. Dle zákona č. 185/2001 Sb., o odpadech, lze na půdu používat pouze upravené kaly s ohledem na nutriční potřeby rostlin a současně v souladu s programem použití kalů takovým způsobem, aby nebyla zhoršována kvalita půdy, povrchových i podzemních vod. Upraveným kalem se rozumí takový kal, který byl podroben biologické, tepelné či chemické úpravě, dlouhodobému skladování či jinému procesu, při kterém se výrazně sníží obsah patogenních organismů a současně s tím i zdravotní riziko spojené s jeho aplikací. Kaly z čistíren odpadních vod lze termicky zpracovávat (pyrolýza), protože představují zajímavý surovinový zdroj, zejména pro obsah fosforu. Fosfor lze získat také formou přímé separace z kalové vody. Tato metoda je např. v Německu již povinná (Havelka 2019).

Při použití nejvyšší povolené dávky upraveného čistírenského kalu, tedy 5 t sušiny/ha za rok, je do půdy dodáno přibližně 60 kg P, 160 kg N, 15 kg K a 125 kg Ca, které již prvním rokem z větší části přejdou do forem přijatelných pro rostliny. V čistírenských kálech je důležité sledovat obsah rizikových prvků a ke hnojení použít pouze takové kaly, jejichž složení je vyhovující. Znečištění rizikovými prvky se díky soustavnému sledování kvality odpadních vod významně snížilo, ale i přes tuto kontrolu se mohou stát velkým rizikem kontaminace půdy a následně i kvality rostlinné produkce. Z tohoto důvodu jsou pro čistírenské kaly používané ke hnojení zemědělských půd stanoveny limitní hodnoty přípustných obsahů rizikových prvků (Vaněk et al. 2016).

Možnosti využití čistírenských kalů:

- **kompostování** – vzhledem k vyšší teplotě kompostování je kal stabilizován, sníží tak svoji hmotnost i objem a přemění organické znečištění na znečištění anorganické. Nevýhodou je, že se touto metodou neodstraní určité toxické sloučeniny, které kal obsahuje (Gustiatn & Kulikowska 2014);
- **přímá aplikace kalů na zemědělskou půdu;**
- **spalování kalů, pyrolýza a zplyňování kalů** – jako jedna z možností, jak získat živiny z čistírenských kalů, se jeví jejich zplyňování, spalování nebo pyrolýza za vzniku popela, kdy fosfor k jeho případnému využití jako hnojiva lze získat louhováním v kyselině či termochemickou přeměnou (Lundin et al. 2004);
- **zpracování kalů bez možnosti využití živin** – v České republice je jako jedna z nejčastějších možných variant využíváno ukládání kalů na skládky. Od tohoto způsobu se ale vzhledem k rostoucím poplatkům za ukládání kalů upouští. Dalším možným způsobem je využít kal jako alternativní palivo, kdy tato varianta se řadí k potencionálním možnostem zvýšení podílu obnovitelných zdrojů energie, což je i cílem Evropské unie. Další možností, jak kal využít a současně ho stabilizovat, je jeho anaerobní stabilizace ve fermentačních nádržích, přičemž jednou z výhod tohoto využití je i vznik tepla a bioplynu (Dohányos 2006).

3.2.1.3 Popel

Jednou z hlavních možností pro využití popela je jeho aplikace jako hnojiva, a to z důvodu vysokého obsahu živin a bazických kationtů, které setrvávají v popelu po spálení biomasy (Moilanen et al. 2012; Tulonen et al. 2012). Je známo několik průmyslových spalovacích systémů. Ty lze rozdělit na varianty se spalováním na fluidním loži, prachové spalování a spalování na pevném loži (Rosillo-Calle et al. 2006). Během spalování biomasy setrvává část nespalitelných látek ve formě úletových a roštových popelů. Množství popela v palivech z biomasy se běžně pohybuje mezi 1-6 %. Relativně malé množství popelovin (0,3-1 %) obsahuje dřevo, přičemž výrazně více popelovin je obsaženo v kůře (3-4 %), ve slámě (5 %) a v trávě (7 %) (Ochecová 2015). Dle Vaňka et al. (2016) roštové popely většinou vyhovují daným limitním hodnotám oproti úletovým popelům, kde jsou zjišťovány vyšší hodnoty. To může být způsobeno skutečností, že mnoho prvků při vyšších teplotách téká - např. Cd, Pb, Hg - a uvolňuje se do spalín. Poklesem teploty pak kondenzují, usazují se na úletovém popílku a následně jsou zachycovány filtry.

Popel vzniklý spalováním biomasy je bohatý jak na obsah kovů alkalických zemin, tak i na obsah alkalických kovů. Také obsahuje nezanedbatelné množství Si, na který je bohatší popel ze slámy, dále popel obsahuje významnější množství S, P a řadu mikroprvků. Reakce popela je zásaditá (Vokálová 2010). Díky zásadité reakci popela je snížena mobilita a biologická dostupnost rizikových prvků, hodnoty pH popelů z dřevité biomasy bývají vyšší než u popelů ze slámy či obilnin, a to z důvodu vyššího obsahu vápníku a nižšího obsahu chloru a síry (Loo & Koppejan 2008). Hodnotu pH dále ovlivňuje např. spalovací teplota či doba skladování, jelikož alkalita klesá spolu s narůstající teplotou i s dobou skladování (Etiégni & Campbell 1991). Dřevěný popel má pozitivní vliv na výnos i na růst zemědělských plodin (Arshad et al. 2012; Park et al. 2012). Popel ze spalování biomasy je složen z jemných částic, jež po styku s vodou bobtnají a ovlivňují tak strukturu, provzdušňování, salinitu či hydraulickou vodivost půdy (Perucci et al. 2008). Augusto et al. (2008) uvádí, že rozpustnost jednotlivých prvků se v popelu významně liší. V popelu se nacházejí snadno rozpustné prvky jako S, K, B, Na, které se vyskytují především ve formě solí, a tak jsou pro rostliny lépe přijatelné. Dále se v popelu vyskytují méně rozpustné prvky Mg, Ca, Si a Fe, kdy je Ca přítomen zejména v uhličitanové formě. Nejméně rozpustným prvkem je fosfor, který se vyskytuje ve formě Al a Fe oxidů či jako apatit. Popel lze použít jako významný zdroj živin, např. jako přírůstek do kompostu. Při správném dávkování a promísení se zbylými složkami kompostu má schopnost úpravy pH, díky čemuž lze předpokládat dobrý rozklad kompostovaného materiálu či omezení nevhodných procesů při případném nedostatku kyslíku. Při používání popelů ze spalování biomasy je důležité a zároveň i nutné dodržet limity rizikových látek a prvků. Tyto hodnoty jsou v současné době upraveny vyhláškou č.131/2014 Sb., kterou se mění vyhláška Ministerstva zemědělství ČR č. 474/2000 Sb., o stanovení požadavků na hnojiva, ve znění pozdějších předpisů, a vyhláška č. 377/2013 Sb., o skladování a způsobu používání hnojiv. Kromě těchto limitů je stanoveno, že popel po spalování biomasy je možné aplikovat do dávky 2 t/ha jednou během tří let, přičemž nesmí být současně aplikovány sedimenty nebo upravené kaly z čistíren odpadních vod. Při nedokonalém spalování lze očekávat vyšší hodnoty polycyklických aromatických uhlovodíků (PAU). Pokud po spalování biomasy zůstává větší podíl nespálené organické hmoty, pak jsou zde předpoklady pro tvorbu polycyklických

aromatických uhlovodíků. Množství polycyklických aromatických uhlovodíků požadovaným limitům vyhovuje při dobrých spalovacích podmínkách (Vaněk et al. 2016).

3.2.1.4 Digestát

Dle vyhlášky č. 131/2014 Sb., kterou se mění vyhláška Ministerstva zemědělství ČR č. 474/2000 Sb., o stanovení požadavků na hnojiva, ve znění pozdějších předpisů, a vyhláška č. 377/2013 Sb., o skladování a způsobu používání hnojiv, je digestát popsán jako organické hnojivo, jež vzniká anaerobní fermentací během výroby bioplynu ze statkových hnojiv i krmiv. Digestát je šedá až černá tekutina s obsahem sušiny mezi 5 % až 10 % a obsahuje významný podíl organických látek v sušině, a to 60 % až 80 %. Vstupní surovinou je nejčastěji kejda prasat, hnůj, kukuřičná siláž, čirok či travní senáž aj. (Kasal et al. 2016). Dle Rigby & Smith (2013) je procento sušiny v digestátech 3,5 % až 9,3 %, průměrná hodnota pak činí 4,9 %.

Digestát je tedy fermentační zbytek z anaerobní digesce vstupních materiálů výroby bioplynu v bioplynové stanici, který následně může být separován. Tak vzniká část pevná, tzv. separát, a část kapalná, tzv. fugát. Všechny tři zmíněné frakce (separát, fugát, digestát) se využívají jako organické hnojivo. Fugát lze navracet zpět do technologie bioplynových stanic. Separát je možné použít např. jako surovinu pro výrobu hnojiva, substrátů, stelivo či jako alternativní palivo (ÚKZÚZ 2016). Dle Smatanové (2012) je hnojení digestátem podobné jako hnojení kejdou, vždy je však nutné vzít v úvahu obsah dusíku, který je okamžitě dostupný v amonné formě. Digestát je tedy vhodnou a levnou alternativou minerálního hnojení. Aplikace digestátu vyrobeného výhradně z krmiv a ze statkových hnojiv na pozemcích producenta nepodléhá registraci. Pokud je digestát do oběhu uváděn prodejem, pak musí být ohlášen, případně registrován jako organické hnojivo dle zákona č. 156/1998 Sb., o hnojivech. Podle nařízení vlády č. 103/2003 Sb., tzv. nitrátové směrnice, je digestát hnojivem s rychle uvolnitelným dusíkem, a proto je jeho používání ve zranitelných oblastech v určitých obdobích omezeno či přímo zakázáno. Ve zbytcích z anaerobní digesce je až 50 % dusíku obsaženo v organické formě, je tedy postupně mineralizován a současně i zpřístupňován plodinám v dusičnanové i v amonné formě. Právě zde hrozí riziko uvolnění dusičnanů do podzemních vod, k čemuž může dojít při nízkém odběru N rostlinami (např. spojeném s vysokými srážkami) (Muhlbachová et al. 2016). Digestát a fugát se používají především k dodání dusíku při podpoře rozkladu slámy, ke hnojení polních plodin, a to jako regenerační hnojení ozimých obilnin i olejnin, dále ke hnojení silážní kukuřice či kukuřice na zrno (před setím se zapravením do půdy nebo během vegetace při výšce porostu 30–70 cm hadicovými aplikátory) a také ke hnojení cukrovky a brambor, a to při předsetové přípravě půdy a před samotným sázením brambor. Dále lze fugát a digestát použít u trvalých travních porostů obdobně jako kejdu a také k meziplodinám určeným na zelené hnojení pro využití dusíku a zabránění jeho ztrát (ÚKZÚZ 2016).

Na rozdělení digestátů je možné nahlížet z několika různých pohledů, např. podle způsobu použití, podle vstupních surovin či podle obsahu sušiny. Materiálů, které lze použít jako vstupní suroviny pro bioplynové stanice, je mnoho - např. kejda, hnůj, kaly, rostlinné suroviny (Marada et al. 2008). Dle ÚKZÚZ (2016) se bioplynové stanice dělí podle druhu zpracovaných materiálů na zemědělské a ostatní (odpadářské). Zemědělské bioplynové stanice zpracovávají jen statková hnojiva a krmiva, ostatní bioplynové stanice využívají i materiály,

jejichž použití v zemědělských bioplynových stanicích povoleno není. Těmito materiály mohou být např. kaly z čistíren odpadních vod, masokostní moučky, gastroodpady či lihovarnické výpalky. Výstupem z těchto bioplynových stanic jsou tzv. netypové digestáty a výstupem ze zemědělských bioplynových stanic jsou tzv. typové digestáty. Obsah živin digestátu je závislý na vstupních materiálech, proto množství jednotlivých živin může kolísat v závislosti na kvalitě materiálu, který je do fermentoru dodáván. V každém případě ale velká část živin, jako jsou draslík, vápník či fosfor, mikroprvky i stabilní rizikové prvky, v digestátu po fermentaci zůstávají, lze tedy konstatovat, že pro zemědělský podnik je tento odpad z bioplynových stanic výhodný. Procesem fermentace nedochází k významným ztrátám živin a při racionální aplikaci se odčerpané živiny vracejí do půdy. Výrazně však klesá obsah C a částečně i obsah N. Značná část organického N uvolněná během fermentace je v digestátu přítomna v amonné formě. Z uhlíku se tvoří metan a oxid uhličitý.

Během fermentace, tedy během anaerobních reakcí, mikroorganismy rozkládají a využívají rozložitelnou organickou hmotu snadněji. V nerozložené hmotě zůstávají hůře rozložitelné organické části. Ani půdní organismy totiž nemají schopnost zbytkovou hmotu výrazněji rozkládat, a proto digestát neplní funkci kvalitního organického hnojiva. Separát poskytuje obtížně rozložitelnou organickou hmotu, ale již neobsahuje dostatek snadněji rozložitelné organické látky, jež slouží mikroorganismům jako substrát. Příznivě však může ovlivnit fyzikální vlastnosti půd jako objemovou hmotnost, pórovitost či provzdušněnost apod., a to zvláště v těžších a utužených půdách. Lze proto tvrdit, že by hnojení digestátem mohlo být dobrým opatřením k provzdušnění i zlehčení půd. Digestát lze použít jako organické hnojivo, po jeho odvodnění jej lze použít jako jednu ze složek ve výrobě kompostu nebo je možné jej použít jako rekultivační materiál. Mimo vegetační období je důležité z důvodu omezení jeho aplikace na půdu řádně zabezpečit jeho skladování (Smatanová 2012). Digestát je dle Lošáka et al. (2017) definován jako organické hnojivo, které vzniklo anaerobní fermentací při výrobě bioplynu. Digestát je hnojivo s rychle uvolnitelným N ve zvýšeném podílu amonné frakce. Poměr C:N je u fugátu vyšší než 10, řadí se tudíž ke hnojivům s rychle uvolnitelným N. Oproti fugátu je v separátu vyšší koncentrace organického N a také P, Mg a K. Sušením separátu je obsah amonného dusíku snižován, což je nežádoucí pro polní podmínky. Aplikace sušeného separátu může najít uplatnění např. v substrátech pro květiny. Dle Vaňka et al. (2016) plní kompostování odvodněného digestátu spolu se snadno rozložitelnou organickou hmotou (při dodržování odpovídajících podmínek pro kompostování) funkci hmoty, jež udržuje stabilitu a vzdušnost kompostované hmoty. Výsledkem tohoto procesu je kvalitní kompost s poměrně dobrými sorpčními parametry, ačkoli se obsah huminových kyselin výrazně nezvyšuje.

Obsah sušiny v digestátu i fugátu je poměrně nízký, navíc se oddělením pevné a kapalné fáze výrazně omezí obsah vody, je tedy zřejmé, že významná část živin přechází do fugátu a zároveň jsou živiny rychleji působící. Živiny, jež jsou po oddělení fugátu nadále obsaženy v separátu, jsou z větší části pevně vázány v organických zbytcích, přičemž je jejich uvolňování pomalejší. Dávkou 1 t sušiny/h je dodáno 18 kg P, 24 kg N, 58 kg K a 40 kg Ca. To je poměrně vysoký vstup živin, které jsou ale pouze zčásti bezprostředně využitelné rostlinami. Aby nedocházelo ke ztrátám amonného dusíku, je nutné digestát po aplikaci urychleně zapravit do půdy, stejně jako tomu je u kejdy či močůvky (Vaněk et al. 2016). Aplikace fugátu zvyšuje dostupnost N pro rostliny, protože 60 % až 80 % N v digestátu je v minerální formě, a to zejména NH_4^+ (Loria et al. 2007). Právě vzhledem k vysokému obsahu NH_4^+ jsou hnojivé

účinky fugátu i digestátu mírně nižší nebo srovnatelné v porovnání s kejdou nebo minerálními hnojivy (Nkoa 2014).

Digestát je vždy třeba podle vyhlášky č. 274/1998 Sb. skladovat v nepropustných nadzemních (případně částečně zapuštěných) nádržích či v zemních jímkách. Mimo vegetační období jsou platná omezení pro použití digestátu na půdu, z tohoto důvodu je nutné vyřešit jeho skladování, které musí být v souladu s vyhláškou č. 274/1998 Sb., o skladování a způsobu používání hnojiv, ve znění pozdějších předpisů. Při provozu jímek a nádrží s obsahem digestátu je třeba zamezit přítoku povrchových a srážkových vod do jímek. Tuhý digestát je nutné skladovat ve stavbách, které jsou zabezpečeny stejným způsobem jako stavby pro skladování tuhých statkových hnojiv. Tuhý digestát, který je připraven pro vlastní účely ze statkových hnojiv, lze před jeho použitím uložit na zemědělskou půdu nejdéle po dobu 24 měsíců. Při použití digestátu na zemědělské půdě je nutno jeho zapracováním do půdy zabránit úniku amoniaku a také nesmí dojít k přímému vniku či splachu hnojiva do vod povrchových. Při použití digestátu či fugátu na povrch půdy je třeba zapracovat tyto přípravky do půdy do 24 hodin (s výjimkou řádkového přihnojování). Při použití tuhých digestátů (separátů) je nutné jejich zapravení do orné půdy do 48 hodin, ve všech případech je však žádoucí zapravení přímé či okamžité (Marada et al. 2008; ÚKZÚZ 2016). Dle nařízení Rady (ES) č. 384/2007, o ekologické produkci a označování ekologických produktů, obecně platí, že digestát je možné použít v ekologickém zemědělství pouze v případě, že by daná bioplynová stanice pracovala v režimu pro ekologicky hospodařící farmy, a zároveň vstupní suroviny musejí splnit podmínku organického hnojiva použitelného pro produkci ekologických výrobků (Marada et al. 2008). Dusík se společně s draslíkem stávají součástí fugátu, fosfor a uhlík zůstávají v separátu. Vzhledem k tomu lze předpokládat, že je vhodné pevný separát využít k zásobnímu hnojení a podpoře vzniku humusu, naopak tekutý fugát k přímému hnojení rostlin v době vegetačního období (Biom CZ 2019).

3.2.2 Biostimulanty

Biostimulant je látka, která obsahuje živé mikroorganismy, které při jejich aplikaci na semena, půdu nebo na povrch rostlin kolonizují rhizosféru nebo vnitřní část rostlin a podporují tak zvýšením dostupnosti živin v rostlinách jejich růst (Vessey 2003). Evropská rada pro průmysl v oblasti biostimulantů definuje rostlinné biostimulanty jako látky či mikroorganismy, jejichž funkcí při jejich aplikaci na rostliny nebo rhizosféru je stimulovat přírodní procesy, které povedou ke zvýšení příjmu živin a ke zvýšení kvality plodin. Přírodní biostimulanty jsou klasifikovány na základě jejich zdroje a obsahu, např. huminové látky nebo výtažky z mořských řas (Zulfiqar 2020).

V průběhu posledních šedesáti let se projevila potřeba zvyšovat intenzitu produkce v zemědělství masivním používáním minerálních hnojiv. Z tohoto důvodu je třeba nalézt alternativní prostředky pro výživu rostlin. Jedním z těchto prostředků je aplikace tzv. bioefektorů. Bioefektor je preparát, který obsahuje jak mikroorganismy (houby a bakterie), tak i aktivní přírodní sloučeniny (mikrobiální zbytky, výluhy z půd nebo kompostu, rostlinné výtažky). Účinnost bioefektorů spočívá v uvolňování P z hůře přístupných forem, jež jsou obsaženy mj. ve fosforečných hnojivech, jelikož větší část celkového P obsaženého v půdách není pro rostliny v přijatelné formě. Mezi nejdůležitější principy účinnosti bioefektorů

pro zvýšení přístupnosti živin tedy patří ovlivnění procesů v rhizosféře a podpora růstu rostlin (Holečková et al. 2014).

Přidání a efektivita biostimulantů, což jsou jednoduché nebo kombinované mikrobiální přípravky, jež stimulují mikrobiální přístupnost půdního organického i anorganického P, zůstává tématem stále málo prozkoumaným (Withers et al. 2014).

3.2.3 Šlechtění rostlin

Obecně platí, že hnojení fosforem má nízkou účinnost. Je to tím, že kořeny je získáván jen zlomek aplikovaného fosforu. Značné množství P je hromaděno v půdě (Campos 2018).

V poslední době bylo vynaloženo velké úsilí ohledně hnojení fosforem. V tomto ohledu byly vyvinuty agronomické strategie pro zvýšení dostupnosti fosforečných hnojiv pro plodiny, např. i pro ječmen. Do těchto strategií patří plošná aplikace tekutých hnojiv (Holloway et al. 2001) nebo lokální aplikace (Ma et al. 2009). Tyto techniky však vyžadují moderní technologie a tím zvyšují provozní náklady. Na druhou stranu je prosazováno šlechtění tzv. P-efektivních plodin (tj. rostliny se zvýšenou schopností využití fosforu) pro jejich relativně nízké nároky, což přináší výhody jak systémům s vysokými, tak i nízkými vstupy (Rose et al. 2010).

Wang et al. (2010) rozdělují šlechtitelské zaměření na dva mechanismy:

- vnitřní účinnost alokace (mobilizace fosforu za účelem produkce vyšší biomasy s nižším vstupem);
- schopnost rostliny získávat fosfor z půdy (kořenová soustava).

3.2.4 Nanotechnologie

V současné době je v semenářství často diskutovanou otázkou zákaz používání některých účinných látek, které jsou součástí mořidel, a aktuální potřeba alternativních způsobů ošetření osiva tak, aby zůstal zachován zdravotní stav osiva a ochrana vzházejících rostlin. Zásadním předpokladem pro úspěšné pěstování plodin je tedy kvalitní osivo. V rámci standardních technologií je osivo mořeno fungicidy a insekticidy. V současné době je moření semen neopomíjeným úkonem při přípravě osiva, avšak samo o sobě výnos ani biologickou kvalitu osiva nezvyšuje. Proto je třeba jej považovat pouze za jakousi určitou pojistku při ošetření relativně zdravého osiva.

Moderní nanotechnologie a biotechnologie mohou zpřístupnit nové techniky a postupy, které lze použít pro ošetření osiva, které následně vede ke zvýšení jeho kvality i biologické hodnoty. Jako nanotechnologii je možné využít nízkoteplotního plazmatu jako způsobu fyzikálního ošetření a stimulace osiva. Tuto technologii lze využít i v kombinaci s klasickým chemickým mořením. Jako biotechnologii lze využít kombinaci nanotechnologie a následného nanosení vhodného biologického preparátu (Čurn et al. 2018).

Technologie využití nízkoteplotního plazmatu je v chemickém průmyslu či ve zdravotnictví využívána již dlouhou řadu let. V poslední době ovšem nachází uplatnění také v biologii či zemědělství. Obecně je uváděn její pozitivní vliv na klíčení semen, ovšem v některých případech byly zaznamenány její kladné účinky i na růst rostlin v polních podmínkách, kdy byly ovlivněny znaky jako délka kořene, výška rostlin či rychlost růstu. Ošetření osiva plazmatem ovlivnilo mimo jiné i odolnost semenáčků a rostlin řepky olejky vůči stresu suchem. Plazmovým ošetřením není zajištěna ochrana vzešlých plodin.

Je zde nutné uvést, že většina dostupných a publikovaných dat je součástí laboratorních a maloparcelkových polních pokusů (Čurn et al. 2018). Dalším způsobem využití nanotechnologií se nabízí v souvislosti s hnojením (včetně fosforečných hnojiv či močoviny, dusičnanů), jelikož hnojiva obalená nanomateriály mají potenciálně vyšší využití rostlinou, a to z důvodu pomalejšího uvolňování hnojiv. Nedochází tedy k náhlým odtokům a znečištění (Duhan 2017).

3.2.5 Lokální aplikace

Lokální aplikace minerálních hnojiv má dlouholetou experimentální tradici, první pokusy byly uskutečněny již v 80. letech 19. století. Další sledování probíhala od poloviny 20. století, a to především po skončení 2. světové války. Hlavním důvodem bylo nedostatečné množství minerálních hnojiv, ale také výhodná společná kombinace setí a aplikace hnojiv. Již v této době byly z výsledků pozorování zřejmé, že i poměrně nízká dávka P může výrazně zvýšit celkový výnos. V současné době, kdy poklesla spotřeba fosforečných hnojiv a tím i zásoba přijatelných forem v půdách, dochází k určité renesanci této technologie, ovšem na mnohem vyšší úrovni z pohledu kvality hnojiv a aplikační techniky (Balík et al. 2002).

Aplikace fosforu jako hnojení pod patu je jedním z východisek pro hnojení kukuřice, zvláště pak na půdách s nízkou zásobou fosforu. Tento systém nabízí mnoho předností, na druhou stranu je nutné počítat se skutečností, že kukuřice fosfor odčerpává během celé vegetace z celého půdního profilu, tedy všude tam, kde dokáže zakořenit. Nelze tvrdit, že hnojení P pod patu zabezpečí optimální výživu a nejvyšší výnosy, orientace na tuto formu hnojení je chápána spíše jako doplňující agrotechnický zákrok, který příznivě ovlivní počáteční růstové fáze (Kulovaná 2002).

Hnojení fosforem se někdy aplikuje až před setím nebo hnojením pod patu kombinovanými hnojivy jako Amofos, NP Lovofert aj. Ječmen jarní na toto cílené hnojení reaguje velice dobře, protože jeho kořenový systém je mělký a zároveň má i zvýšenou potřebu P v raných fázích růstu. Toto kombinované hnojení je jedním z intenzifikačních prvků při pěstování ječmene jarního (Černý 2007).

3.2.6 Běžně používaná hnojiva

3.2.6.1 Statková hnojiva

Vaněk et al. (2016) uvádějí, že statková hnojiva bývají produkována přímo v zemědělském podniku. Jejich složení i obsah živin jsou většinou odrazem druhu a stáří zvířat, krmení, způsobu jejich ošetřování, ale i živinného režimu půd dané oblasti. Statková hnojiva mají poměrně vysokou hnojivou hodnotu a bývá v nich soustředěno velké množství živin, které mohou zemědělské plodiny využít. Z živin je rostlinami nejvíce využíván fosfor (téměř 30 %) a dusík (cca 20 %). Zvířecí exkrementy spolu se stelivem a zbytky krmiv tedy představují významné množství živin, které se mohou při dobrém hospodaření navracet do půdy. Do půdy jsou pomocí statkových hnojiv dodávány rostlinné živiny (makroprvky, mikroprvky), organické látky, mikroorganismy a látky stimulační, hormonální a růstové. Produkce těchto hnojiv je závislá na množství zvířat, která připadají na určitou plochu. Statková hnojiva jsou popisována jako univerzálnější a jejich působení je většinou dlouhodobé a pozvolnější.

Do půdy mimo živin dodávají také množství organických látek, které jsou využívány mikroorganismy a výrazně tím přispívají ke zvýšení nebo udržení půdní úrodnosti. Půdy, které jsou statkovými hnojivy hnojeny pravidelně, bývají úrodnější, protože mají lepší fyzikální vlastnosti, lépe zadržují živiny či přijímají vodu a také jsou odolnější vůči výkyvům. Růžek et al. (2004) uvádějí, že statková hnojiva mají několik okamžitých výhod ve srovnání s hnojivy minerálními. Za prvé - vznikají jako vedlejší produkt při chovu hospodářských zvířat. Proto je tedy nemusíme nakupovat tak jako hnojiva minerální. Za druhé - nepředstavují takové nebezpečí pro životní prostředí jako minerální hnojiva, pokud se dodrží základní zásady pro jejich aplikaci a skladování. Největší výhodou těchto hnojiv je současné dodání více živin pěstovaným rostlinám, a to z toho důvodu, že obsahují řadu hlavních i stopových prvků.

Chlévský hnůj

Chlévský hnůj je již po staletí využíván jako základní zdroj rostlinných živin. Kromě toho, že do půdy dodává živiny, také zlepšuje strukturu půdy a zvyšuje půdní vlhkost (Wolf et Snyder 2003). Vzniká uzráním chlévské mrvy (směs výkalů, steliva i zbytků krmiva, která opouští stáj) na hnojišti. Množství produkce chlévské mrvy a živin závisí na druhu a stáří zvířat chovaných v zemědělském podniku. Dále závisí na způsobu krmení zvířat, na druhu a množství steliva. Skutečnost, že je složení hnoje tolik závislé na výživě zvířat, může představovat riziko kontaminace mědí či zinkem. Tuto kontaminaci způsobují výživové doplňky stravy hospodářských zvířat (Petersen et al. 2007).

Proces zrání mrvy zahrnuje kvašení, tlení a hnití, při kterém se rozkládají její složky a následně se přeměňují na látky s jiným kvalitativním složením. Jedná se tedy o vzájemně navazující biologicko-chemické procesy, které se průběžně prolínají. Největší intenzita rozkladu organických látek probíhá za přístupu vzduchu, kdy se z uhlíkatých organických látek uvolňuje oxid uhličitý a z dusíkatých organických látek amoniak. Při dosud užívané technologii nezpevněných stanovišť nebo sklápění návěsů vedle sebe představuje úbytek organických látek cca 60 %, což obnáší i značné finanční ztráty. Naopak při dobré péči o hnůj (jako je vrstvení do bloků) by ztráty organických látek neměly být vyšší než 40 %. Hlavní zásadou při používání chlévského hnoje je jeho okamžité zaorání, protože jinak se snižuje jeho hnojivá účinnost. Ta se již po 6 hodinách snižuje až o 16 % a po 4 dnech až o 36 %. Současné předpisy však ukládají povinnost hnůj zapravit do půdy do 48 hodin.

Využití živin z chlévského hnoje je rozloženo na delší časové období, nejčastěji je využito živin během prvních 3 let po aplikaci, přičemž v lehkých půdách bývá využití rozloženo během dvou let, naopak v půdách těžších se jedná o delší časové období. Nejvíce bývá využito draslíku a dusíku. Ačkoli se využití P jeví jako nejnižší, je podstatně vyšší než z hnojiv minerálních. Fosfor je z organické hmoty pozvolna uvolňován s postupujícím procesem mineralizace. U chlévského hnoje je v prvním roce po jeho aplikaci rostlinami využito zhruba 15 % dodaného P, ve druhém roce 10 % a v roce třetím 5 % (Vaněk et al. 2016).

Močůvka

Močůvku Richter & Kubát (2003) definují jako zkvašenou moč hospodářských zvířat, která bývá ředěna vodou napájecí, ale i dešťovou. Přímé použití močůvky ke hnojení není vhodné. Mezi její hlavní nevýhody patří nezáměr o její využití nebo kapacita jímek, která nebývá dostatečná.

Močůvku je možné řadit k dusíkato-draselným hnojivům. Obsah organických látek a fosforu je zde zanedbatelný, proto se její dávkování řídí dle náročnosti hnojené plodiny na dusík nebo draslík. Močůvka obsahuje většinu dusíku ve formě amoniaku, proto hrozí nebezpečí jeho ztrát při skladování a aplikaci. K značným ztrátám dusíku také dochází při hnojení na suché půdě za slunných dnů nebo při větru. Hlavním cílem při používání močůvky by měla být co nejvyšší snaha o omezení ztrát (Petr et al. 1992). Hnojení močůvkou je vhodné především pro trvalé travní porosty, zvláště při možnosti současné závlahy. Výhodné je také její použití k jednoletým pícešinám na orné půdě či k zelenému hnojení. Při častém močůvkování pozemků a zároveň při vynechání hnojení fosforem hrozí nebezpečí rozšíření plevelů (Vaněk et al. 2016).

Kejda

Kejda je směsí pevných a tekutých výkalů hospodářských zvířat, zředěných vodou. Je produkována při roštovém nebo volném ustájení zvířat bez podestýlky. Kvalitní kejdu lze srovnat s ostatními statkovými hnojivy. Problémy s kejdou na našem území jsou způsobeny nekázní personálu (např. nadměrným ředěním) nebo nedostatečným technologickým vybavením. Naopak v zemědělsky vyspělých západních zemích kejda zaujímá dominantní postavení bez větších problémů se skladováním či s aplikací. Základním předpokladem pro efektivní využití kejdy je nastavení systému rostlinné výroby tak, aby byla veškerá kejda spotřebována a nebylo třeba hledat náhradní řešení pro její další zpracování (většinou je kejda aplikována k okopaninám, kukuřici a při zaorávce) (Vaněk et al. 2016). Stupka et al. (2013) uvádějí jako hlavní minerální látky kejdy dusík, draslík a fosfor. Zvýšená aplikace tohoto hnojiva vzhledem k obsahu těchto látek tedy může vést až k eutrofizaci vod. Aplikace kejdy v půdě může způsobovat její průsak a styk s vodou, s kterou následně odteče většina nitrátů. Mimo to probíhá v půdě adheze fosfátů na půdní částice (podpora půdní eroze).

Vodní zdroje mohou být znečišťovány i při samotné aplikaci kejdy. Při hnojení vysokými dávkami může docházet k jejímu hromadění na povrchu půdy a mimo jiné i k silnějšímu šíření nepříjemného zápachu. Při dešťových srážkách je kejda splachována do povrchových vod a infiltrací znečišťuje podzemní vody (Tlapák et al. 1992).

Sláma

Zaorávky slámy přichází v dnešní době stále více v úvahu, a to vzhledem k rozvoji nových technologií v živočišné výrobě, ve které se omezuje potřeba steliva, jelikož klesají stavy zvířat, s čímž souvisí právě i přebytek slámy. Je účelné zapojit ji do koloběhu látek a živin, protože je jejich významným zdrojem. Hnojení slámou přichází v úvahu především v podnicích bez živočišné výroby, v podnicích s nízkými stavy zvířat nebo v osevných sledech s vysokým zastoupením obilnin. Efektivnost tohoto opatření záleží především na úrovni rozdrčení a rozprostření slámy po pozemku, na přihnojení dusíkem k podpoře rozkladu slámy nebo na vlhkostních poměrech v půdě. Nejčastěji se k zaorávce používá sláma z řepky ozimé nebo

z ozimých obilnin, přičemž se zaorávají plodiny, které k tomuto účelu byly produkovány (Vaněk et al. 2016). Z pohledu chemického složení obsahuje sláma především organické látky, jež tvoří cca 80 %. Zbývající podíl tvoří minerální látky, ovšem množství prvků, jimiž jsou dusík a fosfor, je poměrně nízké (Winkler 2017). Dle Richtera a Římovského (1996) tvoří u obilnin obsah fosforu přibližně 0,09 %, u řepky 0,11 % a u kukuřice 0,16 %. Sláma obsahuje poměrně malé množství fosforu, z tohoto důvodu je velice účelné na středně a málo zásobených půdách dodat ke slámě i vyrovnávací dávky fosforu (Procházková et al. 2020).

Zelené hnojení

Při zeleném hnojení se do půdy zaorává hmota rostlin pěstovaných k tomuto účelu. Pěstování takových plodin probíhá formou podsevů letních a ozimých meziplodin a jen výjimečně formou plodin hlavních. K nejčastějším pěstovaným meziplodinám patří řepka a hořčice, z podsevů jetel plazivý. Mezi hlavní kritéria pro uplatnění tohoto hnojení patří časové hledisko (dostatečně dlouhá vegetační doba pro vysévané plodiny), vláhové podmínky stanoviště či finanční náročnost. Hnojení je možné používat samostatně i v kombinaci s hnojem, močůvkou, kejdou, slámou. Bývá užíváno při nedostatku organických hnojiv, na pozemcích vzdálených od hnojiště či v místech, kde je ztížena jejich doprava. V neposlední řadě se zelené hnojení doporučuje jako významné protierozní opatření nebo jako ochrana proti vymývání živin do podzemních vod. Zelené hnojení se stává významným faktorem pro udržení a obnovu půdní úrodnosti z důvodu snižování stavů zvířat. Proto by tomuto opatření měla být věnována zvýšená pozornost a také by mělo dojít k rozšíření jeho plochy. Zaorávkou hnojiva se do půdy dostane dobře rozložitelná organická hmota, která je schopna příznivě ovlivnit biologickou činnost půdy, většinou ale není schopna výrazně zvýšit obsah uhlíku v půdě, proto je nutné zelené hnojení kombinovat se zaorávkou slámy (Vaněk et al. 2016). Zelené hnojení je důležité pouze v případné mobilizaci fosforu, avšak žádný „nový“ fosfor pochopitelně do půdy již nedodává (Florián 2020).

Komposty

Komposty mají nezastupitelnou úlohu při využívání a zapojení odpadů a vedlejších produktů rostlinné produkce do obnovy půdní úrodnosti. Kompostováním se do půdy vrací velké množství živin a organických látek a současně se také snižuje množství odpadů, které by příliš zatěžovaly životní prostředí. Proto má kompostování i velký hygienický a ekologický význam (Vaněk et al. 2016). Organický fosfor v kompostu z rostlinných materiálů je snadno rozložitelný. Je uvolňován ve formě orthofosforečnanu, ten je pro rostliny snadno přístupný (Šrefl 2012). Dle Flowerdew (2010) může být kvalitní kompost stejně dobrý jako kvalitní hnůj. Použití kompostů je univerzální a po jejich aplikaci na povrch pozemku nehrozí nebezpečí výraznějších ztrát dusíku, jako tomu je po hnojení klasickými statkovými hnojivy. Mezi výhody kompostování patří také podle Vaněk et al. (2016) skutečnost, že po hnojení na povrch stačí jejich mělký zapravení do půdy.

3.2.6.2 Minerální hnojiva

Minerální neboli průmyslová či koncentrovaná hnojiva jsou většinou produkty chemického průmyslu, na jejichž výrobě se zčásti podílejí i ostatní úseky hospodářství (hutnictví, stavebnictví). Při jejich výrobě se většinou omezuje množství vedlejších složek, čímž se v nich koncentruje vyšší obsah živin (Vaněk et al. 2016).

Vaněk et al. (2016) dělí minerální hnojiva na:

- **jednosložková hnojiva** obsahující jen jednu hlavní živinu. Dle obsahu jednotlivých živin se dále rozlišují na dusíkatá, fosforečná, vápenatá, draselná, hořečnatá, hnojiva se sírou, hnojiva s mikroprvky;
- **vícesložková hnojiva** obsahující dvě i více hlavních živin, kdy se podle jejich zastoupení dělí na hnojiva dvojitá (s obsahem dvou hlavních živin) a hnojiva plná (s obsahem zpravidla tří hlavních živin).

Dále lze minerální hnojiva rozlišovat podle technologie výroby takto:

- hnojiva smíšená (vznikají směsí jednotlivých složek s následnou granulací);
- kombinovaná hnojiva vícesložková, a to dvojitá i plná (vznikají upravenými chemickými procesy).

Vaněk et al. (2016) rozlišují hnojiva i podle skupenství na:

- a) tuhá hnojiva, většinou zde převažují zrnitá hnojiva;
- b) kapalná hnojiva, vyráběny jako čiré roztoky či suspenze.

Fosforečná hnojiva

Kunzová (2009) definuje fosforečná hnojiva jako chemické látky, jejichž hlavní živinou je fosfor. Ten mohou obsahovat ve formách, které jsou rostlinám přístupné, nebo ho poskytují až po uvolnění v půdě. Rozpustnost hnojiv je důležitým ukazatelem, podle něhož se dělí následovně:

- hnojiva s fosforečnany rozpustnými ve vodě (superfosfát);
- hnojiva s fosforečnany, které se rozpouští v citranu amonném;
- hnojiva s fosforečnany rozpustnými v kyselině citrónové (Thomasova moučka);
- hnojiva s fosforečnany rozpustnými v silných kyselinách (kostní moučky, hyperfosfáty).

Hlavní výrobci těchto hnojiv jsou USA, Čína, Afrika a Střední východ. Mezi producenty lze najít také několik rozvojových zemí, pro které je fosfátový průmysl velice důležitým z ekonomického hlediska (Isherwood 1998). Fosfor je vyplavován z půdy s malými ztrátami 2-4 kg P/ha za rok (lehké až těžké půdy). Při prudkých deštích se však fosfor dostává do povrchových vod, kde může způsobit eutrofizaci (Richter 1996).

3.2.6.3 Spotřeba hnojiv

Celková spotřeba živin dodaných do půdy minerálními hnojivy má dlouhodobě mírně vzrůstající tendenci. Oproti tomu spotřeba statkových hnojiv dlouhodobě klesá. Je zřejmé, že negativní cenová politika v živočišné výrobě zapříčiňuje pokles stavů hospodářských zvířat, tedy i snížení produkce statkových hnojiv. To má zřejmě také za následek kompenzaci živin pro rostliny v podobě průmyslových hnojiv. Jsou samozřejmé mezipodnikové a mezikrajové rozdíly (od úplné absence živočišné výroby až po podniky s dostatečnou výrobou statkových hnojiv) (Vaněk et al. 2016; Ministerstvo zemědělství 2017).

3.2.6.4 Aplikace hnojiv

Způsoby, kterými jsou organické látky aplikovány, mají na jejich účinnost značný vliv. Pokud jsou organické látky přidány na povrch, kde se zachovávají jako mulč, pak poskytnou maximální zachování vlhkosti, sníží ztráty vody jejím odpařováním, přispějí k udržení teploty a také zabrání zhutnění nebo erozi půdy. Pokud se organické látky použijí ve směsi s ornici, pak po zaorání poskytnou velice rychlé uvolňování živin nebo přispějí ke zlepšení infiltrace půdy. Ochranu proti erozi ale neposkytují v takové míře, jako když se aplikují pouze na povrch půdy (Wolf et Snyder 2003).

Hůla & Procházková (2008) uvádějí, že existují tři způsoby hnojení minerálními hnojivy, jimiž jsou:

- **základní hnojení** – užívá se až po sklizni předplodiny na strniště před podzimním zpracováním půdy. Zde se vyplatí použít tuhá minerální hnojiva složená z dusíkatých a fosforečných hnojiv (případně draselných) a použít je během jedné operace. Díky tomu se sníží náklady a nebezpečí zhutnění půdy;
- **hnojení před setím** – nejvíce užívaná metoda je aplikace dusíku před setím. Zde je důležité nevyvíjet na půdu příliš velký tlak, aby se nevytvořily koleje, se kterými později souvisí problémy se zakládáním porostu. Tato metoda také na jaře zajišťuje výživu okopanin a jařin;
- **přihnojování** – tento způsob se dále dělí na první jarní hnojení (regenerační přihnojování), druhé jarní hnojení (produkční přihnojování) a pozdní hnojení (kvalitativní přihnojování).

3.2.6.5 Používání minerálních a statkových hnojiv

Dávky minerálních i statkových hnojiv jsou stanovovány vzhledem k potřebám jednotlivých plodin na určitých stanovištích. Zpravidla se vychází z potřeby živin, která je potřebná pro dosažení reálné úrovně a požadované kvality výnosů. Rozdělení dávek, termín hnojení i způsob aplikace se upřesňují dle aktuálního stavu porostu, podle povětrnostních podmínek a podle zásob dusíku v půdě, které jsou rostliny schopny využít. Mezi hlavní zásady a doporučení pro používání minerálních a statkových hnojiv patří:

- nutnost dbát při aplikaci na rovnoměrné dávkování a rozmetání hnojiv;
- použití minerálních dusíkatých hnojiv, kdy se očekává jejich využití rostlinou;

- od začátku července do začátku období nevhodného ke hnojení (Tabulka 1) lze u minerálních hnojiv aplikovat pouze v dávce do 40 kg N/ha nebo u tekutých statkových hnojiv v dávce 80 kg N/ha. Takto je možno hnojit ozimé plodiny (vyjma půd s promyvným vodním režimem), dále meziplodiny (s výjimkou čistých porostů luskovin a jetelovin). Dále v jejich kapalné formě k podpoře rozkladu slámy - opět s výjimkou půd s promyvným vodním režimem, kde se aplikace minerálních dusíkatých hnojiv přesouvá na jarní vegetační období;
- při hnojení plodin na trvalých travních porostech a orných půdách je doporučeno používání dělených dávek minerálních a statkových hnojiv;
- pro dosažení vysoké účinnosti dodaného dusíku je doporučena vyrovnaná výživa rostlin dalšími živinami a udržování pH půdy (Dostál et al. 2004).

Tabulka 1: Období nevhodná k používání minerálních a statkových hnojiv

Zemědělský pozemek s pěstovanou plodinou nebo připravený pro založení porostu	Období bez hnojení		
	Hnůj, kompost	Kejda, močůvka, hnojůvka	Minerální dusíkatá hnojiva
Jednoleté plodiny na orné půdě	1. 6. - 31. 7	15. 11. - 31. 1.	1. 11. - 31. 1.
Travní porosty na orné půdě, louky, pastviny	Aplikace není časově omezena	15. 11. - 31. 1.	1. 10. - 28. 2.

Zdroj: Dostál et al. 2004. *Zásady správné zemědělské praxe zaměřené na ochranu vod před znečištěním dusičnany ze zemědělských zdrojů. Ministerstvo zemědělství ČR v Ústavu zemědělských a potravinářských informací. Praha.*

3.3 Hnojení ječmene jarního

Ječmen je společně s pšenicí naší druhou nejstarší a nejrozšířenější obilninou, jež provází člověka od počátku zemědělství (Zimolka 2006; Vaněk et al. 2016). V roce 2008 činila v České republice plocha ječmene jarního 341 220 hektarů s výnosem 4,64 t/ha. Do roku 2019 se tato plocha snížila na 211 876 hektarů, avšak výnos se zvýšil na 5,07 t/ha (Český statistický úřad 2020).

3.3.1 Požadavky na prostředí

Ječmen jarní dle Zimolky et al. (2006) nemá na prostředí příliš vyhraněné požadavky, z tohoto důvodu je možné jej úspěšně pěstovat ve velmi rozdílných podmínkách. Jiná situace je ovšem u jednotlivých užitkových směrů, zaměřených na produkci zrna s určitými znaky nebo parametry jakosti. Těmto požadavkům je nutné přizpůsobit i výběr vhodných agroekologických podmínek (nejnáročnější je z tohoto pohledu ječmen sladovnický či množitelský). Produkce kvalitního jarního ječmene určeného na slad je soustředěna v úrodných rajonech řeparské oblasti, kde převažují půdy typu černozem i hnědozem (v polohách do 250 m n. m.). Tento fakt souvisí s vhodnými podmínkami pro pěstování řepy cukrové, která je v těchto oblastech tradičně pěstována a současně je také vhodnou předplodinou pro ječmen sladovnický (jedná se o nejintenzivnější oblasti ČR – Polabí a Haná). Kukuřičná výrobní oblast (vyjma extrémně suchých a teplých rajonů, kde je ječmen jarní vystaven riziku zaschnutí porostů s negativními důsledky na výnos zrna) je rovněž vyhovující. V této oblasti je tedy s některými výhradami

vhodnou předplodinou kukuřice. V důsledku aridizace území se sladovnický ječmen daří pěstovat i v oblasti obilnářské.

Jarní ječmen je citlivý na utužení půdy a na kyselou půdní reakci, na což reaguje následným snížením výnosu i zhoršením jakosti. Tato skutečnost vyžaduje obezřetnost při výběru stanoviště, tedy vyloučení kyselých půd a použití opatření ke zlepšení pH, např. vápnění půd. V řepařské a kukuřičné oblasti by se půdní reakce měla pohybovat v rozmezí 6,2 až 7,2 pH, v oblasti obilnářské a bramborářské 5,8 až 6,2 pH. Sladovnický ječmen není vhodné pěstovat na pozemcích, kde se často vyskytuje mlha a rosa či na pozemcích zaplevelených pýrem, pcháčem osetem, ovšem hluchým a na půdách s kolísajícím vláhovým průměrem. Vyjma půdních podmínek mají výrazný vliv i podmínky klimatické, zvláště pak aktuální průběh počasí v daném roce, a to jak na výnos zrna, tak i na jeho kvalitu.

3.3.2 Zpracování půdy k jarnímu ječmeni

Ječmen jarní je rostlina náročná na dobrý fyzikální i strukturální stav půdy, dostatek vzduchu, pohotových živin v půdě a dodržení agrotechnického termínu setí. V současné době je pro ječmen jarní široký výběr technologických postupů zpracování půdy a zakládání porostů. U ječmene jarního je možné využít tradiční technologie zpracování půdy i minimalizační technologie s kypřením půdy talířovými či radličkovými kypřiči. V našich podmínkách má nejvyšší využití tradiční technologie s mělkou orbou do hloubky 15–18 cm. Po předplodinách, které zanechávají strniště, předchází orbě podmítka. Ta se provádí talířovými či radličkovými podmítači do hloubek 6-12 cm v co nejkratší době po sklizni. Při porovnání tradiční orebné technologie s minimalizačními technologiemi je v nevýhodě tradiční technologie s orbou z důvodu vyšší energetické i pracovní náročnosti. Možnost uplatnění minimalizační technologie u ječmene jarního závisí na stanovištních podmínkách. Nejvhodnější podmínky pro tuto technologii jsou na středně těžkých strukturálních půdách. Také je vhodné použít minimalizační technologie po dobrých předplodinách, jako jsou cukrovka či brambory (Procházková 2006).

3.3.3 Zařazení v osevním postupu

U obilnin, tedy i u ječmene jarního, dochází po jejich opakovaném pěstování po několik let (tzv. monokultura) k declain efektu, tedy ke změně mikroflóry a k pomalejšímu poklesu výnosů, než bylo v prvních letech. Z obilnin toleruje monokulturní pěstování nejlépe ječmen jarní.

V suchých oblastech může dojít k situaci, kdy předplodina obecně považovaná za zlepšující, jako je např. cukrová řepa, podmínky pro ječmen naopak výrazně zhorší. Cukrová řepa odebere vodu z půdy a za suché zimy se vláhové poměry zhorší. Následný rok tak ječmen jarní trpí nedostatkem vody v půdě, pomaleji vzchází a toto vše se odrazí ve výnosu (Černý 2007).

3.3.4 Výživa a hnojení ječmene jarního

Ječmen jarní je se svým mělce rozloženým kořenovým systémem plodinou, která má vysoké nároky na dostatek pohotových živin. Z tohoto důvodu je považován za plodinu staré

půdní síly, kdy využívá minerální a organická hnojiva, která byla aplikována již k předplodině. Toto platilo při osevním postupu, do kterého byly řazeny hnojem hnojené plodiny. V současné době, kdy je živočišná výroba potlačována a jeví klesající tendenci, je proto nutné postoj ke hnojení ječmene jarního přehodnotit.

Důležitou roli mají předplodiny, které je možné rozdělit do tří skupin:

- organicky hnojené okopaniny např. brambory, kukuřice, cukrovka;
- předplodiny zanechávající dostatek pohotových živin - např. řepka, hořčice, mák;
- půdu vyčerpávající předplodiny s vysokým podílem posklizňových zbytků, tj. kukuřice na zrno, ozimá pšenice.

Nejčastější předplodinou pro ječmen jarní bývají zástupci poslední skupiny, kdy se hnojení přizpůsobuje vyčerpanosti půdy.

Hnojení ječmene jarního fosforem by mělo být prováděno jako základní, přičemž se někdy posouvá na hnojení před setím nebo hnojením pod patu (Černý 2007).

Ječmen jarní je dle Richtera et al. (2006) popisován jako plodina se střední potřebou živin, kdy se na jednu tunu zrna a odpovídajícího množství slámy odčerpá 20 – 24 kg N, 3,5 – 6,2 kg P, 16,6 – 21 kg K. Optimální koncentrace P a N stimuluje v počátečních vývojových fázích tvorbu odnoží, naopak vysoké množství těchto prvků vede k poléhání a snížení výnosu i jakosti.

4 Metodika

Dlouhodobý experiment byl založen na pokusných stanicích ČZU a VÚRV v.v.i. Ruzyně v roce 1996. Pro účely této diplomové práce byla zvolena stanoviště s různými půdně-klimatickými podmínkami (Červený Újezd, Lukavec a Praha-Suchdol). Charakteristika stanovišť je patrná z Tabulky 2. Na parcelkách (60 m²) jsou pěstovány v trojhonném osevním sledu brambory (kukuřice na stanovišti Červený Újezd), ozimá pšenice a jarní ječmen. Cílem práce bylo hodnocení obsahu fosforu u jarního ječmene. V průběhu pokusu byly pěstovány následující odrůdy ječmene: Akcent (1997-2004), Calgary (2005-2011) a Xanadu (2012-2020).

Tabulka 2: Základní charakteristika pokusných stanovišť

Stanoviště	Červený Újezd	Lukavec	Praha - Suchdol
Lokalizace	50°4'22"N, 14°10'19"E	49°33'23"N, 14°58'39"E	50°7'40"N, 14°22'33"E
Nadmořská výška (m n. m.)	398	610	286
Průměrná roční teplota (°C)	7,7	7,7	9,1
Průměrné roční srážky (mm)	493	666	495
Půdní typ	hnědozem	kambizem	černozem
Půdní subtyp	modální	oglejená	modální
Půdní druh ¹⁾	prachovitá hlína	písčitá hlína	prachovitá hlína
pH ²⁾	6,74 (±0,2)	5,25 (±0,17)	7,5 (±0,10)
P ³⁾	140 (±29)	183 (±15)	79 (±10)
K ³⁾	196 (±14)	245 (±28)	236 (± 23)
Ca ³⁾	2720 (±212)	1220 (±119)	7531 (±1710)
Mg ³⁾	89 (±11)	74 (±13)	167 (±20)

¹⁾ dle NRSC USDA

²⁾ Stanoveno 0.01 mol/l CaCl₂, 1:10 w/v v archivních vzorcích (1996)

³⁾ Průměrné základní hodnoty stanovené metodou Mehlich 3 (rok 1996)

Organickými hnojivy je hnojeno pouze k první plodině v osevním sledu, proto je u brambor (kukuřice) sledováno přímé působení aplikace organických hnojiv, u ozimé pšenice a jarního ječmene působení následné. Dávky dusíku jako hlavní živiny jsou uvedeny v Tabulce 3. V téže tabulce jsou uvedeny i roční dávky fosforu, které byly v případě organických hnojiv dopočteny na základě obsahu P. Pro potřeby pokusu jsou používány čistírenské kaly z Ústřední čistírny odpadních vod Praha Troja. Živiny z minerálních hnojiv (varianty NPK a N) jsou dodávány v LAV (27,5 %), trojitým superfosfátu (21 % P) a 60 % draselné soli (50 % K).

Celý systém byl (s výjimkou nehnojené kontroly) založen na jednotné dávce dusíku tak, aby celková dávka N za 3 roky (brambory + pšenice ozimá + ječmen jarní) činila 330 kg N/ha. To platí pro organická i minerální hnojiva, popřípadě jejich kombinaci. Proto jsou při stejné

dávce dusíku hodnoceny rozdíly mezi variantami z hlediska přístupných forem fosforu v půdě a odběru P rostlinami.

Tabulka 3: Systém hnojení polního pokusu ČZU (množství živin na 1 ha)

Varianta	Brambory	Ozimá pšenice	Jarní ječmen
Kontrola	0	0	0
kal	330 kg N	0	0
	201 kg P	0	0
hnůj	330 kg N	0	0
	70 kg P	0	0
Hnůj ^{1/2} + N	165 kg N	115 kg N ¹⁾	50 kg N ¹⁾
	35 kg P		
NPK ¹⁾	120 kg N	140 kg N	70 kg N
	30 kg P	30 kg P	30 kg P
N ¹⁾	120 kg N	140 kg N	70 kg N

¹⁾ označené živiny (prvky) byly dodány v minerální formě, pokud je symbol u názvu varianty, byla celá varianta hnojena pouze minerálními hnojivy

Odběr vzorků ornice (0-30 cm) byl proveden po sklizni pšenice a ječmene v roce 2017. Byl tak zjištěn přibližný obsah různých forem fosforu na pozemku před pěstováním ječmene a následně i jeho reálný obsah po sklizni. Vzorky půd po sklizni ječmene byly provedeny ve 4 opakováních. Ornice byla usušena a přeseta přes síto s velikostí otvorů 2 mm. Pro potřeby diplomové práce byly k analýzám využity archivní vzorky půdy z roku 1996 (před založením pokusu) a posledního ukončeného cyklu osevního postupu, tj. z roku 2017.

4.1 Analytická stanovení

4.1.1 Extrakce půdy demineralizovanou vodou

Extrakty pro stanovení okamžitě přístupného fosforu byly zhotoveny metodou adaptovanou dle Luscombe et al. (1979). Ke 3 g vzorku bylo doplněno 30 ml demineralizované vody. Vzorky byly třepány 1 hodinu a následně odstředěny po dobu 5 minut při 9000 g. Vzniklé extrakty byly analyzovány.

4.1.2 Obsah fosforu v půdě stanovený metodou CAD

Obsah fosforu byl rovněž stanoven dle normy EN 13651. Tato evropská norma je určena pro stanovení živin a prvků extrahovatelných chloridem vápenatým/DTPA (diethylentriaminpentaocetová kyselina). Půda byla extrahována roztokem 0,01 mol/l a 0,002 mol/l DTPA v poměru 1:10 (3 g půdy/30 ml roztoku CAD). Po 1 hodině třepání byly vzorky zfiltrány. Fosfor byl měřen ve vzniklých extraktech.

4.1.3 Obsah fosforu stanovený metodou Mehlich 3

Ke stanovení obsahu potenciálně přístupného fosforu byl použit extrakční roztok Mehlich 3 (Mehlich, 1984) složený z CH₃COOH (0,2 mol/l), NH₄F (c=0,015 mol/l), HNO₃

($c=0,013$ mol/l), NH_4NO_3 ($c=0,25$ mol/l) a EDTA ($c=0,001$ mol/l). Poměr zeminy a vyluhovadla činil 1:10 (3 g zeminy, 30 ml vyluhovadla). Třepání probíhalo po dobu 10 minut. Získaný roztok byl filtrován a následně měřen na obsah P.

4.1.4 Stanovení obsahu reziduálního fosforu lučavkou královskou

Reziduální obsah P zahrnuje i formy fosforu, které jsou rostlinám prakticky nedostupné. Vzhledem k tomu, že jsou obsahy této formy fosforu v jednotlivých sezónách udávány jako málo variabilní, byla provedena pouze extrakce archivních vzorků z roku 1996 a vzorků půd po sklizni ječmene. Postup byl proveden dle normy ISO 11466:1995, tedy ve stručnosti: 1 g vzorku byl extrahován 10 ml roztoku lučavky královské (konc. HCl a konc. HNO_3 v poměru 3:1) za pomoci nízkotlakého mikrovlnného rozkladu po dobu 40 minut. Výsledné extrakty byly kvantitativně převedeny do 25ml zkumavek a následně měřeny na obsah P.

4.1.5 Měření obsahu P ve výluzích

Všechna měření obsahu fosforu v získaných výluzích byla realizována na optickém emisním spektrometru s indukčně vázaným plazmatem (ICP-OES, Varian Vista-Pro, Mulgrave, Austrálie).

4.1.6 Výnosy rostlin

Na všech stanovištích jsou každoročně monitorovány výnosy zrna a slámy ječmene jarního. Podle odběrových normativů uváděných dle Klír et al. (2008), tj. 3,5 kg P na 1 t výnosu zrna a 1 kg P na 1 t výnosu slámy, je tak možné orientačně dopočítat odběr fosforu sklizní.

4.2 Statistické vyhodnocení

Pro statistické vyhodnocení byly využity základní popisné charakteristiky, časové řady a výpočty bilancí fosforu v programu Microsoft Excel (Excel 2019). Vzorky půdy po sklizni ječmene byly odebírány ve 4 opakováních, a proto bylo možno kromě popisných charakteristik realizovat i analýzu variance (ANOVA, Tukey test při $p<0,05$) v programu STATISTICA (STATISTICA 12, 2021).

5 Výsledky

5.1 Výsledky rozborů půd

5.1.1 Extrakce půdy demineralizovanou vodou

Červený Újezd

V roce 1996, tedy před založením pokusu, se průměrné hodnoty pohybovaly v rozmezí od 11,2 do 16,8 mg/kg (Tabulka 4) a zároveň směrodatné odchylky u jednotlivých variant nepřesahovaly 3,79.

V Tabulce 4 jsou rovněž uvedeny obsahy vodorozpustného P před pěstováním a po pěstování ječmene v roce 2017. Po sklizni ječmene byly vzorky odebrány vždy ve 4 opakováních, z tohoto důvodu bylo možné provést statistické vyhodnocení. Obsah fosforu byl po sklizni průkazně nejvyšší u varianty NPK. Dále následovala varianta Hnůj a Kal. Nejméně fosforu po kontrolní variantě obsahovala varianta N, ovšem i zde byl obsah P v porovnání s kontrolou průkazně vyšší. V Tabulce 4 jsou také uvedeny rozdíly obsahu fosforu při založení pokusu a po sklizni v roce 2017; zde došlo ke snížení obsahu P v půdě u Kontroly, u varianty N, dále i u varianty Hnůj + N. K mírnému snížení obsahu P došlo také u varianty NPK.

Tabulka 4: Hodnocení obsahů okamžitě přístupného P v půdě (vodný výluh; v mg/kg)

Varianta	Rok 1996	Rok 2017		Rozdíl 2017-1996	
		Před ječmenem	Po ječmeni	Před ječmenem	Po ječmeni
Kontrola	11,6 (±1,22)	5,80	5,50 ^c	-5,81	-6,07
Kal	11,2 (±0,62)	16,9	11,8 ^a	5,71	0,67
Hnůj	11,6 (±1,65)	15,7	12,6 ^{ab}	4,10	1,01
Hnůj + N	16,8 (±1,20)	10,8	11,1 ^a	-5,99	-5,72
N	14,8 (±1,73)	6,70	9,80 ^a	-8,09	-4,96
NPK	16,4 (±3,79)	16,9	15,2 ^b	0,52	-1,20

Rozdílná písmena u variant znamenají statisticky průkazný rozdíl mezi variantami (Tukey, $p < 0.05$)

Lukavec

Průměrné hodnoty se před založením pokusu pohybovaly mezi 8,42-9,96 mg/kg (Tabulka 5). Směrodatné odchylky u jednotlivých variant nepřesahovaly 1,84. V tabulce jsou uvedeny obsahy vodorozpustného fosforu před pěstováním i po pěstování ječmene v roce 2017. Po sklizni byl obsah fosforu průkazně nejvyšší u varianty Hnůj. Poté následovala varianta Kal. U obou těchto variant byl naměřen průkazně vyšší obsah fosforu ve srovnání s Kontrolou. V tabulce je také uveden rozdíl mezi obsahem fosforu při založení pokusu a obsahem fosforu v roce 2017. Došlo zde ke zvýšení obsahu P u variant Kal a Hnůj, k výraznému snížení došlo u varianty N.

Tabulka 5: Hodnocení obsahu okamžitě přístupného P v půdě (vodný výluh; v mg/kg)

Varianta	Rok 1996	Rok 2017		Rozdíl 2017-1996	
		Před ječmenem	Po ječmeni	Před ječmenem	Po ječmeni
Kontrola	8,42(±1,32)	8,63	7,02 ^{ab}	0,21	-1,40
Kal	8,62(±0,77)	15,9	15,7 ^c	7,25	7,06
Hněj	9,11(±1,84)	12,8	20,4 ^d	3,69	11,3
Hněj + N	9,13(±0,91)	9,74	8,95 ^a	0,62	-0,18
N	9,96(±0,75)	6,80	5,40 ^b	-3,15	-4,56
NPK	9,90(±1,32)	14,4	9,82 ^a	4,49	-0,08

Rozdílná písmena u variant znamenají statisticky průkazný rozdíl mezi variantami (Tukey, $p < 0.05$)

Suchdol

Průměrné hodnoty z roku 1996 před založením pokusu se pohybovaly mezi 3,11-5,91 mg/kg (tabulka 6), přičemž směrodatné odchylky u jednotlivých variant nepřesahovaly 2,29. Vzhledem k tomu, že u vodného výluhu lze předpokládat vysokou variabilitu hodnot, nejsou tato data vhodná pro určení celkové variability stanoviště z hlediska vhodnosti pro založení pokusu.

V tabulce jsou dále uvedeny obsahy vodorozpustného P před pěstováním a po pěstování ječmene v roce 2017. Obsah fosforu byl po sklizni průkazně nejvyšší u varianty Kal. Následovala varianta Hněj. I zde byl naměřen vyšší obsah P ve srovnání s kontrolou. Byl rovněž vypočten rozdíl mezi obsahem fosforu při založení pokusu a obsahem P v roce 2017. Zde došlo podle předpokladu ke zvýšení obsahu P v půdě u varianty Kal, naopak ke snížení u Kontroly a minerálního N.

Tabulka 6: Hodnocení obsahu okamžitě přístupného P v půdě (vodný výluh; v mg/kg)

Varianta	Rok 1996	Rok 2017		Rozdíl 2017-1996	
		Před ječmenem	Po ječmeni	Před ječmenem	Po ječmeni
Kontrola	5,91 (±2,29)	3,76	3,70 ^{ab}	-2,15	-2,21
Kal	4,08 (±1,10)	8,03	10,1 ^c	3,95	6,01
Hněj	4,16 (±1,77)	4,44	6,18 ^b	0,28	2,02
Hněj + N	3,38 (±1,46)	2,00	2,99 ^a	-1,38	-0,38
N	4,81 (±1,36)	1,18	2,57 ^a	-3,63	-2,24
NPK	3,11 (±1,25)	2,71	3,68 ^a	-0,40	0,57

Rozdílná písmena u variant znamenají statisticky průkazný rozdíl mezi variantami (Tukey, $p < 0.05$)

5.1.2 Obsah fosforu v půdě stanovený výluhem CAD

Červený Újezd

Dle Tabulky 7 se průměrné hodnoty před založením pokusu pohybovaly mezi 79,1-124 mg/kg. Směrodatné odchylky nepřesahovaly hodnotu 10,3. Po sklizni ječmene byl obsah P

průkazně nejvyšší u varianty Kal, dále u varianty NPK a u varianty Hnůj. U těchto variant byl naměřen průkazně vyšší obsah P než u Kontroly. Výrazný pokles obsahu P nastal u varianty Hnůj + N, u varianty N a u Kontroly. Ke zvýšení obsahu P došlo pouze u variant Kal, Hnůj a NPK.

Tabulka 7: Hodnocení obsahů okamžitě přístupného P v půdě (CAD; v mg/kg)

Varianta	Rok 1996	Rok 2017		Rozdíl 2017-1996	
		Před ječmenem	Po ječmeni	Před ječmenem	Po ječmeni
Kontrola	79,1(±1,06)	53,6	50,0 ^d	-25,5	-29,1
Kal	82,3(±2,24)	160,0	116 ^b	77,7	34,1
Hnůj	91,9(±9,61)	121	103 ^{ab}	28,9	11,5
Hnůj + N	124(±10,31)	80,9	95,2 ^{ac}	-42,9	-28,7
N	107(±11,45)	55,2	83,7 ^c	-51,5	-23,0
NPK	95,7(±62,61)	104	107 ^{ab}	8,09	11,7

Rozdílná písmena u variant znamenají statisticky průkazný rozdíl mezi variantami (Tukey, $p < 0.05$)

Lukavec

V roce 1996, před založením pokusu, se průměrné hodnoty fosforu stanoveného metodou CAD pohybovaly v rozmezí od 51,2 do 61,3 mg/kg (Tabulka 8) a zároveň směrodatné odchylky u jednotlivých variant nepřesahovaly 13,5.

Dále jsou v Tabulce 5 uvedeny obsahy P před pěstováním a po pěstování ječmene v roce 2017. Obsah fosforu byl po sklizni průkazně nejvyšší u varianty Kal, následovaný variantou Hnůj. Hodnoty u ostatních variant byly průkazně nižší a od Kontroly se příliš nelišily. V tabulce jsou také uvedeny rozdíly obsahu fosforu při založení pokusu a po sklizni v roce 2017, zde došlo ke snížení obsahu P v půdě u všech variant s výjimkou varianty Kal.

Tabulka 8: Hodnocení obsahů okamžitě přístupného P v půdě (CAD; v mg/kg)

Varianta	Rok 1996	Rok 2017		Rozdíl 2017-1996	
		Před ječmenem	Po ječmeni	Před ječmenem	Po ječmeni
Kontrola	51,8(±6,8)	40,8	44,5 ^a	-11,0	-7,25
Kal	55,2(±5,9)	114	134 ^c	58,5	78,8
Hnůj	51,2(±2,8)	49,6	48,9 ^b	-1,61	-2,33
Hnůj + N	61,3(±13,5)	48,0	45,0 ^a	-13,4	-16,4
N	56,9(±2,5)	43,6	34,7 ^a	-13,3	-22,2
NPK	56,6(±5,1)	89,5	55,6 ^a	33,0	-1,02

Rozdílná písmena u variant znamenají statisticky průkazný rozdíl mezi variantami (Tukey, $p < 0.05$)

Suchdol

Průměrné hodnoty z roku 1996 před založením pokusu se pohybovaly mezi 4,20-9,91 mg/kg (Tabulka 9), přičemž směrodatné odchylky u jednotlivých variant nepřesahovaly 2,59.

Obsah fosforu byl po sklizni průkazně nejvyšší u varianty Kal, následovala varianta Hnůj, kde však byly hodnoty rovněž podobné Kontrolě. Ostatní varianty se rovněž blížily Kontrolě, zpravidla pak s nižšími hodnotami. Byl rovněž vypočten rozdíl v mezi obsahem fosforu při založení pokusu a obsahem P v roce 2017. Zde došlo podle předpokladu ke zvýšení obsahu P v půdě u varianty Kal i Hnůj, ale naopak ke snížení u Kontroly a minerálního N.

Tabulka 9: Hodnocení obsahů okamžitě přístupného P v půdě (CAD; v mg/kg)

Varianta	Rok 1996	Rok 2017		Rozdíl 2017-1996	
		Před ječmenem	Po ječmeni	Před ječmenem	Po ječmeni
Kontrola	9,91(±2,59)	8,3	8,9 ^{ab}	-1,57	-0,98
Kal	5,02(±0,41)	9,5	14,1 ^c	4,48	9,09
Hnůj	4,99(±1,07)	5,2	8,6 ^b	0,24	3,60
Hnůj + N	4,32(±0,98)	2,5	4,0 ^a	-1,82	-0,30
N	7,00(±1,39)	2,2	4,1 ^a	-4,75	-2,91
NPK	4,20(±1,03)	3,1	4,7 ^a	-1,08	0,50

Rozdílná písmena u variant znamenají statisticky průkazný rozdíl mezi variantami (Tukey, $p < 0.05$)

5.1.3 Obsah fosforu v půdě stanovený metodou Mehlich 3

Červený Újezd

Průměrné hodnoty se před založením pokusu pohybovaly mezi 113-165 mg/kg (Tabulka 10). Směrodatné odchylky u jednotlivých variant nepřesahovaly 17,3. Po sklizni byl obsah fosforu průkazně nejvyšší u varianty Kal. Poté následovala varianta NPK, u které byl naměřen průkazně vyšší obsah fosforu v porovnání s variantou Kontrola, také varianty Hnůj i Hnůj + N jsou průkazně vyšší než varianta Kontrola. V tabulce je také uveden rozdíl mezi obsahem fosforu při založení pokusu a obsahem fosforu v roce 2017. Došlo zde ke zvýšení obsahu P u variant Kal a Hnůj, ke snížení došlo u všech zbylých variant.

Tabulka 10: Hodnocení obsahů okamžitě přístupného P v půdě (Mehlich 3; v mg/kg)

Varianta	Rok 1996	Rok 2017		Rozdíl 2017-1996	
		Před ječmenem	Po ječmeni	Před ječmenem	Po ječmeni
Kontrola	113(±1,26)	89	85 ^c	-24,2	-28,5
Kal	123(±6,96)	245	197 ^d	122	74,7
Hněj	123(±14,5)	176	148 ^{ab}	53,2	25,2
Hněj + N	161(±16,7)	134	135 ^{ab}	-27,4	-26,4
N	145(±17,3)	97	119 ^{ac}	-48,5	-25,8
NPK	165(±7,17)	170	158 ^b	5,01	-7,64

Rozdílná písmena u variant znamenají statisticky průkazný rozdíl mezi variantami (Tukey, $p < 0.05$)

Lukavec

V roce 1996, před založením pokusu, se průměrné hodnoty pohybovaly v rozmezí od 172 do 194 mg/kg (Tabulka 11) a zároveň směrodatné odchylky u jednotlivých variant nepřesahovaly 32.

Dále jsou v tabulce 11 uvedeny obsahy P před pěstování a po pěstování ječmene v roce 2017. Obsah fosforu byl po sklizni průkazně nejvyšší u variant Kal a Hněj. Nejméně fosforu obsahovala varianta N, kde byly hodnoty v porovnání s Kontrolou nižší, avšak ze statistického hlediska podobné.

V tabulce jsou také uvedeny rozdíly obsahu fosforu při založení pokusu a po sklizni v roce 2017, zde došlo k nejvýraznějšímu snížení obsahu P v půdě u Kontroly a u varianty N. Ke zvýšení obsahu P došlo u variant Kal a Hněj.

Tabulka 11: Hodnocení obsahů okamžitě přístupného P v půdě (Mehlich 3; v mg/kg)

Varianta	Rok 1996	Rok 2017		Rozdíl 2017-1996	
		Před ječmenem	Po ječmeni	Před ječmenem	Po ječmeni
Kontrola	176(±32,2)	162	138 ^a	-14,4	-37,8
Kal	172(±17,7)	308	266 ^b	136	93,7
Hněj	178(±7,95)	184	205 ^b	6,86	27,5
Hněj + N	189(±5,57)	150	137 ^a	-39,8	-52,4
N	194(±3,56)	140	117 ^a	-54,5	-77,7
NPK	186(±14,9)	237	161 ^a	50,5	-25,1

Rozdílná písmena u variant znamenají statisticky průkazný rozdíl mezi variantami (Tukey, $p < 0.05$)

Suchdol

Průměrné hodnoty z roku 1996 před založením pokusu se pohybovaly mezi 66,8-102 mg/kg (Tabulka 12), přičemž směrodatné odchylky u jednotlivých variant nepřesahovaly 9,87.

V tabulce jsou dále uvedeny obsahy P před pěstováním a po pěstování ječmene v roce 2017. Obsah fosforu byl po sklizni průkazně nejvyšší u varianty Kal. Ostatní varianty se blížily Kontrolě, zpravidla s nižším obsahem P. Byl rovněž vypočten rozdíl v mezi obsahem fosforu při založení pokusu a obsahem P v roce 2017. Zde došlo podle předpokladu ke zvýšení obsahu P v půdě u variant Kal a Hnůj, ale naopak ke snížení u Kontroly a minerálního N.

Tabulka 12: Hodnocení obsahů okamžitě přístupného P v půdě (Mehlich 3; v mg/kg)

Varianta	Rok 1996	Rok 2017		Rozdíl 2017-1996	
		Před ječmenem	Po ječmeni	Před ječmenem	Po ječmeni
Kontrola	102(±5,45)	102	85 ^{ab}	0,31	-17,03
Kal	70,5(±3,19)	168	188 ^c	97,3	118
Hnůj	74,9(±5,07)	88	107 ^b	13,0	31,7
Hnůj + N	69(±9,87)	68	68 ^a	-0,92	-1,00
N	78,3(±5,10)	79	76 ^{ab}	1,08	-2,11
NPK	66,8(±3,01)	68	74 ^{ab}	1,36	7,26

Rozdílná písmena u variant znamenají statisticky průkazný rozdíl mezi variantami (Tukey, $p < 0.05$)

5.1.4 Obsah reziduálního fosforu stanoveného lučavkou královskou

Červený Újezd

Průměrné hodnoty z roku 1996 před založením pokusu se pohybovaly mezi 441-660 mg/kg (Tabulka 13), přičemž směrodatné odchylky u jednotlivých variant nepřesahovaly 174.

Tabulka 13 uvádí obsahy vodorozpustného P před a po pěstování ječmene v roce 2017. Po sklizni byl obsah fosforu průkazně nejvyšší u varianty NPK, následně u varianty Kal. U varianty N jsou hodnoty ve srovnání s Kontrolou nižší.

Tabulka 13: Hodnocení obsahů okamžitě přístupného P v půdě (Lučavka; v mg/kg)

Varianta	Rok 1996	Rok 2017	Rozdíl 2017-1996
		Po ječmeni	
Kontrola	560(±78,0)	610	50,3
Kal	580(±86,6)	845	265
Hnůj	584(±100)	739	155
Hnůj + N	660(±101)	772	113
N	645(±166)	683	38,4
NPK	441(±174)	723	283

Lukavec

V roce 1996, před založením pokusu, se průměrné hodnoty pohybovaly v rozmezí od 884 do 1002 mg/kg (Tabulka 14) a zároveň směrodatné odchylky u jednotlivých variant nepřesahovaly 258.

V tabulce 14 jsou uvedeny obsahy vodorozpustného P před pěstováním i po pěstování ječmene v roce 2017. Průkazně nejvyšší obsah fosforu v půdě byl po sklizni ječmene v roce 2017 u varianty Kal. U variant N a Hnůj + N byla zaznamenána dokonce záporná bilance.

Tabulka 14: Hodnocení obsahů okamžitě přístupného P v půdě (Lučavka; v mg/kg)

Varianta	Rok 1996	Rok 2017	Rozdíl 2017-1996
		Po ječmeni	
Kontrola	884(±44,8)	927	42,9
Kal	1002(±35,2)	1452	450
Hnůj	986(±31,5)	1081	94,9
Hnůj + N	934(±22,6)	870	-63,7
N	970(±258)	869	-101
NPK	918(±250)	918	0,40

Suchdol

Průměrné hodnoty z roku 1996 před založením pokusu se pohybovaly mezi 797-888 mg/kg (Tabulka 15), přičemž směrodatné odchylky u jednotlivých variant nepřesahovaly 201.

Tabulka 15 uvádí obsahy vodorozpustného P před pěstováním a po pěstování ječmene v roce 2017. Po sklizni byl obsah fosforu průkazně nejvyšší u varianty Kal, dále u varianty Hnůj. U variant NPK a kontrolní varianty byla zaznamenána záporná bilance reziduálního fosforu.

Tabulka 15: Hodnocení obsahů okamžitě přístupného P v půdě (Lučavka; v mg/kg)

Varianta	Rok 1996	Rok 2017	Rozdíl 2017-1996
		Po ječmeni	
Kontrola	869(±37,6)	818	-51,7
Kal	888(±37,9)	1231	342
Hnůj	798(±21,9)	955	157
Hnůj + N	797(±18,8)	784	-12,2
N	842(±201,8)	890	47,7
NPK	823(±193,5)	770	-52,9

5.2 Výnosy ječmene a odběr fosforu

Červený Újezd

Z Tabulky 16 vyplývá, že průměrné výnosy zrna i průměrné odběry fosforu zrnem byly nejvyšší u varianty NPK. Stejně tak průměrné výnosy slámy i průměrné odběry P slámou byly nejvyšší u téže varianty. Průměrné výnosy zrna i průměrné odběry fosforu zrnem byly naopak

nejnižší u varianty Kontrola. Stejně tak průměrné výnosy slámy i průměrné odběry P slámou byly nejnižší u této varianty.

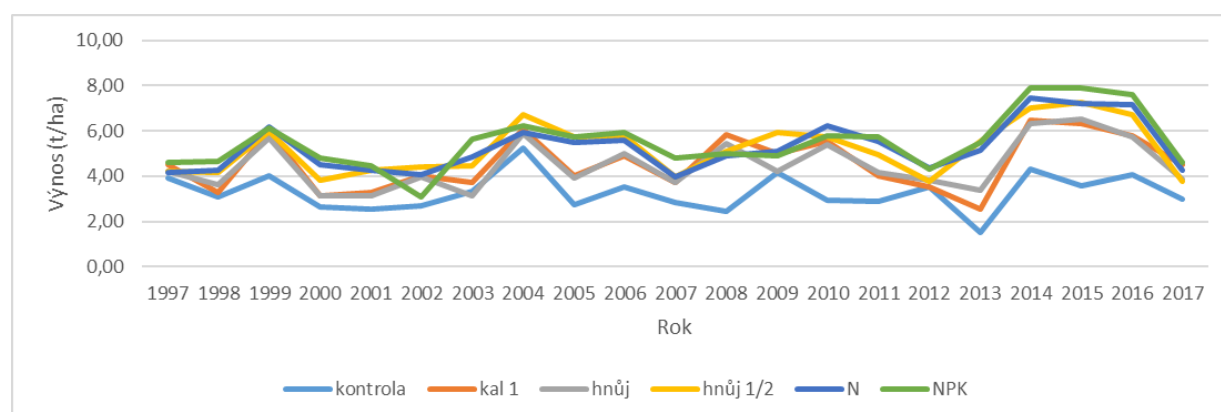
Celkové odběry P zrnem i slámou za dobu pokusu byly nejvyšší u varianty NPK a nejnižší u Kontroly.

Záporná bilance P byla zaznamenána u variant N, Kontrola, Hnůj + N, naopak k výraznému zvýšení došlo u varianty Kal.

Tabulka 16: Výnosy zrna a slámy ječmene a odběr fosforu

Varianty	Průměrné výnosy zrna 1996-2017 (t/ha)	Průměrné výnosy slámy 1996-2017 (t/ha)	Průměrné odběry P zrnem (kg/ha)	Průměrné odběry P slámou (kg/ha)	Celkový odběr P zrnem + slámou za dobu pokusu (kg /ha)	Vstup P hnojiv 1996-2017 v (kg/ha)	Výsledná bilance P (kg/ha)
Kontrola	3,29	2,45	11,5	2,45	293	0	-293
Kal	4,58	3,04	16,0	3,04	400	1407	1007
Hnůj	4,48	3,00	15,7	3,00	393	490	97
Hnůj + N	5,20	3,81	18,2	3,81	463	245	-218
N	5,27	3,91	18,4	3,91	469	0	-469
NPK	5,49	4,11	19,2	4,11	490	600	110

V grafu 1 jsou znázorněny celkové výnosy zrna z různých variant hnojení mezi lety 1997–2017 na stanovišti Červený újezd. Z grafu vyplývá, že výnosy zrna ani v jedné z variant hnojení nepřesáhly 8 t/ha a neklesly pod 1,54 t/ha. Z grafu 1 je dále evidentní, že výnosy na kontrolní nehnojené variantě jsou zpravidla nižší než u ostatních variant. Nejvyšších výnosů bylo naopak zpravidla dosahováno u varianty NPK. Variabilitu v rámci jednotlivých let ovlivnily jednak povětrnostní podmínky, a pravděpodobně i odrůdy zvolené pro daný cyklus.



Graf 1: Výnos zrna ječmene v t/ha přepočítaný na 85 % sušiny (Červený Újezd)

Lukavec

Z Tabulky 17 vyplývá, že průměrné výnosy zrna i průměrné odběry fosforu zrnem byly, stejně jako na stanovišti Červený Újezd, nejvyšší u varianty NPK a nejnižší u varianty Kontrola. Stejně tak průměrné výnosy slámy i průměrné odběry P slámou byly nejvyšší u varianty NPK a nejnižší u varianty Kontrola.

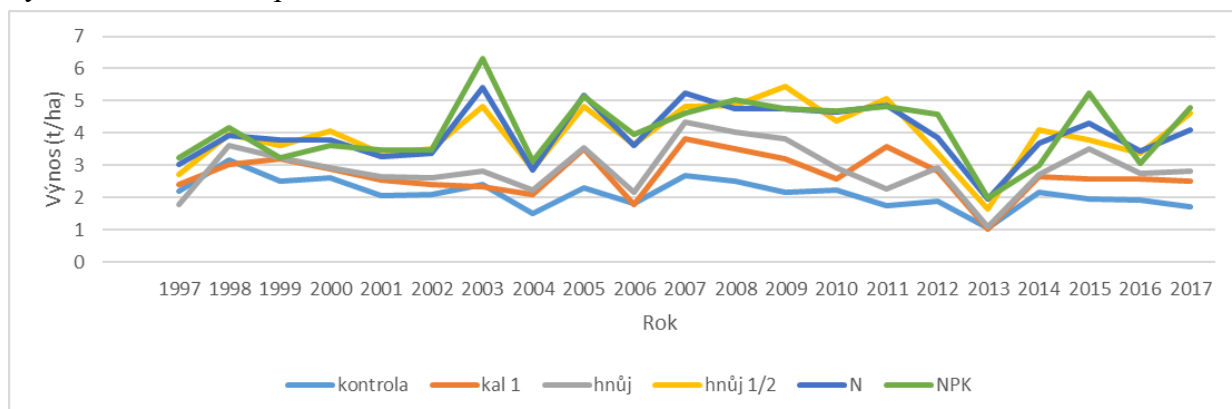
Stejná tendence je patrná i pro celkové odběry P zrnem i slámou.

Záporná bilance fosforu byla zjištěna u variant N, Kontrola, Hnůj + N. Naopak k výraznému bilančnímu nárůstu došlo u varianty Kal.

Tabulka 17: Výnosy zrna a slámy ječmene a odběr fosforu

Varianty	Průměrné výnosy zrna 1996-2017 (t/ha)	Průměrné výnosy slámy 1996-2017 (t/ha)	Průměrné odběry P zrnem (kg/ha)	Průměrné odběry P slámou (kg/ha)	Celkový odběr P zrnem + slámou za dobu pokusu (kg /ha)	Vstup P hnojiv 1996-2017 v (kg/ha)	Výsledná bilance P (kg/ha)
Kontrola	2,13	2,33	7,46	2,33	205	0	-205
Kal	2,72	2,49	9,50	2,49	252	1407	1155
Hnůj	2,89	3,21	10,1	3,21	280	490	210
Hnůj + N	3,95	3,49	13,8	3,49	363	245	-118
N	4,00	3,46	14,0	3,46	366	0	-366
NPK	4,11	3,79	14,4	3,79	382	600	218

V grafu 2 jsou znázorněny celkové výnosy zrna z různých variant hnojení mezi lety 1997 – 2017 na stanovišti Lukavec. Z grafu vyplývá, že výnosy zrna ani v jedné z variant hnojení nepřesáhly 3,32 t/ha a neklesly pod 1,02 t/ha. Z grafu 2 je evidentní, že varianta Kontrola je nižší než zbylé varianty. Z grafu všech typu variant hnojení je patrná souvislost celkového výnosu zrna v t/ha a počasí.



Graf 2: Výnos zrna ječmene v t/ha přepočítaný na 85 % sušiny (Lukavec)

Suchdol

Z Tabulky 18 vyplývá, že průměrné výnosy zrna i průměrné odběry fosforu zrnem byly opět nejvyšší u varianty NPK. Průměrné výnosy slámy, a proto i průměrné odběry P slámou byly tentokrát nejvyšší u varianty N. Průměrné výnosy zrna i průměrné odběry fosforu zrnem byly nejnižší u varianty Kontrola. Stejně tak průměrné výnosy slámy i průměrné odběry P slámou byly nejnižší u této varianty.

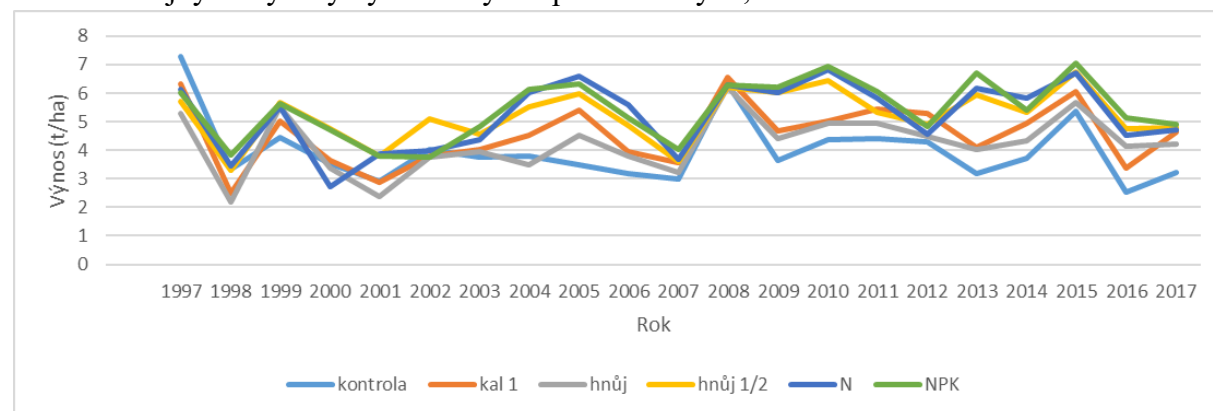
Celkové odběry P zrnem i slámou za dobu pokusu byly nejvyšší u varianty NPK a nejnižší u Kontroly.

Záporná bilance fosforu byla zaznamenána nejen u variant N a Kontrola, ke kterým nebyl aplikován P, ale i u varianty Hnůj + N. Varianta Kal naopak vykazovala kladnou bilanci P, přesahující stejně jako u ostatních stanovišť 1000 kg P/ha.

Tabulka 18: Výnosy zrna a slámy ječmene a odběr fosforu

Varianty	Průměrné výnosy zrna 1996-2017 (t/ha)	Průměrné výnosy slámy 1996-2017 (t/ha)	Průměrné odběry P zrnem (kg/ha)	Průměrné odběry P slámou (kg/ha)	Celkový odběr P zrnem + slámou za dobu pokusu (kg /ha)	Vstup P hnojiv 1996-2017 v (kg/ha)	Výsledná bilance P (kg/ha)
Kontrola	3,99	2,30	14,0	2,30	342	0	-342
Kal	4,55	2,80	15,9	2,80	394	1407	1013
Hnůj	4,24	2,80	14,8	2,80	370	490	120
Hnůj + N	5,21	3,33	18,2	3,33	453	245	-208
N	5,21	3,41	18,2	3,41	454	0	-454
NPK	5,42	3,33	19,0	3,33	468	600	132

V grafu 3 jsou znázorněny celkové výnosy zrna z různých variant hnojení mezi lety 1997-2017 na stanovišti Suchdol. Z grafu 3 vyplývá, že výnosy zrna se pohybovaly v rozmezí 2,19-7,29 t/ha. Stejně jako u předchozích stanovišť jsou zde patrné rozdíly u jednotlivých variant v různých rocích. Ty byly způsobeny různými povětrnostními podmínkami a pravděpodobně i odrudou ječmene. I přesto bylo zpravidla nejnižších výnosů dosaženo na kontrolní nehnojené variantě. Nejvyšší výnosy vykazovaly naopak varianty N, NPK i Kal.



Graf 3: Výnos zrna ječmene v t/ha přepočítaný na 85 % sušiny (Suchdol)

6 Diskuse

6.1 Výsledky rozborů půd

Tato diplomová práce vychází z dlouhodobého experimentu, který je založen na třech stanovištích s různými půdně-klimatickými podmínkami (Červený Újezd, Lukavec a Praha-Suchdol). Na těchto parcelkách jsou pěstovány v trojhonném osevním sledu brambory (kukuřice na stanovišti Červený Újezd), ozimá pšenice a jarní ječmen.

Diplomová práce hodnotí vliv různých systémů hnojení na obsah různých forem fosforu v půdě, výnos jarního ječmene a odběr fosforu touto plodinou. Je zde zahrnuta varianta kontrolní (nehnojená), varianta hnojená čistírenskými kaly, varianta hnojená hnojem, varianta hnojená polovičním množstvím hnoje spolu s minerálním dusíkem, dále je zde zahrnuta varianta hnojená minerálním NPK a varianta hnojená minerálním N. Tyto varianty jsou hodnoceny po 21 letech trvání pokusu.

Marschner (2012) uvádí, že celkový obsah P závisí na typu a textuře půdy a pohybuje se v rozmezí mezi 0,01 % až 0,20 %. Z výsledků diplomové práce je patrné podobné rozmezí, které činí 0,04 % až 0,10 %.

Vyšší obsah fosforu obvykle vykazují půdy, které obsahují více organické hmoty, zatímco v půdách lehkých a s nízkým obsahem organické hmoty je obsah fosforu nízký (Vaněk et al. 2016). Fosfor je v půdě nepříliš pohyblivý a jeho obsah v půdním roztoku je nízký (Čermák et al. 2018). Značná část celkového množství P v půdách je pro rostliny nepřijatelná, tj. pevně vázaná, nebo slouží jako zdroj pro výživu půdních mikroorganismů. V půdě je fosfor obsažen v minerálních i organických formách (Sharpley 1995; Prášková & Němec 2016). Toto potvrzují i výsledky diplomové práce u varianty Kontrola, kdy na stanovišti Červený Újezd tvořil obsah reziduálního fosforu v půdě 98 %, na stanovišti Lukavec 99,1 % a na stanovišti Suchdol 99 %. Zbývající přijatelnou část pak tvoří sloučeniny fosforu, které jsou potencionálním zdrojem pro rostlinnou výživu (Čermák et al. 2018). Větší část fosforu přístupného pro rostliny se nachází ve svrchní vrstvě půdy (cca do 20 cm), z této vrstvy rostlina přijímá největší množství fosforu (Barber et al. 1998).

Obsahy okamžitě přístupného fosforu byly stanoveny vodným výluhem a metodou CAD (0,01 mol/l CaCl_2 + DTPA). Obsah potenciálně přístupného fosforu v půdě byl stanoven metodou Mehlich 3 a obsah reziduálního fosforu lučavkou královskou. V roce 1996 se na všech třech stanovištích průměrné hodnoty obsahu fosforu stanoveného vodným výluhem pohybovaly v rozmezí 3,11-16,8 mg P/kg.

Obecně lze očekávat, že pokud nebude fosfor do půdy vracen, jeho obsah bude v půdě klesat. Tento fakt se potvrdil v našem pokusu u variant Kontrola (nehnojená). Na všech třech stanovištích (Lukavec, Červený Újezd a Suchdol) došlo ke snížení obsahu P v půdě. V roce 1996 se hodnoty obsahu fosforu stanoveného vodným výluhem pohybovaly v závislosti na stanovišti u varianty Kontrola v rozmezí 5,91 až 11,6 mg P/kg, zatímco v roce 2017 činily tyto hodnoty 3,70 až 5,5 mg P/kg. Hodnoty stanovené výluhem CAD v téže variantě byly v roce 1996 v rozmezí 9,91 až 79,1 mg P/kg a v roce 2017 jen 8,90 až 50 mg P/kg. Obsah P stanovený metodou Mehlich 3 v roce 1996 se pohyboval v rozmezí 102-176 mg P/kg. V roce 2017 byl obsah P dle předpokladu nižší, pohyboval se v rozmezí 85-138 mg/kg. Stejně pokusy vyhodnocovali po 18 letech trvání i Kulhánek et al. (2019). Rovněž z jejich výsledků je patrné

snížení obsahu fosforu na kontrolní nehnojené variantě. Na stanovištích Humpolec a Suchdol zkoumali Kulhánek et al. (2014) změnu zastoupení čtyř prvků (P, K, Ca, Mg) v půdě po aplikaci různých systémů hnojení k porovnání s kontrolní variantou. Obsahy těchto prvků byly stanoveny metodou Mehlich 3. Průměrný obsah přístupného fosforu v půdě v experimentu Kulhánek et al. (2014) činil 74 mg P/kg, což je nižší než průměrný obsah přístupného fosforu v půdě ve výsledcích diplomové práce (111,5 mg P/kg). Tito autoři uvádějí, že se obsah přístupného fosforu v půdě u kontrolní varianty (nehnojená) během pokusu téměř nezměnil.

Z výsledků všech použitých metod pro měření obsahu P v půdě vyplývá, že varianta hnojená čistírenskými kaly dosahovala nejvyšších hodnot. V roce 1996 se průměrné hodnoty (ze všech stanovišť) obsahu fosforu stanoveného vodným výluhem pohybovaly u varianty Kal 7,96 mg P/kg, zatímco v roce 2017 byl průměr těchto hodnot 12,5 mg P/kg. Průměrná hodnota stanovená výluhem CAD v téže variantě byla v roce 1996 47,5 mg P/kg a v roce 2017 88,0 mg P/kg. Průměrný obsah fosforu stanovený metodou Mehlich 3 v roce 1996 byl 122 mg P/kg. V roce 2017 byla průměrná hodnota obsahu fosforu 217 mg P/kg. Průměrný obsah fosforu stanovený lučavkou královskou v roce 1996 činil 823 mg P/kg a v roce 2017 byla průměrná hodnota obsahu fosforu 1176 mg P/kg. K podobnému výsledku dospěli Kulhánek et al. (2014) už po 15 letech trvání pokusu, kde naměřili počáteční obsah fosforu v půdě 75,5 mg P/kg. Pokus byl situován na dvou stanovištích a obsah fosforu byl stanoven metodou Mehlich 3. Od založení pokusu v roce 1996 do roku 2011 obsah fosforu v půdě po aplikaci čistírenských kalů vzrostl o 135 %. Vzrůstající tendence obsahu fosforu v půdě ve variantě Kal je zřejmá z výsledků této diplomové práce, kde průměrný obsah fosforu v půdě stanovený metodou Mehlich 3 vzrostl po 21 letech dokonce o 178 %. K výsledkům, kde je výrazně vyšší pozitivní bilance obsahu fosforu v půdě po aplikaci čistírenských kalů v porovnání s ostatními variantami hnojení (hnůj, NPK, N), dospěli taktéž Kulhánek et al. (2019), kdy po 18 letech trvání téhož pokusu byla bilance fosforu v půdě vyšší v průměru o 76,7 mg P/kg. Obsah fosforu byl stanoven rovněž metodou Mehlich 3. Z výsledků 21 let trvajícího pokusu, který je popsán v diplomové práci, vychází průměrná bilance obsahu fosforu také kladná (95,5 mg P/kg). Podobných závěrů po dlouhodobé aplikaci kalů dosáhla i Raclavská (2007). Hanč et al. (2004) dokládá, že čistírenské kaly jsou v porovnání s hnojem významnější zásobárnou P. Skutečnost, že uvedené kaly mají pozitivní vliv na obsah přístupného fosforu, potvrzuje mnoho autorů - například Wu et al. (2012). Dle Balíka et al. (2007) je zřejmé, že varianty, kde byl aplikován čistírenský kal jako hnojivo, vykazují vyšší množství přístupného fosforu v půdě ve srovnání s dalšími variantami.

Aplikace hnoje se projevuje zlepšením vlastností půdy a pozitivně působí zejména na zvýšení schopnosti zadržovat vodu v půdě, čímž selepší i následné využití P. Hnojení hnojem vede také ke zlepšení retence vody, půda lépe udržuje živiny a není příliš náchylná na změny pH (Vaněk et al. 2007). Kladný vliv hnoje při dlouhodobé aplikaci potvrzují i výsledky, které uvádějí Balík et al. (2007). Tato skutečnost koreluje s výsledky diplomové práce v tom směru, že varianta hnojení hnojem měla taktéž pozitivní vliv na obsah vodorozpustného přístupného reziduálního fosforu u všech variant mimo jedinou výjimku (obsah fosforu v půdě stanovený výluhem CAD v lokalitě Lukavec). V roce 1996 se obsahy přístupného fosforu stanoveného vodným výluhem pohybovaly u varianty hnůj v závislosti na stanovišti v rozmezí 4,16 až 11,6 mg P/kg, zatímco v roce 2017 byly tyto hodnoty naměřeny v rozmezí 6,18 až 20,4 mg P/kg. Hodnoty stanovené výluhem CAD v téže variantě byly v roce

1996 v rozmezí 4,99 až 91,9 mg P/kg a v roce 2017 8,6 až 103 mg P/kg. Obsah přístupného P stanovený metodou Mehlich 3 v roce 1996 se pohyboval v rozmezí 74,9 až 178 mg P/kg a v roce 2017 se hodnoty pohybovaly v rozmezí 107 až 205 mg P/kg. Hodnoty obsahu fosforu stanovené lučavkou královskou se v roce 1996 pohybovaly v rozmezí 584 až 986 mg P/kg, zatímco v roce 2017 byly hodnoty přístupného obsahu fosforu 739 až 1081 mg P/kg. Výsledky po 11 letech trvání pokusu dle Kulhánek et al. (2014) poukazují na zvyšování obsahu přístupného fosforu v půdě po aplikaci hnoje, a to až o 52 %. Zvýšení obsahu přístupného fosforu v půdě u varianty hnůj se potvrdilo i z výsledků této diplomové práce, kde bylo sledování realizováno po 21 letech, avšak dosahovalo pouze 22 %. I po 18 letech trvání stejného dlouhodobého pokusu bylo zjištěno, že obsah přístupného fosforu v půdě na stanovištích hnojených hnojem byl vyšší (Kulhánek et al. 2019). Obsah fosforu stanovený metodou Mehlich 3 se zde zvýšil v průměru o 37 mg P/kg. To potvrzují i výsledky této diplomové práce s průměrným zvýšením obsahu P (Mehlich 3) o 24 mg/kg. Toto zjištění je ve shodě s prací Ivanov et al. (2012), podle níž se zvýšily obsahy přístupných fosforečnanů po dlouhodobé aplikaci hnoje. Další vysvětlení pro vyšší obsah přístupného P v půdě podávají i Mikulášová et al. (1997), kteří ve svém výzkumu uvádějí, že huminové látky a jejich prekurzory dodávané v hnoji blokují sorpční místa pro fosfor, který poté zůstává v mobilní formě. Nest et al. (2014) představují výsledky osmiletého polního pokusu. Z výsledků jasně vyplývá, že stanoviště hnojené hnojem vykazovala vyšší obsah přístupného fosforu v porovnání se stanovišti hnojenými minerálními hnojivy (NPK). Rovněž Kondratowicz-Maciejewska & Kobierski (2011) z výsledků 22 let trvajících pokusu jasně dokládají zvýšení obsahu přístupného fosforu v půdě po aplikování hnoje.

Ve srovnání s rokem 1996 došlo v roce 2017 u varianty Hnůj + N k poklesu obsahu všech přístupných forem fosforu v půdě (vodný výluh, CAD a Mehlich 3). Tuto skutečnost potvrzují v dlouhodobých pokusech u podobné varianty i Ning et al. (2020). Z těchto výsledků je zřejmá záporná bilance přístupného fosforu v půdě, která činí v průměru -26,6 mg P/kg, stanovená metodou Mehlich 3. Tuto skutečnost potvrzují i Ning et al. (2020) na základě výsledků podobných dlouhodobých pokusů.

V roce 1996 se obsahy přístupného fosforu stanoveného vodným výluhem pohybovaly u varianty N v rozmezí 4,81 až 14,8 mg P/kg, zatímco v roce 2017 byly tyto hodnoty naměřeny v rozmezí 2,57 až 9,80 mg P/kg. Hodnoty stanovené výluhem CAD v téže variantě byly v roce 1996 v rozmezí 7 až 107 mg P/kg a v roce 2017 4,1 až 83,7 mg P/kg. Obsah přístupného P stanovený metodou Mehlich 3 v roce 1996 se pohyboval v rozmezí 78,3 až 194 mg P/kg a v roce 2017 se hodnoty pohybovaly v rozmezí 76 až 119 mg P/kg. Hodnoty obsahu fosforu stanovené lučavkou královskou se v roce 1996 pohybovaly v rozmezí 645 až 970 mg P/kg, zatímco v roce 2017 byly hodnoty přístupného obsahu fosforu 683 až 890 mg P/kg. Z těchto výsledků je zřejmá záporná bilance přístupného fosforu v půdě, která činí v průměru -35,2 mg P/kg, stanovená metodou Mehlich 3. To potvrzuje i studie Kulhánek et al. (2019), kde záporná bilance přístupného fosforu v půdě u varianty N dosahovala v průměru -41 mg P/kg. V jiném dlouhodobém polním pokusu, který trval 20 let, Ning et al. (2020) taktéž uvádějí pokles přístupného fosforu v půdě, a to o 3 mg P/kg.

Jako třetí nejlepší zdroj fosforu v půdě se projevila varianta hnojená minerálními hnojivy (NPK). V roce 1996 se průměrné hodnoty obsahu fosforu stanoveného vodným výluhem pohybovaly u varianty NPK okolo hodnoty 9,80 mg P/kg, zatímco v roce 2017 byl

průměr těchto hodnot 9,57 mg P/kg. Průměrná hodnota stanovená výluhem CAD v téže variantě byla v roce 1996 52,2 mg P/kg a v roce 2017 55,8 mg P/kg. Průměrný obsah fosforu stanovený metodou Mehlich 3 v roce 1996 činil 139 mg P/kg. V roce 2017 byla průměrná hodnota obsahu fosforu 131 mg P/kg. Průměrný obsah fosforu stanovený lučavkou královskou v roce 1996 byl 727 mg P/kg a v roce 2017 činila průměrná hodnota obsahu fosforu 804 mg P/kg. Ve stejném pokusu z jiného období Kulhánek et al. (2019) hodnotí po 18 letech trvání pokusu hnojení NPK rovněž jako třetí nejúčinnější. Před tímto minerálním hnojivem se umístily - z pohledu obsahu přístupného fosforu v půdě - varianty hojené čistírenským kalem a hnojem. I přes dodaný fosfor je z výsledků této studie zřejmá negativní bilance přístupného P v půdě stanoveného metodou Mehlich 3. Ta u varianty činila -33,3 mg P/kg. Záporná bilance je též patrná i z výsledků diplomové práce, kde však činí pouze -8,49 mg P/kg. Naopak výsledky po 11 letech trvání pokusu dle Kulhánek et al. (2014) poukazují na zvyšování obsahu přístupného fosforu v půdě po aplikaci NPK, a to až o 25 %. Z výsledků diplomové práce je naopak patrné snížení obsahu přístupného fosforu v půdě, a to o 6 %. Ning et al. (2020) prováděli 20 let trvající dlouhodobý pokus. Z výsledků je patrné, že došlo k mírnému zvýšení obsahu fosforu v půdě (z 10 mg P/kg na 15 mg P/kg) u varianty NPK (průměrná roční aplikační dávka činila 25 kg P/ha). Z výsledků diplomové práce je patrný opačný efekt. To je pravděpodobně způsobeno dlouhodobě nejvyššími výnosy na této variantě, kde odběr fosforu převyšoval přísun jeho přístupné formy.

6.2 Výnosy ječmene a odběr fosforu

Při porovnávání průměrů celkových výnosů (nezávisle na variantě hnojení) všech stanovišť vycházejí podobně stanoviště Červený Újezd (4,72 t/ha) a Suchdol (4,77 t/ha). O poznání nižší průměrný celkový výnos byl naměřen na stanovišti Lukavec (3,30 t/ha), zároveň je třeba zmínit, že se zde nejlépe projevil hnojení. Toto potvrzují i Černý et al. (2010). Ti ve stejném pokusu tuto skutečnost odůvodnili tím, že na stanovišti Lukavec je přirozeně nízká úrodnost, a proto se zde projevuje efekt hnojení více než např. na stanovišti Suchdol.

Z výsledků diplomové práce vyplývá, že půdní úrodnost sama o sobě nemůže dlouhodobě zajistit vysoké výnosy. To proto, že postupně dochází k odčerpání živin a degradaci půdy. Z tohoto důvodu kontrolní varianta ve výsledcích vykazovala nejnížší výnosy, v průměru se pohybovaly okolo 3,14 t/ha. Tuto skutečnost potvrzují i výsledky ze stejného dlouhodobého polního pokusu již po kratším časovém období, které publikují Černý et al. (2010). Ning et al. (2020) ve svém pokusu porovnávali vliv rozdílných hnojiv (varianty: kontrola; hnůj; N; hnůj + N; NP; NP + hnůj; NPK; hnůj + NPK) na následný výnos kukuřice a sóji. Jejich výsledky jen potvrdily, že nehnojené varianty měly nejnížší výnosy. Všechny varianty (hnůj a minerální hnojiva a různé variace minerálních hnojiv s hnojem) dosáhly vyšších výnosů oproti variantě Kontrola (nehnojené) i v pokusech Jiang et al. (2006) a Qaswar et al. (2020). Stejně jako nejnížší výnosy vykazovala varianta Kontrola také nejnížší odběr na všech stanovištích. Podobné tendence dokládá i Kulhánek et al. (2007), dále také Macháček & Kunzová (2019). Ve variantě Kontrola (nehnojená) vyšla výrazně záporná bilance fosforu, což je v souladu se studií Macháček & Kunzová (2019).

Výnosy zrna hnojených variant jsou vztaženy k variantě Kontrola (nehnojená). Následující rozdíly výnosů jsou vyjádřeny v procentech.

Aplikace hnoje zlepšila průměrný výnos zrna ječmene ze všech stanovišť o 26,1 % (3,87 t/ha). K výslednému zvýšení výnosu zrna po aplikaci hnoje došli ve stejném pokusu též Černý et al. (2010). Qaswar et al. (2020) potvrzují také vyšší výnos rýže po hnojení hnojem v dlouhodobém polním pokusu. Tento pozitivní efekt aplikace hnoje byl potvrzen v řadě dalších studií (Barzegar et al. 2002; Jiang et al. 2006; Kunzová et al. 2020). Bilance fosforu na všech stanovištích varianty Hnůj vyšla kladně, v průměru 142 kg P/ha. Varianta Kal dosahovala vyšších průměrných výnosů zrna, a to o 27 % (3,95 t/ha). Oproti tomu odběr fosforu u této varianty byl nižší než u varianty hnůj. V průměru byl odběr fosforu o 25 % vyšší než u kontrolní varianty. Bilance fosforu u varianty Kal vyšla též kladná, avšak několikanásobně vyšší (1056 kg P/ha) než u varianty hnůj.

Nejvyšších výnosů dosahovaly vždy varianty hnojené minerálními hnojivy nebo kombinací Hnůj s minerálním dusíkem. Varianty Hnůj+N a N dosahovaly velmi podobných výnosů. U varianty NPK byl naměřen o poznání vyšší výnos než u dvou předešlých variant.

Varianta Hnůj+N dosáhla průměrného výnosu 4,79 t/ha, tedy byl u ní o 58 % vyšší výnos v porovnání s Kontrolou. Podobný skokový nárůst výnosů naměřili Kunzová et al. (2020) v čtyřletém polním pokusu. Z výsledků této studie je patrné, že se výnos pšenice zvýšil v průměru o 110 %. Několikanásobně vyšší výnos pšenice ve variantě Hnůj+N vůči variantě Kontrola (nehnojená) uvádějí Jiang et al. (2006). Celkový odběr fosforu po dobu trvání pokusu činil 426 kg P/ha, což je o 55,7 % více než u kontrolní varianty. Podobně zvýšený odběr fosforu obilninami u varianty Hnůj+N v porovnání s kontrolní variantou zjistili také Blake et al. (2000). Tato varianta se z pohledu navrácení fosforu zpět do půdy projevila jako nedostačující. Výsledkem byla záporná bilance, která činila v průměru -181 kg P/ha. Záporná bilance byla u podobné varianty zjištěna v již zmíněném pokusu Blake et al. (2000).

Varianta N dosáhla průměrného výnosu 4,83 t/ha, tedy byl u ní o 59,7 % vyšší výnos v porovnání s Kontrolou. Černý et al. (2010) uvádějí z výsledků stejného pokusu, že mezi výnosy Kontroly a varianty N jsou značné rozdíly (téměř o 50 % vyšší výnos). Celkový průměrný odběr fosforu všech stanovišť po dobu trvání pokusu byl naměřen ve výši 430 kg P/ha, což je o 57,3 % více než u kontrolní varianty. Podobně zvýšený odběr fosforu obilninami u varianty N v porovnání s kontrolní variantou zjistili také Blake et al. (2000). Také tato varianta se z pohledu dodávání fosforu zpět do půdy projevila jako nedostačující. Výsledkem byla záporná bilance, která činila celkem - 430 kg P/ha. Záporná bilance byla též zjištěna ve studii Blake et al. (2000).

Nejvyšších průměrných výnosů dosahovala varianta NPK, a to 5 t/ha. V porovnání s variantou Kontrola se výnos zvýšil o 65,3 %. Toto je ve shodě s výsledky Černý et al. (2010), kde průměrný výnos ječmene jarního po aplikaci NPK byl o více než 50 % vyšší v porovnání s kontrolní variantou, a to již po 12 letech trvání pokusu. U této varianty byl také vypočten nejvyšší průměrný odběr fosforu, a to 447 kg P/ha, což je o 63,3 % vyšší hodnota v porovnání s Kontrolou. Z výsledků je patrné, že tato varianta má druhou nejvyšší kladnou bilanci fosforu, která činí 153 kg P/ha. Kladné bilance fosforu u variant NPK byly zjištěny i ve studii Černý et al. (2010), pokud byla roční dávka fosforu vyšší než 24 kg/ha.

7 Závěr

Fosfor je důležitým prvkem pro růst a vývin rostlin. Není-li tohoto prvku v půdě dostatek, pak mají pěstované rostliny nižší výnosy a mohou vykazovat metabolické poruchy. Řada studií poukazuje na fakt, že se fosfor ve výživě rostlin stává limitujícím prvkem, proto je třeba jej vracet do půdy, a to především formou organických a minerálních hnojiv. Organická hnojiva navíc pozitivně ovlivňují půdní vlastnosti, díky kterým je fosfor rostlinou lépe přijímán.

Diplomová práce vyhodnocuje výsledky dlouhodobého pokusu, ve kterých byly hodnoceny různé varianty hnojení. Vybranými metodami byly analyticky stanovovány obsahy různých frakcí přístupného fosforu v půdě a následně byl u jednotlivých variant hnojení vyhodnocen výnos a odběr fosforu ječmenem jarním.

Variantou, kde byl naměřen nejvyšší obsah okamžitě přístupného fosforu v půdě, byla varianta hnojená čistírenskými kaly. Z toho vyplývá, že měla dle očekávání nejvyšší kladnou bilanci fosforu, a to až několikanásobnou v porovnání s ostatními variantami. Z výsledků je patrné, že dlouhodobá aplikace čistírenských kalů významně přispívala k vyššímu obsahu fosforu, a to především jeho mobilních forem. Tato varianta dosahovala rovněž vyšších výnosů v porovnání s kontrolou a variantou hnojenou hnojem. Varianta hnojená hnojem byla druhým nejlepším zdrojem okamžitě přístupného fosforu. Vyšší výnosy v porovnání s čistírenským kalem byly zaznamenány u variant hnojených minerálními hnojivy.

Nejvyšší průměrné výnosy byly v porovnání se všemi ostatními variantami naměřeny u varianty hnojené NPK. Zde také byla naměřena mírně kladná bilance fosforu, což by z tohoto úhlu pohledu mohlo představovat vhodný způsob dlouhodobě udržitelného pěstování ječmene.

Nejnižší hodnoty okamžitě přístupného fosforu na všech stanovištích vykazovala varianta kontrolní, ve které obsah okamžitě přístupného fosforu klesl nebo zůstal srovnatelný s hodnotami v době založení pokusu.

Obě stanovené hypotézy lze považovat za potvrzené. Hnojení organickými i minerálními hnojivy obsahujícími fosfor povede ke zvýšení výnosu jarního ječmene, ale také ke zvýšenému odběru tohoto prvku plodinou z půdy. Dlouhodobé hnojení minerálními dusíkatými hnojivy s vynecháním aplikace fosforu vedlo sice rovněž ke zvýšení výnosů, avšak bilance P byla vzhledem k uvedené skutečnosti horší než u kontrolní varianty. Je tedy zřejmé, že špatný systém hnojení může mít do budoucna negativnější důsledky než kompletní vynechání přísunu hnojiv.

8 Literatura

- Arshad MA, Soon YK, Azooz RH, Lupwayi NZ, CHang SX. 2012. Soil and crop response to wood ash and lime application in acidic soils. *Agronomy Journal*. 104:715-721.
- Augusto L, Bakker MR, Meredieu C. 2008. Wood ash applications to temperate forest ecosystems – potential benefits and drawbacks. *Plant and Soil*. 306: 181-198.
- Balík J, Petrášek K, Tlustoš P, Száková J. 1999. Kaly z čistíren odpadních vod. Pages 47-53 in Vaněk V, Kolář L, Pavlíková D, Tlustoš P, editors. Sborník z konference – Racionální použití hnojiv zaměřené na problematiku půdní organické hmoty, použití organických hnojiv a potřeby hnojení minerálními hnojivy. Katedra agrochemie a výživy rostlin ČZU v Praze, Praha.
- Balík J, Pavlíková D, Kulhánek M, Zitková M, Jakl M. 2002. Lokální aplikace fosforečných hnojiv. Pages 74-79 in in Vaněk V, Balík J, Pavlíková D, Tlustoš P, editors. Sborník z 8. mezinárodní konference – Racionální použití hnojiv zaměřené na problematiku fosforu v rostlinné výrobě. Katedra agrochemie a výživy rostlin ČZU v Praze, Praha.
- Balík J, Pavlíková D, Vaněk V, Kulhánek M, Kotková B. 2007. The influence of long-term sewage sludge application on the activity of phosphatases in the rhizosphere of plants. *Plant Soil Environment*. 53:375 – 381.
- Balík J, Kulhánek M, Pavlíková D, Tlustoš P, Wisniowska-Kielian B. 2008. Fosfor v půdě. Pages 23-30 in Vaněk V, Kolář L, Pavlíková D, Tlustoš P, editors. Sborník ze 14. mezinárodní konference – Racionální použití hnojiv zaměřené na problematiku výživy a hnojení fosforem. Katedra agrochemie a výživy rostlin ČZU v Praze, Praha.
- Barber SA, Mackay AD, Kuchenbuch RO, Barraclough PB. 1998. Effect of Soil-Temperature And Water On Maize Root-Growth. *Plant and soil*. 11: 267-269.
- Barzegar AR, Yousefi A, Daryashenas A. 2002. The effect of addition of different amounts and types of organic materials on soil physical properties and yield of wheat. *Plant and Soil*. 247:295-301.
- Biom CZ. 2019. Digestát pokaždé jinak. *Biom CZ*. 3:1-16.
- Blake L, Mercik S, Koerschens M, Moskal S, Poulton PR, Goulding KWT, Weigel A, Powlson DS. 2000. Phosphorus content in soil, uptake by plants and balance in three European long-term field experiments. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 56:263-275.
- Blume HP, Brümmer GW, Schwertmann U, Horn R, Knaber I, Kretzschmar R, Stahr K, Wilke B. 2002. Scheffer/Schachtschabel:Lehrbuch der Bodenkunde. Springer Spektrum, Berlin.
- Čermák P, Mühlbachová G, Pechová M, Lošák T, Hlušek J, Kulhánek M, Sedlár O, Balík J. 2018. Metodický postup pro optimalizaci hnojení fosforem na zemědělských půdách, včetně půd karbonátových. Schválená metodika pro praxi. Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i., Praha.
- Černý L, Vašák J, Křováček J, Hájek M. 2007. Jarní sladovnický ječmen - pěstitelský rádce. Česká zemědělská univerzita v Praze, Praha.

- Černý J, Balík J, Kulhánek M, Časová K, Nedvěd V. 2010. Mineral and organic fertilization efficiency in long-term stationary experiments. *Plant soil environ.* 56:28-36.
- Černý J, Balík J, Kulhánek M, Sedlář O. 2020. Hnojení jarního ječmene fosforem na jaře? *Úroda.* 68:10-14.
- Čurn V, Bohatá A, Olšan P, Havelka Z, Kříž M, Bartoš P, Špatenska P, Beran J. 2018. Nechemické metody ošetření osiva – využití nízkoteplotního plazmatu a biologického ošetření osiva u řepky ozimé. *Agromanuál* 14:30-32.
- Dostál J, Haberle J, Klír J, Kozlovská L, Kvítek T, Růžek P. 2004. Zásady správné zemědělské praxe zaměřené na ochranu vod před znečištěním dusičnany ze zemědělských zdrojů. Ministerstvo zemědělství ČR v Ústavu zemědělských a potravinářských informací. Praha.
- Drohan PJ, Bechmann M, Buda A, Djodjic F, Doody D et al. 2019. A global perspective on phosphorus management decision support in agriculture: lessons learned and future directions. *Journal of Environmental Quality.* 48:1218-1233.
- Duhan JS, Kumar R, Kumar N, Kaur P, Nehra P, Nehra K, Duhan S. 2017. Nanotechnology: The new perspective in precision agriculture. *Biotechnology Reports.* 15:11-23.
- Duro JA, Lauk Ch, Kastner T, Erb K, Haberl H. 2020. Global inequalities in food consumption, cropland demand and land-use efficiency: A decomposition analysis. *Global Environmental Change* (102124) DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2020.102124.
- Duvigneaud P. 1988. *Ekologická syntéza.* Academia Praha, Praha.
- EN 13651: 2002: Soil improvers and growing media – Extraction of calcium chloride/DTPA (CAT) soluble nutrients. Czech normalization institute, Prague.
- Etiégni L, Campbell AG. 1991. Physical and chemical characteristics of wood ash. *Bioresource Technology.* 37:173-178.
- Fecenko J, Ložek O. 2000. *Výživa a hnojení poľných plodín.* Bibliografia, Nitra.
- Florián M. 2020. Úskalí výživy rostlin fosforem (nejen) v ekologickém zemědělství. *Zemědělec.* 8:36.
- Flowerdew B. 2010. *Composting: Bob's Basics.* Skyhorse Publishnig. New York.
- Gu X, Wang L, Fan Y, Yang H, Long H. 2016. *Advancing the understanding of our living planet.* IEEE, Beijing.
- Gustian ZM, Kulikowska D. 2014. The usability of the IR, RAC and MRI indices of heavy metal distribution to assess the environmental quality of sewage sludge composts. *Waste Management.* 34: 1227-1236.
- Hanč A, Tlustoš P, Balík J. 2004. Vliv aplikace čistírenských kalů na výnosy senážního ovsa pěstovaného na třech různých zeminách. „Racionální použití hnojiv zaměřené na problematiku rizikových látek v rostlinné výrobě“. KAVR, Praha
- Holečková T, Kulhánek M, Balík J. 2014. Racionální použití hnojiv. Pages 80-83 in *Sborník z konference konané na ČZU v Praze dne 27. 11 2014.* Česká zemědělská univerzita v Praze, Praha.

- Holloway R, Bertrand I, Frischke AJ, Brace DM, McLaughlin MJ, Shepperd W. 2001. Improving fertiliser efficiency on calcareous and alkaline soils with fluid sources of P, N and Zn. *Plant and Soil* 236:209-219.
- Hůla J, Procházková B. 2008. Minimalizace zpracování půdy. Prodi Press Praha.
- Isherwood KF. 1998: Fertilizer Use and the Environment. International Fertilizer Industry Association. Paris.
- ISO 11466:1995: Soil quality - Extraction of trace elements soluble in aqua regia. 1:1-6.
- Ivanič J, Havelka B, Knop K. 1984. Výživa a hnojení rostlin. Příroda, Bratislava.
- Ivanov K, Zaprianov P, Petkova M, Stefanova V, Kmetov V, Georgieva D, Angelova V. 2012. Comparison of inductively coupled plasma mass spectrometry and colorimetric determination of total and extractable phosphorus in soil. *Spectrochim. Acta B* 71–72:117–122.
- Jiang D, Hengsdijk H, Dai T, Boer W, Jing Q, Cao W. 2006. Long-Term Effects of Manure and Inorganic Fertilizers on Yield and Soil Fertility for a Winter Wheat-Maize System in Jiangsu, China. *Pedosphere*. 16:25-32.
- Jones AC, Jacobsen SJ, Wraith MJ. 2003 The effects of P fertilization on drought tolerance of malt barely. *Western Nutrient Management Conference*. 5: 88-93.
- Kara D, Özsavaşçı C, Alkan M. 1997. Investigation of suitable digestion methods for the determination of total phosphorus in soils. *Talanta*. 44: 2027-2032.
- Kasal P, Svobodová A, Vacek J, Čížek M, Nevosád J. 2016. Užití digestátů zemědělských bioplynových stanic ke hnojení brambor. Výzkumný ústav bramborářský Havlíčkův Brod, s.r.o., Havlíčkův Brod.
- Klír J, Kunzová E, Čermák P. 2008. Rámcová metodika výživy rostlin a hnojení. Výzkumný ústav rostlinné výroby, Praha-Ruzyně.
- Kondratowicz-Maciejewska K, Kobierski M. 2011. Content of Available magnesium, phosphorus and potassium forms in soil exposed to varied crop rotation and fertilisation. *Journal of Elementology*. 16: 543-553.
- Kulhánek M, Balík J, Černý J, Nedvěd V, Kotková B. 2007. The influence of different intensities of phosphorus fertilizing on Available phosphorus contents in soils and uptake by plants. *Plant soil environ*. 53:382-387.
- Kulhánek M, Balík J, Černý J, Vašák F, Shejbalová Š. 2014. Influence of long-term fertilizer application on changes of the content of Mehlich-3 estimated soil macronutrients. *Plant Soil Environ*. 60:151-157.
- Kulhánek M, Černý J, Balík J, Sedlář O, Vašák F. 2019. Changes of soil bioavailable phosphorus content in the long-term field fertilizing experiment. *Soil and water Research*. 14:240-245.
- Kunzová E. 2009. Výživa rostlin a hnojení fosforem. Metodika pro praxi. Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i, Praha.

- Kruse J et al. 2015. Innovative methods in soil phosphorus research: A review. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. 173: 43-88.
- Lellák J, Kubíček F. 1991. *Hydrobiologie*. Karolinum, Praha.
- Lhotský O, Zápotocký L, Šváb M, Hudcová T. Srážení struvitu pro recyklaci nutrientů z odpadních vod: Vliv pH a kinetika procesu v modelových systémech. *Waste forum* 2:120-126.
- Lindsay WL. 1979. *Chemical Equilibria in Soils*. John Wiley and Sons Inc., New York.
- Liu Y, Chen J. 2014. Phosphorus cycle. Pages 2715-2724 in Jørgensen ES, Fath DB editors. *Encyclopedia of Ecology*. Elsevier Science, Oxford UK.
- Loo S, Koppejan J. 2008. *The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing*. Earthscan, London.
- Loria ER, Sawyer JE, Barker D, Lorimor JC. 2007. Use of anaerobically digested swine manure as a nitrogen source in corn production. *Agronomy Journal*. 99: 1119-1129.
- Lošák T, Hlušek J, Lampartová I, Elbl J, Mühlbachová G, Čermák P, Antonkiewicz J. 2016. Changes in the content of soil phosphorus after its application into chernozem and haplic luvisol and the effect on yields of barely biomass. *Acta Universitatis agriculturae et silviculturae Mendelianae Brunensis*. 64:1603-1608.
- Lošák T, Dostál J, Hlušek J, Čermák P. 2017. Využití tekutých statkových a organických hnojiv ke hnojení zemědělských plodin. *Mendelova univerzita v Brně, Brno*.
- Lundin M, Olofsson M, Pettersson GJ, Zetterlung H. 2004. Environmental and economic assessment of sewage sludge handling options. *Resources, Conservation and Recycling*. 41:255-278.
- Luscombe PC, Syers JK, Gregg PEH. 1979. Water extraction as a soil testing procedure for phosphate. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 10:1361-1369.
- Ma Q, Rengel Z, Rose T. 2009. The effectiveness of deep placement of fertilisers is determined by crop species and edaphic conditions in Mediterranean-type environments: a review. *Australian Journal of Soil Research* 47:19-32.
- Mackey KRM, Paytan P. 2009. Phosphorus cycle. *Encyclopedia of Microbiology*. Academic Press, USA.
- Macháček V, Čermák P. 2004. Stabilizace půdní úrodnosti z hlediska výživy rostlin fosforem a draslíkem. *Metodická příručka. Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i, Praha*.
- Marada P, Večeřová V, Kamarád L, Dundáková P, Mareček J. 2008. *Příručka pro nakládání s digestátem a fugátem. Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně Institut celoživotního vzdělávání ve spolupráci s Ústavem zemědělské potravinářské a environmentální techniky, Brno*.
- Marschner, P. 2012: *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants*. Academic Press, Elsevier, Australia.

- Mehlich, A. 1984. Mehlich 3 soil test extractant: A modification of Mehlich 2 extractant. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 15:1409-1416.
- 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.
- Mikulášová B, Lapčík L, Mašek I. 1997. Lignite: Structure, properties and applications. *Chemické listy*. 91:160-168.
- Michalík I. 2001. *Molekulárne a energetické aspekty príjmu a asimilácie živín v rastlinách*. Slovenská poľnohospodárska univerzita v Nitre, Nitra.
- Mohanty S, Paikaray NK, Paikaray NK, Rajan AR. 2006. Availability and uptake phosphorus from organic manures in groundnut (*Arachis hypogea* L.) and corn (*Zea mays* L.) sequence using radio tracer technique. *Geoderma*. 133: 225-230.
- Moilanen M, Hytönen J, Leppälä. 2012. Application of wood ash accelerates soil respiration and tree growth on drained peatland. *European Journal of Soil Science*. 63:467-475.
- Muhlbachová G, Duffková R, Kusá H, Vevera R, Káš M, Zajíček A. 2016. Hnojení kukuřice digestátem a fugátem z bioplynových stanic. *Úroda*. 64: 16-20.
- Nest TV, Vandecasteele B, Ruyschaert G, Cougnon M, Merckx R, Reheul D. 2014. Effect of organic and mineral fertilizers on soil P and C level, crop yield and P leaching in long-term trial on a silt loam soil. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 197:309-317.
- Neuberg J. 1998. *Hnojení a výživa rostlin na zahradě*. Grada Publishing spol. s. r. o., Praha.
- Ning Q, Ma Q, Yuan H, Zhou Ch, Xia Z, Yu W. 2020. Mineral fertilizers with recycled manure boost crop yield and P balance in a long-term field trial. *Nutrient Cycling and Agriecosystems*. 166:271-283.
- Nkoa R. 2014. Agricultural benefits and environmental risks of soil fertilization with anaerobic digestates. *Agronomy for Sustainable Development*. 34: 473-492.
- Park ND, Rutherford PM, Thring RW, Helle SS. 2012. Wood pellet fly ash and bottom ash as an effective liming agent and nutrient source for rye grass (*Lolium perenne* L.) and oats (*Avena sativa*). *Chemosphere*. 86: 427-432.
- Pavlíková D, Pavlík M, Balík J. 2008. Úloha fosforu v rostlinách. Pages 13-32 in Vaněk V, Balík J, Pavlíková D, Tlustoš P, editors. *Sborník ze 14. mezinárodní konference – Racionální použití hnojiv zaměřené na problematiku výživy a hnojení fosforem*. Katedra agrochemie a výživy rostlin ČZU v Praze, Praha.
- Perucci P, Monaci E, Onofri A, Vischetti C, Casucci C. 2008. Changes in physico-chemical and biochemical parameters of soil following addition of wood ash: a field experiment. *Eur J Agron*. 28:155-161.
- Petersen SO, Sommer SG, Béline F, Burton C, Dach J., Dourmad YA, Liep A, Misselbrook T, Nicholson F, Polsen H D, Provolo G, Sørensen P, Vinneras B, Weiske A, Bernal MP,

- Böhm R, Juhász C, Mihelic R. 2007. Recycling of livestock manure in a whole-farm perspective. *Livestock Science* 112:180-191.
- Petr J, Dlouhý J. 1992. *Ekologické zemědělství*. Zemědělské nakladatelství Brázda, Praha.
- Pierzynski GM, Vance GR, Sims JT. 2005. *Soils and Environmental Quality*. Boca Raton, CRC Press, London.
- Pitter P. 1999. *Hydrochemie*. Vysoká škola chemicko technologická, Praha.
- Prášková A, Němec P. 2016. Bazální monitoring zemědělských půd – půdní reakce a obsah živin. Ústřední kontrolní a zkušební ústav zemědělský v Brně, Brno.
- Prášková L. 2020. Kontrola hnojiv a pomocných látek. Page 41 in Poláková Š, Kubík L, Prášková L, Houček J, Malý S, Fiala J, Daňková R, editors. *Kontrola a monitoring cizorodých látek v potravních řetězcích*. Ústřední kontrolní a zkušební ústav zemědělský v Brně, Brno.
- Procházková B. 2006. Zpracování půdy k jarnímu ječmeni. Pages 53 – 54 in Zimolka et al, editors. *Ječmen – formy a užitkové směry v České republice*. ProfiPress, Praha.
- Qaswar M, Jing H, Ahmed W, Dongchu L, Shujun L, Lu Z, Cai A, Lisheng L, Yongmei X, Jusheng G, Huimin Z. 2020. Yield sustainability, soil organic carbon sequestration and nutrients balance under long-term combined application of manure and inorganic fertilizers in acidic paddy soil. *Soil and Tillage Research*. 198:1-11.
- Raclavská H. 2007. *Technologie zpracování a využití kalů z ČOV*. VŠB-TUO, Ostrava.
- Rigby H, Smith SR. 2013. Nitrogen availability and indirect measurements of greenhouse gas emissions from aerobic and anaerobic biowaste digestates applied to agricultural soils. *Waste Management*. 33: 2641-2652.
- Richter R. 1996. *Půdní úrodnost*. Institut výchovy a vzdělávání ministerstva vnitra České republiky, Praha.
- Richter R, Římovský K. 1996. *Organická hnojiva, jejich výroba a použití*. Institut výchovy a vzdělávání Ministerstva zemědělství České republiky, Praha.
- Richter R, Kubát J. 2003. *Organická hnojiva, jejich výroba a použití*. Ústav zemědělských a potravinářských informací Praha, Praha.
- Richter R, Hřivna L, Ryant P. 2006. Výživa a hnojení ječmene jarního. Pages 59 – 63 in Zimolka et al, editors. *Ječmen – formy a užitkové směry v České republice*. ProfiPress, Praha.
- Rose TJ, Pariasca-Tanaka J, Rose MT, Fukuta Y, Wissuwa M. 2010. Genotypic variation in grain phosphorus concentration, and opportunities to improve P-use efficiency in rice. *Field Crop Research* 119:154-160.
- Rosillo-Calle F, Hemstock S, de Groot P, Woods J. 2006. *The biomass assessment handbook: Bioenergy for sustainable environment*. Earthscan, London.
- Růžek P, Kusá H, Hejnová D. 2003. Rizika používání dusíkatých hnojiv ve zranitelných oblastech. *Úroda* 51:40-42.

- Sanchez ChA. 2007. Phosphorus, in AV Barker. Pages 51-90 in Barker VA, Pilbeam JD, editors. Handbook of Plant Nutrition. Earth Sciences, Environment & Agriculture, Boca Raton.
- Sharpley AN. 1995. Soil phosphorus dynamics: agronomics and environmental impacts. *Ecological Engineering*. 5: 261-279.
- Sharpley AN, Daniel T, Sims T, Lemunyon J, Stevens R, Parry R. 2003. Agriculture phosphorus and eutrophication. United States Department of Agriculture, Washington DC.
- Smatanová M. 2012. Digestát jako organické hnojivo. *Zemědělec*. 18: 21-22.
- Smatanová M, Komprsová I, Sušil A. 2017. Výsledky agrochemického zkoušení zemědělských půd za období 2009 – 2014. ÚKZUZ, Brno.
- Souza RF, Faquin V, Lima Sorbinho RR, Oliveria EAB. 2010. Liming and organic fertilizer: influence on phosphorus adsorption in soils. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo*. 34: 143-150.
- Stupka R, Šprysl M, Čítek J. 2013. Základy chovu prasat. Powerpoint. Praha.
- Sýkorová E, Wanner J, Beneš O. 2014. Analýza znovuzískání fosforu srážením struvitu z kalových vod na vybraných čistírnách odpadních vod. *Chemické listy*. 108:610-614.
- Tlapák V, Šálek J, Legát, V. 1992. Voda v zemědělské krajině. Zemědělské nakladatelství Brázda. Praha.
- Troeh RF, Thompson LM. 2005. Soil and Soil Fertility. Blackwell Publishing, New Jersey.
- Tulonene T, Arvola L, Strommer R. 2012. Cadmium release from afforested peatlands and accumulation in an aquatic ecosystem after experimental wood ash treatment. *European Journal of Forest Research*. 131:1539-1536.
- Ústřední kontrolní a zkušební ústav zemědělský. 2016. Digestáty a jejich využití v zemědělství. Ústřední kontrolní a zkušební ústav zemědělský, Praha.
- Vance CP, Uhde-Stone C, Allan DL. 2003. Phosphorus acquisition and use: critical adaptations by plants for securing a nonrenewable resource. *New Phytologist*. 157:423-427.
- Vaněk, V., Balík J., Pavlíková D., Tlustoš P. 2007. Výživa polních a zahradních plodin. Profi Press, Praha.
- Vaněk V, Balík J, Pavlík M, Pavlíková D, Tlustoš P. 2016. Výživa a hnojení polních plodin. Profi Press s.r.o, Praha.
- Vessey JK. 2003. Plant growth promoting rhizobacteria as biofertilizer. *Plant Soil*. 255: 571-586.
- Wang X, Shen J, Liao H. 2010. Acquisition or utilization, which is more critical for enhancing phosphorus efficiency in modern crops? *Plant Science* 179:302-306.
- Withers PJA, Bradley RS, 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.

- Wolf B, Snyder HG. 2003. Sustainable soils: The place of organic matter in sustaining soils and their productivity. Food product press. New York.
- Wu LH, Cheng MM, Li Z, Ren J, Shen LB, Wang SF, Luo YM, Christie P. 2012. Major nutrients, heavy metals and PBDEs in soils after long-term sewage sludge application. *Journal of Soils and Sediments*. 12:531-541.
- Zimolka J et al. 2006. JEČMEN – formy a užitkové směry v ČR. Profi Press s.r.o, Praha.
- Zulfiqar F, Casadesús A, Brockman H, Munné-Bosh A. 2020. An overview of plant-based natural biostimulants for sustainable horticulture with a particular focus on moringa leaf extracts. *Plant science*. 295:1-10.

Internetové zdroje

- Campos P, Borie F, Cornejo P, López-Ráez JA, López-García Á, Seguel A. 2018. Phosphorus acquisition efficiency related to root traits: Is mycorrhizal symbiosis a key factor to wheat and barely cropping? *Plant Sci, Spain*. Available from <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2018.00752/full#B88> (accessed January 2021).
- Český statistický úřad. 2020. Vývoj ploch a sklizní zemědělských plodin v letech 2008 až 2009. Český statistický úřad, Praha. Available from [https://www.czso.cz/documents/10180/122461974/2701412001.pdf/9cbb1e8f-4b78-905d-c67a041a91e1?version=1.0](https://www.czso.cz/documents/10180/122461974/2701412001.pdf/9cbb1e8f-1a8f-4b78-905d-c67a041a91e1?version=1.0) (accessed September 2020).
- Dohányos M. Efektivní využití a likvidace čistírenských kalů. *Biom.cz*, Praha. Available from <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/efektivni-vyuziti-a-likvidace-cistirenskych-kalu> (accessed September 2020).
- EcoTrend. 2015. Optimalizace nakládání s kaly z komunální čistíren odpadních vod. Eco trend Research centre s.r.o., Praha. Available from [https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/projekty_po8_opzp_2007_2013/\\$FILE/OODP-Oddil_I_1_Analyticka%20cast-20160810.pdf](https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/projekty_po8_opzp_2007_2013/$FILE/OODP-Oddil_I_1_Analyticka%20cast-20160810.pdf) (accessed July 2020).
- Havelka P. Změny v nakládání s kaly z čistíren odpadních vod. *Enviweb*, Brno. Available from <http://www.enviweb.cz/114231> (accessed July 2020).
- Kulovaná E. 2002. Hnojení kukuřice fosforem pod patu. *Úroda*, Praha. Available from <https://www.uroda.cz/hnojeni-kukurice-fosforem-pod-patu/> (accessed January 2021).
- Kunzová E, Hlisnikovský L, Menšík L. 2020. Vliv hnojení statkovými a minerálními hnojivy na výnos a kvalitu pšenice ozimé na stanovištích Ivanovice na Hané a Lukavec v letech 2015–2018. *Agromanual*, České Budějovice. Available from <https://www.agromanual.cz/cz/clanky/vyziva-a-stimulace/hnojeni/vliv-hnojeni-statkovymi-a-mineralnimi-hnojivy-na-vynos-a-kvalitu-psenice-ozime-na-stanovistich-ivano> (accessed March 2021).

- Macháček V, Kunzová E. 2019. Vliv statkových hnojiv na bilanci fosforu v dlouhodobých pokusech. Agromanual, České Budějovice. Available from <https://www.agromanual.cz/cz/clanky/vyziva-a-stimulace/hnojeni/vliv-statkovych-hnojiv-na-bilanci-fosforu-v-dlouhodobych-pokusech> (accessed March 2021)
- Ministerstvo zemědělství. 2017. Zelená zpráva 2016. Ministerstvo zemědělství, Praha. Available from <http://eagri.cz/public/web/mze/ministerstvo-zemedelstvi/vyrocní-a-hodnotící-zprávy/zprávy-o-stavu-zemedelstvi/zelena-zprava-2016.html> (accessed March 2021).
- Ochecová P. 2015. Popel z biomasy – významný zdroj živin. Biom.cz, Praha. Available from <http://biom.cz/cz/odborneclanky/popel-z-biomasy-vyznamny-zdroj-zivin> (accessed December 2020).
- Procházková B, Dryšlová T, Hledík P. 2020. Vliv různého organického hnojení na výnosy obilnin. Agromanual, České Budějovice. Available from <https://www.agromanual.cz/cz/clanky/vyziva-a-stimulace/hnojeni/vliv-ruzneho-organickeho-hnojeni-na-vynosy-obilnin> (accessed January 2020).
- Šrefl J. 2012. Kompost je energie vrácená do půdy. Biom.cz, Praha. Available from <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/kompost-je-energie-vcacena-do-pudy> (accessed March 2021).
- Vokálová P. 2010. Biomasový popel – prvkové složení a možnosti jeho využití. Biom.cz, Praha. Available from <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/biomasovy-popel-prvkove-slozeni-a-moznosti-jeho-vyuziti> (accessed July 2020).
- Winkler J. 2017. Plevelé a hospodaření. Agromanual, České Budějovice. Available from <https://www.agromanual.cz/cz/clanky/ochrana-rostlin-a-pestovani/plevele/plevele-a-hospodareni-se-slamou> (accessed December 2020).