

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů

Katedra agroenvironmentální chemie a výživy rostlin



**Hodnocení využitelnosti metody Mehlich 3 pro stanovení
obsahu fosforu v karbonátových půdách**

Diplomová práce

Autor práce: Bc. Zdeněk Vukliševič

Obor studia: Rostlinná produkce

Vedoucí práce: Ing. Martin Kulháněk, Ph.D.

© 2018 ČZU v Praze

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci "Hodnocení využitelnosti metody Mehlich 3 pro stanovení obsahu fosforu v karbonátových půdách" jsem vypracoval 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 autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 12.4.2018

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval Ing. Martinovi Kulhánkovi, Ph.D. za odborné připomínky, trpělivost a pomoc při zpracování diplomové práce.

Hodnocení využitelnosti metody Mehlich 3 pro stanovení obsahu fosforu v karbonátových půdách

Souhrn

Jako prostředek pro monitoring základních informací o půdě nám slouží agrochemické zkoušení zemědělských půd (AZZP). Mezi základní chemické rozbory patří stanovení přístupných živin, stanovení obsahu uhličitánů a stanovení výměnné půdní reakce.

V rámci AZZP jsou v současné době vypracována kritéria pro hodnocení obsahu nejen fosforu, draslíku a hořčíku, ale i pro celou řadu dalších prvků (Cu, Fe, Mn aj.) stanovených extrakční metodou Mehlich 3. Možnost použití této extrakční metody je pro široké spektrum půd. Otázkou zůstává využitelnost metody pro karbonátové půdy, kde hrozí neutralizace extrakčního činidla. Diplomová práce řeší toto téma z hlediska stanovení přístupného fosforu.

Cílem této práce bylo na základě výsledků nádobových pokusů s pšenicí jarní potvrdit nebo vyvrátit teorii o snížené účinnosti metody Mehlich 3 pro stanovení rostlinám přístupného fosforu převážně v karbonátových půdách.

Z vybraných ploch byly v letech 2015 a 2016 odebírány vzorky převážně karbonátových půd, které byly následně extrahovány metodou Mehlich 3, iontovýměnnými membránami (AEM) a vodným výluhem pro stanovení přístupného P. Se vzorky byly poté založeny nádobové pokusy s pšenicí jarní v letech 2015 a 2017. Po sklizni byly provedeny doplňující analýzy půdy i rostlin zaměřené na stanovení obsahu přístupného fosforu po sklizni pokusů a faktorů úzce souvisejících s příjmem P (obsah a odběr P rostlinami).

Po vyhodnocení výsledků byl potvrzen korelační analýzou statisticky významný vztah mezi vstupním obsahem fosforu metodou Mehlich 3, metodou vodného výluhu a obsahem a odběrem fosforu rostlinami po sklizni. Z toho vyplývá, že i přes prokázanou neutralizaci činidla byl extrahován signifikantní podíl rostlinám přístupného fosforu. Průkazné korelace nebyly zjištěny pouze u vstupní metody AEM s obsahem P v rostlinách po sklizni, což potvrdila i regresní analýza. Vzájemné korelace vstupního pH, pH po sklizni a pH v Mehlich 3 byly statisticky průkazné na hladině významnosti $p \leq 0,001$. Vztahy zde potvrdila i regresní analýza. Nádobové pokusy poskytly orientační výsledky, proto je nutné provést další výzkum v terénních podmínkách.

Klíčová slova: AZZP, Mehlich 3, karbonátové půdy, pšenice jarní

Evaluating of Mehlich 3 method for the estimating of bioavailable phosphorus on calcareous soils

Summary

The agrochemical testing of agricultural soils (AZZP) is used for the basic soil monitoring in the Czech Republic. Basic chemical analyzes include the determination of bioavailable nutrients, carbonates content and the determination of exchangeable soil reaction.

Within the AZZP, criteria for the content of phosphorus, potassium and magnesium are currently being developed, but also for other elements (Cu, Fe, Mn etc.) determined by the Mehlich 3 extraction method. The possibility of using this extraction method is for a wide spectrum of soils. The question remains the applicability of this method for calcareous soils, because of the risk of neutralization of the extraction agent. This diploma thesis is trying to solve this problem in terms of determination of bioavailable phosphorus.

The aim of this diploma thesis was to confirm or refuse the Mehlich 3 method extraction abilities for the determination of plant-available phosphorus in predominantly calcareous soils, all based on the results of the experiment with spring wheat. Samples of mainly calcareous soils were taken up from the selected areas in the years 2015 and 2016, which were subsequently extracted using Mehlich 3 method, anion exchange membranes (AEM) and water extract to determine bioavailable phosphorus. Pot experiments with spring wheat in these soils were established in the years 2015 and 2017. By the harvest, additional soil and plant analyzes were carried out to determine the phosphorus content in soils and factors closely related to phosphorus bioavailability (P-content in aboveground biomass and its uptake by plants).

Correlation analysis confirmed a statistically significant relationship between the content of phosphorus estimated using Mehlich 3 method with the results of water extracts as well as with total P content in plants after harvest. That means that despite the proven neutralization of the reagent, a significant proportion of plant available phosphorus was extracted. Conclusive correlations were not found only between the AEM method and P content in plants after harvest, as was further confirmed with the regression analysis. Correlations of pH before and after harvest and pH in Mehlich 3 were statistically significant at $p < 0.001$, which was confirmed with regression analysis. However, the pot experiments provide only indicative results, so further field testing is required.

Keywords: AZZP, Mehlich 3 Method, carbonate soils, spring wheat

Obsah

1 Úvod.....	8
2 Cíl práce.....	2
3 Hypotéza	3
4 Přehled literatury (literární rešerše).....	4
4.1 Fosfor.....	4
4.1.1 Fosfor v půdě	5
4.1.1.1 Organicky vázaný fosfor	8
4.1.1.2 Anorganické sloučeniny fosforu.....	8
4.1.1.3 Sorbovaný fosfor	9
4.1.2 Fosfor v rostlině	9
4.1.1 Příjem fosforu a jeho transport v rostlině	9
4.1.1.1 Anorganický fosfor	10
4.1.1.2 Organický fosfor	10
4.1.2 Nedostatek fosforu	11
4.1.3 Nadbytek fosforu	12
4.2 Fosforečná hnojiva	12
4.3 Využití odpadních látek – alternativy hnojení	14
4.3.1 Čistírenské kaly	14
4.3.2 Digestát	15
4.3.3 Popel z biomasy	16
4.3.4 Bioefektory.....	17
4.4 Agrochemické zkoušení půd	18
4.4.1 Historie AZPP.....	18
4.4.2 Extrakční činidla	18
4.4.3 Využití výsledků z AZPP	19
4.4.4 Vývoj půdní reakce a obsahu P v zemědělských půdách ČR	20
4.4.4.1 Půdní reakce	20
4.4.4.2 Přístupný fosfor	20
4.5 Jarní pšenice.....	22
5 Metodika pokusu	23
5.1 Odběr vzorků z pozemků	23
5.1.1 Parametry pro výběr vzorků	23
5.1.2 Seznam lokalit, kde byly odebírány vzorky	23
5.1.3 Odběr a sušení půdních vzorků.....	24

5.2	Založení nádobového pokusu	25
5.2.1	První nádobový pokus (2015)	25
5.2.2	Druhý nádobový pokus (2017).....	26
5.3	Analytická stanovení	27
5.3.1	Přehled provedených analýz.....	27
5.3.2	Analýzy rostlin.....	28
5.3.3	Statistická vyhodnocení	28
6	Výsledky	29
6.1	Popisná statistika	29
6.2	Tabulky korelací	34
6.3	Tabulky a grafy regresí.....	37
7	Diskuze	42
8	Závěr	46
9	Seznam použité literatury.....	47
10	Seznam obrázků, tabulek a grafů	55

1 Úvod

Fosfor (P), je jedním z nejdůležitějších prvků ve výživě rostlin. Zdroje pro výrobu fosforečných hnojiv jsou však omezené.

Přes nezbytnost P v rostlinném metabolismu je jeho obsah v půdě poměrně nízký. Vyšší obsah fosforu je přítom u většiny půd v povrchových vrstvách, protože se zde vyskytuje zvýšená biologická aktivita způsobující akumulaci organického materiálu. Vliv má často i aplikace organických a minerálních hnojiv. Obsah půdního fosforu se však může měnit v závislosti na mateční hornině, textuře a jiných faktorech hospodaření (poměr a druh dodaného P a způsob kultivace půd). Uvedené vlivy pak působí i na relativní obsahy organických a minerálních forem fosforu. Z hlediska vazeb P v půdě můžeme vytvořit tyto tři základní skupiny: anorganické sloučeniny fosforu, organicky vázaný a výměnně sorbovaný fosfor. Množství fosforu vázaného v jednotlivých frakcích v daném čase především na době aplikace hnojiva včetně vlivu i dříve provedených zásahů.

Stupeň přístupnosti rostlinám závisí na chemických, fyzikálně chemických a fyzikálních vlastnostech daného typu půdy, na sezónní dynamice jejího vodního, vzdušného a teplotního režimu, na biologické aktivitě půdy, na druhu rostliny atd.

Při současném omezeném hnojení statkovými hnojivy a minerálními hnojivy dochází k odčerpání fosforu z půdy, které přesahuje vstupy. K imobilizaci přístupného fosforu dochází rovněž vlivem okyselování půd, které zapříčiňuje absence vápnění. Půdní reakce významně ovlivňuje půdotvorné procesy, přeměny organické hmoty v půdě, růst rostlin, půdní organizmy a ovlivňuje přístupnost a následně přijatelnost fosforu a ostatních biogenních prvků pro rostliny.

Obsah fosforu v půdě patří proto mezi základní agrochemické parametry, které jsou sledovány pomocí agrochemického zkoušení zemědělských půd. Stanovením přístupné formy fosforu se získávají informace, dle kterých lze určit některé parametry půdní úrodnosti.

Dříve byl P v půdách ČR a SR vyhodnocován metodou dle Egnera, později byl zaveden výluh univerzálním činidlem Mehlich 2 a od roku 1999 činidlem Mehlich 3. Mehlich 3 má mnohem větší účinnost u vytěšňování jednotlivých živin (u fosforu o 20 % a více).

Řada autorů uvádí, že k hlavním nevýhodám činidla Mehlich 3 je horší extrakce přístupného P na karbonátových půdách, způsobená neutralizací činidla. Cílem této diplomové práce proto bylo potvrdit nebo vyvrátit toto tvrzení pro karbonátové půdy v České Republice.

2 Cíl práce

Cílem práce bylo na základě výsledků nádobových pokusů s pšenicí jarní potvrdit nebo vyvrátit teorii o snížené účinnosti metody Mehlich 3 pro stanovení fosforu v karbonátových půdách.

Dalším cílem bylo zjištění korelací mezi obsahem P v půdě a obsahem a odběrem P rostlinami pšenice jarní.

3 Hypotéza

Karbonátové půdy jsou typické vysokou hodnotou pH. Proto lze očekávat, že zde kyselý působící činidlo Mehlich 3 bude neutralizováno a dojde ke snížení jeho extrakční účinnosti.

Dá se předpokládat, že v případě snížení extrakční účinnosti činidla Mehlich 3 budou zjištěny pouze slabé korelace mezi obsahem P v půdě a obsahem a odběrem P rostlinami.

Předpokladem je, že nádobové pokusy poskytnou pouze orientační výsledky a bude tedy třeba další výzkum v terénních podmínkách.

4 Přehled literatury (literární rešerše)

Rostliny jsou závislé na rozsahu esenciálních minerálních živin, které rostliny získávají z půdy pomocí kořenů. Tyto živiny se dělí na makroživiny (potřebné ve velkém množství) a mikroživiny (stopové prvky) v závislosti na požadovaném množství. Příklady makroživin jsou dusík, fosfor, síra, draslík, hořčík a vápník. Fosfor patří mezi esenciální prvky, protože je potřebný pro rostlinu, aby její životní cyklus byl kompletní a normální a žádný jiný prvek ho nemůže nahradit (Ruttenberg, 2014; Lack *et al.*, 2005; Öpik *et al.*, 2005; Michalík, 2001; Gardner *et al.*, 1985).

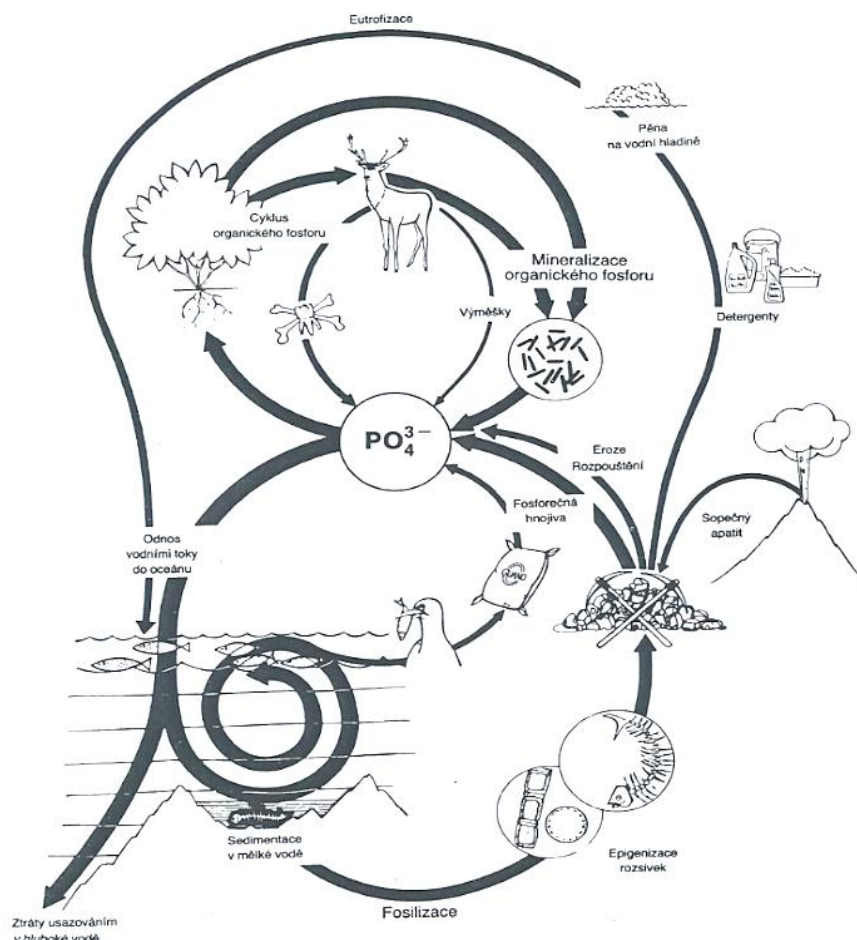
4.1 Fosfor

Jedním ze základních makrobiogenních prvků, který je nezbytný pro všechny metabolické procesy je fosfor (P) (Mikanová *et Šimon*, 2011).

Fosfor patří mezi nezastupitelné prvky, nezbytné pro růst a vývin rostlin. Nemůže být nahrazen jiným prvkem. Přesto je jeho obsah v půdě poměrně nízký (Blume *et al.*, 2002; Mengel, 1991).

Sanchez (2007) uvádí, že fosfor v rostlině je relativně pohyblivý a kvůli tomu může dojít k jeho uvolňování do půdního roztoku. To může představovat až šestinu přijatého fosforu. Přírodní biochemický cyklus fosforu je pomalý (obr. 1). Velká pozornost je věnována fosforu v zemědělské půdě, transformaci a pohybu v půdě.

Podle Van Wazera (1958) se fosfor v přírodě vyskytuje v nejvyšším oxidačním stupni jako pětimocný aniont kyseliny ortofosforečné PO_4^{3-} . Minerály, které obsahují fosfor jsou nejčastěji apatity.



Obrázek 1: Cyklus fosforu (Duvigneaud, 1988).

4.1.1 Fosfor v půdě

Larcher (1988) uvádí, že rostlinné živiny jsou v půdě obsaženy buď v roztoku, anebo vázané. V půdním roztoku je rozpuštěn jen nepatrný podíl (méně než 0,2 %) celkové půdní zásoby živin. Asi 98 % biogenních prvků, obsažených v půdě, je uloženo v opadu, humusu a těžko rozpustných anorganických sloučeninách, nebo zabudováno v minerálech. Ty tvoří živinovou zásobu, která se stává přístupnou rostlinám velmi pomalu, tak jak zvětrávají nerosty a mineralizuje se humus. Zbývající 2 % živin jsou vázána na půdní koloidy.

Množství fosforu na Zemi je odhadováno na 10^{19} tun a z toho se uvádí, že v zemské kůře je průměrně 0,12 % fosforu (Van Wazer, 1958). Dle Vaněk *et al.*, (2007) se celkový obsah fosforu v půdě pohybuje v rozmezí 0,01 – 0,15 %. Půdy s vyšším obsahem organické hmoty obsahují více fosforu než půdy lehké.

V některých případech se celkový obsah fosforu v půdě pohybuje až do 0,2 %. V ornici našich půd je obsah fosforu poměrně nízký a to kolem 0,07 % P. Většina fosforu v půdě je

v anorganických a organických vazbách (pevná fáze) nebo je v menší míře rozpuštěn v půdním roztoku, popř. výměnně sorbován (Baier *et* Baierová, 1985).

Globální vstupy fosforu do půdy se nemohou vyrovnat odběrům fosforu při sklizni a ztrátám. Ztráta fosforu z orné půdy ve světě je asi 10,5 milionu tun ročně, což odpovídá přibližně polovině vytěženého fosforu na světě za rok (Mackey, 2009; Liu *et al.*, 2014).

Je-li půda bohatá na organickou hmotu a jsou-li v ní procesy díky aktivitě mikrobiálních populací rychlé, je půda stále znovu zásobována asimilovatelným P, který nemá čas se fixovat, tím spíše, že humus vytváří komplexy s Al a Fe, se kterými se fosfor nesráží. Tak humus spolu s pedoflórou regulují zásobování P ve fytoceóze, a tím i v celé biocenóze. To ovšem nezabraňuje ztrátám P vyluhováním, zvláště v erodované půdě, tyto ztráty mohou být do jisté míry výhodné, protože se tak zásobují vodní ekosystémy a umožňuje se tam vývoj živých organismů. Protože zásoby P končí neodvratně na dně oceánu, je fosfor naléhavým problémem pro příští generace (Mackey, 2009; Duvigneaud, 1988).

Jak již bylo uvedeno, nadpoloviční část celkového P v půdách je pro rostliny nepřístupná (Vaněk *et al.*, 2012; Voplakal, 2001; Gardner *et al.*, 1985; Ivanič *et al.*, 1984). Při vysoké hodnotě pH reaguje fosfor s vápníkem a stává se nerozpustným. Při nízkém pH je fosfor nedostupný pro rostliny kvůli vazbě na nerozpustné fosfáty hliníku a železa (Gardner *et al.*, 1985).

Obsah fosforu je závislý na půdním typu, půdním druhu, obsahu organických látek a půdotvorném substrátu (Fecenko *et* Ložek, 2000).

V půdním profilu je rozmístění fosforu ovlivňováno genezí půdy. V černozemním typu půd může být rozmístěn fosfor téměř vyrovnaně. V chudších půdách je fosforu nejvíce v ornici. S přibývajícím organickou hmotou v půdě přibývá i obsah organofosfátů. Z tohoto důvodu humózní horizonty obsahují zpravidla více fosforu než vrstvy spodní a půdotvorný substrát (Ivanič *et al.*, 1984).

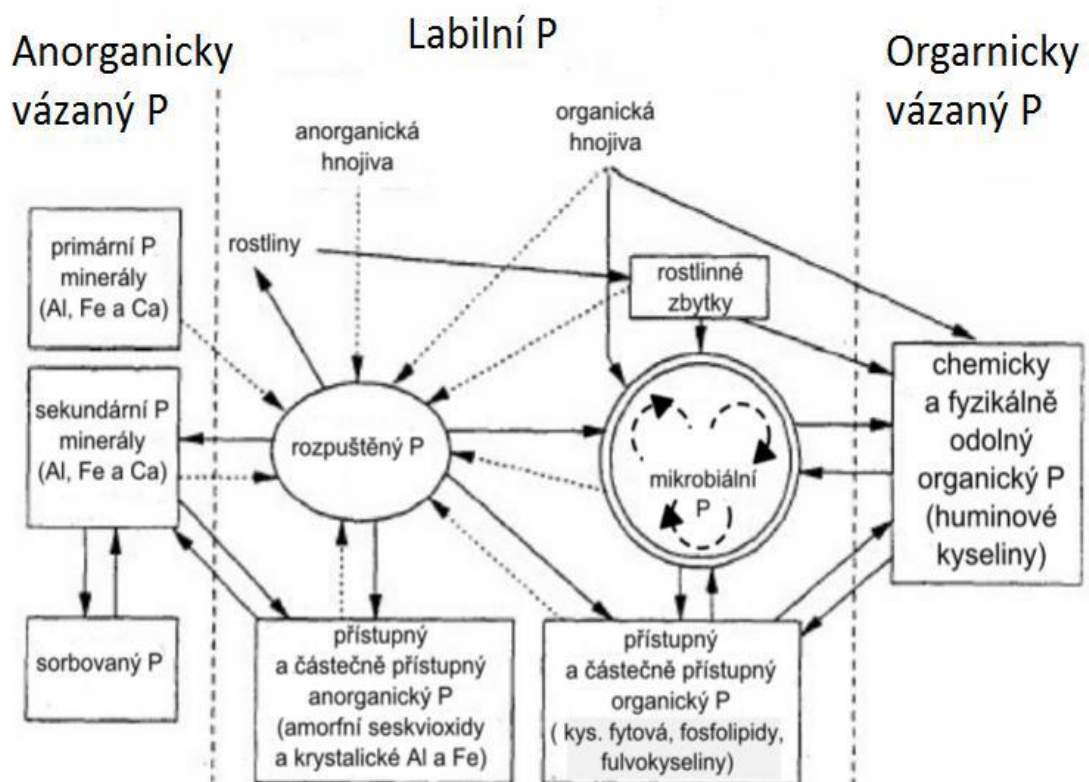
Obsah fosforu se může měnit s ohledem na texturu a matečnou horninu. Výrazný vliv na obsah fosforu má aplikace minerálních a organických hnojiv. Zmíněné vlivy působí i na obsahy minerálních a organických forem fosforu (Ivanič *et al.*, 1984; Sharpley, 1995; Nash *et al.*, 2014).

Zdrojem organického fosforu jsou mimo jiné i živočišné a rostlinné zbytky. Množství organického fosforu v půdě mohou mít vliv tyto faktory: podnebí, vegetace, půdní typ, střídání plodin a hnojení (Sims *et al.*, 2005).

V půdě je přirozeným zdrojem fosforu minerál apatit a v menší míře i fosforečnany železa s příměsí manganu tzv. tripity. Dále vodnaté fosforečnany hlinitě tzv. wawelity. Zvětváním těchto minerálů se uvolňuje aniont kyseliny ortofosforečné a přechází do anorganických nebo organických forem sloučenin. Některé z těchto rozmanitých forem slouží k výživě rostlin (Jurčík, 1978).

Základem různých forem fosforu v půdě jsou sloučeniny kyseliny trihydrogenfosforečné a v malé míře vazby kyseliny difosforečné. Sloučeniny fosforu, které jsou potenciálním zdrojem výživy rostlin a půdních mikroorganismů, jsou minerální a organické. Obě formy jsou v půdě postupně přeměňovány (obr. 2), avšak na celkovém obsahu fosforu se podílejí rozdílně (organický fosfor 20–75 %, minerální forma 35–75 %) (Vaněk *et al.*, 2012; Harrison, 1987).

Podle Balíka *et al.*, (2002) můžeme v půdě z hlediska vazeb rozlišit tři základní skupiny fosforu: anorganické, organické a sorbovaný fosfor.



Obrázek 2: Půdní cyklus fosforu podle přeměn (Steward et Shapley, 1987).

4.1.1.1 Organicky vázaný fosfor

Obsah v našich půdách se pohybuje od 11 do 55 % a pochází z minerálního podílu fosforu. Je imobilizován sorpcí rostlinami a mikroorganismy. Tvoří v půdě část organické hmoty (Ivanič *et al.*, 1984).

Organický fosfor je tvořen hlavně fytinem, dále fosfolipidy, nukleovými kyselinami, nukleoproteidy a fosforylovanými lipidy. Nacházejí se v kořenové hmotě a tím se dostávají posklizňovými zbytky dále do půdy (Vaněk *et al.*, 2012).

Fosfor se uvolňuje pomocí mineralizačních procesů do formy minerální, která je tak pro rostliny díky půdním organismům přijatelná (Ai *et al.*, 2009).

Fytáty mohou být sorbovány půdními částicemi v půdě. Jako anionty mohou být vázány v sorpčním komplexu a přispívat k doplnění fosforu v rhizosféře (Balík *et al.*, 2002).

4.1.1.2 Anorganické sloučeniny fosforu

Naše zemědělské půdy obsahují více než polovinu veškerého množství fosforu v minerálních vazbách (Richter *et Hlušek*, 1999). Macháček *et al.* (2004) uvádí, že anorganických sloučenin fosforu je v půdách ČR okolo 50 %.

Podle Sharpleyho (1995) jsou anorganické sloučeniny fosforu pro rostliny nejčastějším zdrojem výživy fosforem.

Množství minerálních forem fosforu ovlivňují nejvíce tyto faktory: druh a typ půdy, hloubka půdního profilu a úroveň hnojení (Macháček *et al.*, 2004).

Problémem může být fakt, že většina fosforu je pro rostliny málo přístupná kvůli špatné rozpustnosti minerálních sloučenin ve vodě (Richter *et Hlušek*, 1999). Tvrzení potvrzuje i Ivanič *et al.* (1984), který uvádí, že z celkového obsahu fosforu v půdě je asi jen 1-8 % vodorozpustných sloučenin přijatelná rostlinami.

Mezi anorganické sloučeniny patří minerály jako: hydrogen fosforečnan vápenatý, chlorapatit, strengit, variscit, oktakalciumfosfát, hydroxylapatit. Čím je vyšší koncentrace vápníku v půdním roztoku (vyšší hodnota pH půdy), tím se snadněji z vodorozpustných forem fosforu většiny minerálních hnojiv stávají formy stabilnější (Balík *et al.*, 2002).

4.1.1.3 Sorbovaný fosfor

Sorpce je u fosforu složitým procesem. Často u něj probíhá více sorpcí (rychlá reversibilní sorpce na povrch půdních částic a pomalá sorpce závislá na čase). Při těchto procesech může docházet k navázání fosforu pod aktivní povrchy půdních částic nebo oxidů železa či hliníku nebo dochází ke srážení fosforu vápníkem (McGechan *et al.*, 2002).

Sorpce fosforu může být uskutečněna na kalcitu, allofanu, Fe/Al oxidech, jílových minerálech a organických Al/Fe komplexech. Ke zvýšení mobility sorbovaného fosforu přispívá vápnění půd (Balík *et al.*, 2002).

Podle Ivaniče *et al.* (1984) rozeznáváme 3 druhy sorpce. Chemickou sorpci, kde vznikají těžko rozpustné anorganické fosfáty, biologickou sorpci, kde dochází k poutání fosforu pomocí rostlin a mikroorganismů a fyzikálně chemickou sorpci, kde dochází k poutání iontů na jílových minerálech.

4.1.2 Fosfor v rostlině

Rostliny potřebují mnoho anorganických prvků, pocházejících z minerálů nebo z minerálů dostupných rostlinám po rozkladu organické hmoty. Prvky rostliny přijímají jako ionty, a ty buď začleňují do své hmoty nebo je ukládají v buněčné šťávě (Larcher, 1988).

Fosfor se v rostlině vyskytuje např. v membránových fosfolipidech, nukleových kyselinách (DNA, RNA) a nukleotidech nebo adenosin fosfátech (ATP, ADP, AMP). Je transportován buď jako anorganický fosfát nebo jako fosfátový cukr (Ruttenberg, 2014; Lack *et al.*, 2005; Öpik *et al.*, 2005; Michalík, 2001; Gardner *et al.*, 1985) a je důležitý i pro fosforylační reakce fotosyntézy.

V sušině kulturních rostlin se nachází 0,1 až 0,5 % fosforu a vyskytuje se v anorganické i v organické vazbě. Jejich poměr závisí na fyziologickém stáří organismu a na intenzitě příjmu fosforu (Sorauer *et al.*, 1969; Ivanič *et al.*, 1984).

4.1.1 Příjem fosforu a jeho transport v rostlině

Fosfor je přijímán rostlinami ve formě aniontů kyseliny trihydrogenfosforečné, převážně ve fosfátové formě H_2PO_4^- , HPO_4^{2-} a PO_4^{3-} (Vaněk *et al.*, 2012; Öpik *et al.*, 2005). Fosfor je absorbován primárně jako jednomocný iont H_2PO_4^- a méně jako dvoumocný iont HPO_4^{2-} , který je převládající při neutrálním pH nebo vyšším. Všeobecně platí, že anionty H_2PO_4^- a HPO_4^{2-} vstupují do vnitřního prostoru buněk aktivně v symportu s H^+ , anebo

v antiportu s OH^- . Kořeny aktivně absorbují P z velice nízkých koncentrací v půdním roztoku.

Fosfor může být v rostlině transportován ze starších částí rostliny do mladších částí (Michalík, 2001; Larcher, 1988; Gardner *et al.*, 1985).

Jednotlivé formy jsou přístupné podle hodnoty pH. Optimální pH pro příjem živin je 6,0 a 7,0 (Vaněk *et al.*, 2012; Michalík, 2001; Gardner *et al.*, 1985).

Dalším faktorem omezující příjem fosforu je koncentrace P, teplota, fyziologický stav rostlin, přítomnost kationtů, aniontů atd. (Mackey, 2009; Michalík, 2001).

Negativní vliv na příjem P má kationt K^+ a pozitivní vliv mají kationty Ca^{2+} a Mg^{2+} (Michalík, 2001).

Fosfáty jsou rostlinami přijímány jako anorganický fosfor (xylémovými cestami) nebo jsou esterifikovány hydroxylovou skupinou na sloučeniny uhlíku (cukry). Fosfáty jsou nepostradatelnou složkou nukleových kyselin a součástí energetického a látkového metabolismu (Lack *et al.*, 2005; Michalík, 2001; Larcher, 1988).

U fosforu je důležité, aby se do půdního roztoku z pevné fáze půdy rychle doplňoval. Z půdního roztoku je P přijímán i při nízké koncentraci, ale musí překonávat velký koncentrační gradient. Při nižších teplotách je mineralizace organických sloučenin P v půdě omezena a je omezen i příjem P, jelikož rostliny mají málo energie. V takovém případě je patrný nedostatek P u rostlin i při dostatečném obsahu P v půdě (Vaněk *et al.*, 2012).

4.1.1.1 Anorganický fosfor

V rostlině je anorganický fosfát velmi mobilní a je přítomen hlavně v buňkách s vysokou metabolickou aktivitou. U vzrostných rostlin je minerální fosfát přítomen hlavně v listech. Menší množství fosfátu je v semenech rostlin (Nátr *et Laštůvka*, 1980).

4.1.1.2 Organický fosfor

Jde o estery kyseliny fosforečné nebo o fosforylované sloučeniny. Mezi organofosfáty s esterickou vazbou patří fosfolipidy, fytin, nukleové kyseliny a nukleoproteiny. Fytin se vyskytuje jako sůl hořčíku i vápníku a je nejčastěji v semenech rostlin. Složku membrán tvoří fosfolipidy. Nukleoproteiny a nukleové kyseliny jsou významné ve výstavbě buněčného jádra, při přenosu dědičných vlastností a rozmnožování rostlin (Ivanič *et al.*, 1984).

4.1.2 Nedostatek fosforu

Při slabém nedostatku fosforu nejsou symptomy nápadné. Při silném nedostatku fosforu se může objevovat tmavé zbarvení listů tzv. hyperchlorofylace. Může docházet až k nafialovění nebo načervenaní listů, které je způsobeno anthokyany (Halavatau *et al.*, 1996).

Symptomy na listech a anthokyanové zbarvení potvrzuje i Dobermann a Fairhusta (2000).

Podle Wallace (1961) je sice fialový odstín listů charakteristický pro nedostatek fosforu, ale musíme brát na vědomí, že tento symptom může vznikat i z mnoha jiných důvodů.

Mluvíme-li o jednoděložných rostlinách, tak se nedostatek fosforu projevuje horším odnožováním a zkrácením stébla. U dvouděložných rostlin mohou vznikat nekrózy a listy jsou dlouhé s nápadně vystouplou žilnatinou (Richter *et Hlušek* 1999).

Hyperchlorofylace a růstová deprese je patrná i při projevu nedostatku fosforu u zelenin. Fialové nebo červené zbarvení listů je běžnější u zelí a rajčat. U ovocných kultur se projevuje hlavně dlouhodobý nedostatek fosforu a to tím, že je omezen růst stromů a tím i plodnost. Listy mají tmavší bronzovou barvu a jsou menší. Děje se tak kvůli malému přírůstku letorostů. Listy se na podzim dříve zbarvují a opadávají. Opožďuje se rašení pupenů. K nafialovému zbarvení listů dochází hlavně u broskvoní. Dále u broskvoní dochází ke kožovatění listů. Při uskladnění jsou plody (např. jabloní) kvůli nedostatku fosforu často napadány chorobami. Ke zbarvení do fialova, ke zmenšení listů, ke špatnému dozrávání letorostů i k bronzovému lesku na listech dochází i při nedostatku fosforu u vinné révy. Dochází k opadu bobulí, ke snížení kvality hroznů, ke snížení výnosu hroznů, a to důsledkem zmenšené násady květů (Hlušek *et al.*, 2002).

Symptomy nedostatku fosforu jsou opačné oproti nedostatku N a S, na listech je vidět tmavé zbarvení a listy bývají zakrnělé. Vzhledem k přesunu fosforu do mladších tkání je vidět nedostatek fosforu na starších listech rostlin jako první. U jehličnanů zasychají špičky jehlic. Často dochází k poruchám reprodukčních procesů jako je například zpožděné kvetení (Larcher, 1988).

Dlouhodobý deficit fosforu způsobuje velké poruchy fosforečného a dusíkatého metabolismu. To má za následek snížení syntézy bílkovin a zvýšení amidů, alantoinů a volných nukleotidů. Dlouhodobý nedostatek sníží i transport fosforu z kořenů do nadzemních orgánů rostlin. Rostliny se přizpůsobují mírnému nedostatku fosforu vytvořením dodatečných kořenů.

Důležité pro příjem fosforu jsou dobré vláhové podmínky. Projevují se zvýšením pohybu fosfátů v půdě a ovlivňují funkční procesy buňky, spojené s akumulací fosforu. Při

vodním deficitu dochází k přerušení aktivního transportu P a začne převládat pasivní transport P. Dochází tak kvůli plazmolýze buněk a destrukci plazmodezem (Michalík, 2001).

Vyřešit nedostatek fosforu v době vegetace není úplně jednoduché, protože fosfor z aplikovaných hnojiv nepronikne až ke kořenům. Z toho vyplývá, že hnojení fosforem na povrch půdy není vhodné a je téměř neúčinné. Podobně je to u listové výživy rostlin fosforem, proto je důležité řešit nedostatek fosforu až k následným plodinám a úplně nejvýhodněji se jeví řešit nedostatek fosforu aplikací hnojiva zároveň při setí. K tzv. hnojení pod patu se hodí hlavně hnojivo Amofos nebo trojitý superfosfát. (Vaněk *et al.*, 2012).

4.1.3 Nadbytek fosforu

V polních podmínkách ČR se nadbytek fosforu vyskytuje jen výjimečně. Nadbytek hrozí při vysokém melioračním nebo zásobním hnojení. K vytvoření nerozpustných sloučenin vazbou fosforečnanů na některé kovy dochází ke krátkodobému snížení přijatelnosti právě těchto kovů (Vaněk *et al.*, 1998).

U zelenin není nadbytek fosforu běžný. Při větších dávkách vodorozpustného fosforu může dojít k předčasnému dozrání plodů a ke snížení výnosů v důsledku omezování příjmu jiných živin. S přehnojením fosforem se můžeme setkat hlavně u rajčat, plody nejsou tak chutné a dochází k zvýšení obsahu sušiny. Ke snížení mrazuvzdornosti kvůli nadbytku fosforu hrozí u ovocných stromů. K vysokému obsahu fosforu v rostlinách může dojít hlavně při závlaze na půdách s vysokým obsahem P nebo v méně častým případem přehnojování listovou výživou s obsahem P. Může docházet k nedostatku některých kovů jako je zinek, železo. Dojde k zablokování těchto kovů ve vodivých pletivech nerozpustnými fosfáty. U vinné révy vápník, železo, zinek jsou přeměňovány na nerozpustné formy. Při nadbytku fosforu se v bobulích zvyšuje podíl semen a tím dochází ke snížení výnosu (Hlušek *et al.*, 2002).

4.2 Fosforečná hnojiva

Fosforečná hnojiva obsahují živiny přístupné až po jejich rozkladu nebo živiny přímo přístupné pro rostliny. Fosforečná hnojiva se vyrábí z přírodních nalezišť z dvou typů surových fosfátů. Apatity vznikají jako vykrystalizované minerály a fosfority jsou různě zbarvené amorfní sedimenty (Baier *et Baierová*, 1985).

Apatity se nacházejí v půdotvorných vyvřelých horninách nebo jsou v žilách s jinými nerosty. Ložiska apatitů se nachází hlavně v pásmu u severního polárního kruhu. Apatity kryjí

přibližně pouze jednu desetinu přírodních fosfátů, které se používají na výrobu fosforečných hnojiv. Vzhledem k nepřístupné formě P se nehodí k přímému hnojení (Ivanič *et al.*, 1984).

Ložiska fosforitů mají organický původ, vznikají mineralizací koster odumřelých organismů, minerální fosfority vznikají vysrážením kyseliny fosforečné vápníkem z vody v mořích a usazováním fosforečnanů vápenatých spolu se zrnky uhličitanu vápenatého, uhličitanu hořečnatého aj. (Ivanič *et al.*, 1984).

Apatity a fosfority mají rozdílný původ, ale jsou si i chemicky podobné. Obě formy jsou terciálními solemi vápníku a kyseliny ortofosforečné spolu s fluórem, chlórem a dalšími příměsemi (Ivanič *et al.*, 1984).

Množství navázaného P závisí na době aplikace hnojiva, ale také záleží na dřívějších zásazích na pozemcích (McGechan *et Lewis*, 2002).

Přístupnost fosforečných hnojiv rostlinám je závislá na chemických, fyzikálních a fyzikálně-chemických vlastnostech, na vodním a teplotním režimu, na biologické aktivitě půdy, ale i třeba na druhu rostlin atd. (Macháček, 2002).

Formy hnojiv:

Mleté fosfáty - výhodná je společná zaorávka se statkovými hnojivy. Jemně mleté fosfáty se také hodí pro zásobní hnojení ve vyšších dávkách společně s hořčíkem a stopovými prvky. Nejlépe přijímají fosfor z mletých fosfátů bobovité rostliny a rostliny s mohutně vyvinutým kořenovým systémem. Mezi nepříznivé vlastnosti patří jejich použití hlavně u kyselých půd, problémy při manipulaci, distribuci a aplikaci (Ivanič *et al.*, 1984).

Jednoduchý superfosfát – obsah fosforu je 7,5 – 8,5 %. Forma fosforu je dobře přijatelná pro rostliny, protože je ve vodorozpustné formě. Jednoduchý superfosfát obsahuje síru, hodí se pro hnojení spolu s organickými hnojivy nebo se používá pro předzásobní hnojení před zpracováním půdy nebo k hnojení „pod patu“ (Vaněk *et al.*, 1998). Nehodí se na kyselé půdy (Ivanič *et al.*, 1984).

Trojité superfosfát - obsah fosforu 20 – 21 %. Fosfor v hnojivu je vodorozpustný. Použití je podobné jako u jednoduchého superfosfátu. Výhodou je dobrá skladovatelnost a menší náklad na dopravu díky vyšší koncentraci (Vaněk *et al.*, 1998).

Kombinovaná vícesložková hnojiva – obsahují dvě a více živin. Mezi ně patří například Diamofos (18 % N, 20,2 % P), Lovofert NP (20 % N, 8,8 % P), Lovofert NPK 15 – 15 – 15 (15 % N, 6,6 % P, 12,5 % K) aj. (Vaněk *et al.*, 2016).

Amonné fosforečnany - **Amofos** - Obsah fosforu je 21 – 23 % a obsah dusíku je 11-12 %. Téměř veškerý fosfor v amofosu je vodorozpustný. Hnojivo lze míchat s močovinou nebo s draselnými hnojivy. Na podzim lze aplikovat amofos jako zásobní hnojení s následnou zaorávkou nebo lépe kvůli teplotě (nitrifikaci) v pozdějším období (Ivanič *et al.*, 1984).

Mleté přírodní fosfáty – **Hyperkorn + magnezium** - obsahuje 11,5 % fosforu, 1,8 % hořčíku, zinek, bór, mangan, molybden a 36 % vápníku. Je méně vodorozpustný, proto je pomaleji přijímán rostlinami. Díky vysokému obsahu vápníků se hodí do kyselých půd.

Hyperfosfát - obsahuje 12, 8 % fosforu a 1,8 % hořčíku, zinek, bór, mangan, molybden. Fosfor je těžce rozpustný a hodí se k zásobnímu hnojení (Vaněk *et al.*, 1998).

Dvousložková kapalná hnojiva – **Fostim, Symsol, NP – sol, NP – suspenze** – mají podobné složení jako Amofos. Ve 100 l roztoku je 10 kg N a 13,2 kg P. Hnojiva se dají použít na list nebo k základnímu hnojení. Hnojiva se nesmí mísit s hořčíkem a vápníkem (Vaněk *et al.*, 2016).

4.3 Využití odpadních látek – alternativy hnojení

S vyšší životní úrovní lidí vzniká velké množství odpadů, které může využít zemědělská výroba. Díky tlaku na kvalitu povrchových vod vzniká větší produkce čistírenských kalů, kvůli zvýšení výroby energie z obnovitelných zdrojů se zvětšuje množství odpadů z bioplynových stanic a popelů ze spalování biomasy. Je potřeba zvažovat rizika (rizikové prvky) a klady (přísun živin a organické hmoty) při použití odpadních látek (Vaněk *et al.*, 2016).

4.3.1 Čistírenské kaly

Kaly lze využívat několika způsoby: na mokré spalování, na spalování v teplárnách, na spalování v cementárenské peci, na termické zpracování, na skládkování, na kompostování a hnojení zemědělské půdy (Černý *et al.*, 2014).

Velké množství fosfátů lze z odpadní vody recyklovat a následně používat jako organické hnojivo. Zachycením fosforu z odpadních vod se snižuje množství fosforu vypouštěného do povrchových vod (Montag *et al.*, 2008).

Hnojení čistírenskými kaly má příznivý vliv na vlastnosti půdy včetně menšího poklesu pH oproti minerálním hnojivům. Dochází ke zlepšení půdních vlastností jako například objemové hmotnosti půdy a pórovitosti. Navíc mají půdy větší schopnost zadržet vodu. Rizika používání kalů jako hnojiva řeší legislativa ČR. Obsah živin závisí na původu kalů a jejich

ošetření. Kladem je vysoký obsah organických látek, dusíku a fosforu. Nejvyšší povolená dávka upraveného kalu je 5 t sušiny/ha za rok. Při takové dávce je do půdy dodáno asi 160 kg N, 60 kg P, 15 kg K, 125 kg Ca a 20 kg Mg. Průměrný obsah organických látek a živin jsou uvedeny v tabulce 1. Živiny z větší části jsou přijatelné rostlinami hned prvním rokem. (Černý *et al.*, 2014; Vaněk *et al.*, 2016).

Tabulka 1: Průměrný obsah organických látek (OL) a živin v sušině čistírenského kalu (%) (Vaněk *et al.*, 2016)

<i>OL</i>	<i>N</i>	<i>P</i>	<i>K</i>	<i>Ca</i>	<i>Mg</i>
46	3,2	1,2	0,3	2,5	0,4

4.3.2 Digestát

Digestát je fermentační zbytek z bioplynových stanic. Ke hnojení rostlin se může využívat i kompost z digestátu po separaci s tím, že má podobné vlastnosti jako slabší kombinovaná minerální hnojiva (Holečková *et al.*, 2013).

Kolář *et al.* (2008) uvádí, že složení separátu jako netransformovaného zbytku procesu anaerobní fermentace závisí na původu a chemickém složení materiálů vstupujících do procesu fermentace. Proces fermentace je dle Dostál *et al.* (2014) spojen se ztrátami uhlíku. Dávkou 1 t sušiny/ha (13,5 t digestátu) dodáme přibližně 24 kg N, 18 kg P, 58 kg K, 40 kg Ca a 10 kg Mg. Průměrné hodnoty pH, obsah organických látek (OL), sušiny a živin jsou uvedeny v tabulce 2. Živiny jsou jen z části okamžitě přijatelné rostlinami (Vaněk *et al.*, 2016).

Jako nejhudší se uvádí digestát z kejdy skotu a jako nejlepší se uvádí digestát získaný ze směsi siláže pícnin a kejdy skotu. Aplikace digestátu je však spojena s četnými problémy. Jedná se např. o:

- malé množství primárních organických látek, tím spojená rizika poklesu bilance půdní organické hmoty (Kolář *et al.*, 2010).
- rizika přívodu NH_4^+ , K^+ , Na^+ do půd chudých na dvojmocné kationty Ca^{2+} , Mg^{2+} vede ke zhoršení struktury půdy
- obtížné skladování, manipulace a aplikace vzhledem k utužení půdy (Dostál *et al.*, 2014).

- aby nedocházelo ke ztrátám amonného dusíku, vyžaduje digestát co nejrychlejší zapravení do půdy (Vaněk *et al.*, 2016)

Tabulka 2: Průměrné hodnoty pH, obsah organických látek (OL), sušiny a živin ve zbytcích po fermentaci (Vaněk *et al.*, 2016)

	<i>Procento v původní hmotě</i>				<i>Procento v sušině</i>				
	pH	OL	sušina	N-NH ₄	N-NH ₄	P	K	Ca	Mg
Digestát	9,6	4,7	7,4	0,18	2,4	1,8	5,8	4,0	1,0
Separát	8,1	16,2	23,1	0,16	0,7	1,0	2,2	2,2	0,5
Fugát	9,6	9,6	6,7	0,17	2,5	1,9	4,3	4,3	1,1

4.3.3 Popel z biomasy

Spalování biomasy patří mezi obnovitelné zdroje energie a její využití narůstá. Pro výrobu energie z biomasy se využívá dřevo (dřevní odpad), zemědělské plodiny - odpad při jejich zpracování, živočišné zbytky, vodní rostliny (řasy), biologický komunální odpad atd. (Demirbas, 2009).

Využití popelů jako hnojiva bylo známé už v pravěku. Jako příklad můžeme uvést vypalování lesů, kde pozemky vykazovaly lepší úrodnost (Vaněk *et al.*, 2016).

Dřevěný popel zůstává v kotli po spálení organické hmoty jako anorganická část paliva (Khan, 2009). Obsah popela kolísá v biomase od 1 do 6 %. Dřevo obsahuje pouze 0,3 – 1 % popela, větší hodnoty jsou v popelu slámy (5 %) (Kalembkiewicz *et Chmielarz*, 2012). Průměrná složení vybraných typů popele jsou uvedena v tabulce 3.

Obsahy jednotlivých prvků jsou ovlivněny původem biomasy. Dřevo je bohaté na vápník, naopak popela ze slámy obsahují vysoké množství draslíku (Biedermann *et Obernberger*, 2005).

Popel po spalování dřeva by se mohl využít k úpravě pH půdy, protože má vysokou hodnotu pH (Ochecová *et al.*, 2014).

Vápník, hořčík a draslík jsou v popelu obsaženy ve formě uhličitanů, protože jsou jejich organické mineralizovány a kationty jsou přeměněny do formy oxidů, které jsou pomalu

hydratovány a přeměněny (atmosférické podmínky) do formy uhličitánů (Demeyer *et al.*, 2001).

Nevýhodou při použití popelů jako hnojiva jsou příměsi těžkých kovů, zde ovšem záleží na druhu spálené biomasy. Nejvíce těžkých kovů vzniká ze spalování dřevní štěpky, avšak obsahy rizikových prvků jsou výrazně menší než u čistírenských kalů (Park *et al.*, 2004; Omil *et al.*, 2007).

Tabulka 3: Průměrné celkové obsahy vybraných živin u souboru popelů (Ochecová *et al.*, 2014)

<i>popel</i>	<i>surovina</i>	<i>% P</i>	<i>% K</i>	<i>% Ca</i>	<i>% Mg</i>
roštový	dř.štěpka	1,64	7,14	21,19	1,98
úletový	dř.štěpka	1,35	8,50	19,33	1,59
směsný	sláma	1,79	25,75	10,35	1.62

4.3.4 Bioefektory

Jsou založeny na základě působení živých mikroorganismů a aktivních přírodních látek. Bio-efektory mohou být v závislosti na půdně-klimatických podmínkách nástrojem k překonání omezení dostupnosti živin. Mohou obsahovat mikroorganismy (bakterie, houby) a aktivní přírodní sloučeniny, jako jsou výluhy z půdy nebo kompostu, mikrobiální zbytky, rostlinné výtažky, výtažky či výrobky z biologických procesů. Tyto produkty jsou vyvíjeny pro široké spektrum plodin (např. kukuřice, pšenice a rajčata). Jejich efektivita spočívá v mobilizaci živin z hůře přístupných forem v půdě (Holečková *et al.*, 2014).

Principy účinnosti bioefektorů pro zvýšení přístupnosti živin jsou: podpora růstu kořenů, ovlivnění procesů v rhizosféře a činnosti mikroorganismů. Bioefektory mikrobiálního charakteru jsou tvořeny převážně definovanými řetězci hub *Trichodermy*, *Penicillium* a *Sebacinales*, a bakteriemi rodu *Bacillus* a *Pseudomonades* u kterých byl přesně charakterizován potenciál pro rozvoj kořenů i potenciál usnadňující rozpouštění živin. Dále do skupiny bioefektorů patří výluhy z mořských řas a rostlin, suchozemských rostlin, z kompostů a vermikompostů, ale i separované látky z těchto materiálů (Holečková *et al.*, 2017).

4.4 Agrochemické zkoušení půd

Půdní úrodnost je ovlivněna především obsahem organických látek, půdní reakcí a obsahem živin (Klement *et al.*, 2012).

Uvedené půdní parametry je potřeba sledovat. Jako prostředek pro monitoring základních informací o půdě nám slouží agrochemické zkoušení zemědělských půd (AZZP). Ročně je v AZZP v ČR prozkoušeno více než 500 tis. ha půdy (380 tis. ha orné půdy) a je odebráno téměř 80 tisíc vzorků (Smatanová *et Sušil*, 2015).

4.4.1 Historie AZZP

Základní prvky byly analyzovány a zmapovány pro zemědělské podniky v letech 1961 – 1970 a výsledky mohou být používány i v současné době (Neuberg, *et al.*, 1990).

Do roku 1980 bylo zkoušení půd prováděno v pětiletých cyklech. Tím, že se postupně zvyšovala intenzita hnojení, docházelo k rychlejším změnám půdních vlastností. Proto se interval AZZP zkrátil z pěti na tři roky. V roce 1992 byl změněn tříletý cyklus na dnešní šestiletý. Změna cyklu souvisela i s finanční úsporou státu.

Do roku 1983 byly stanovovány pouze základní půdní vlastnosti (obsah uhličitánů, půdní reakce, potřeba vápnění a obsah přístupných živin - P, K a Mg. V letech 1986 – 1991 byl monitoring rozšířen o obsahy mikroelementů (Cu, Zn, B, Mn a Mo).

Kvůli rizikům kontaminace půd byly v roce 1990 – 1992 plošně stanovovány obsahy kadmia, rtuti, olova, chromu a lokálně mědi, niklu, zinku. Z těchto průzkumů vznikl registr kontaminovaných ploch. Agrochemické rozborů půd za řadu let prošly mnoho změnami, a to z hlediska odběrů vzorků, délky cyklů, metod stanovení i hodnocení analytických hodnot (Klement *et al.*, 2012).

4.4.2 Extrakční činidla

Ideální extrakční činidlo by mělo být univerzální, vhodné pro všechny půdy, extrakci by s ním mělo jít provést rychle a jednoduše, mělo by obsahovat cenově dostupné chemikálie nezatěžovat životní prostředí, mělo by mít vysokou predikční schopnost, postup extrakce by měl být reprodukovatelný a opakovatelný. Mělo by být možné spojení s využitím moderních analytických přístrojů a postupů jako je např. ICP – AES aj. (Zbiral, 2001).

Do roku 1989 byl obsah přístupného P v půdě vyhodnocován metodou dle Egnera a obsahy přístupných K a Mg dle Schachtschabela. Od roku 1990 byl pro P, K i Mg zaveden

společný výluh – Mehlich 2 (Klement *et al.*, 2012). V roce 1999 došlo k nahrazení činidlem Mehlich 3 (Mehlich, 1984).

Důvodem je lepší schopnost činidla Mehlich 3 pufrovat pH při extrakci tak, aby nedocházelo k jeho zvýšení nad 2,9, kdy již nemá přídavek fluoridu vliv na uvolňování fosforu. EDTA, která je součástí vyluhovadla, umožňuje stanovení mědi (Škarpa, 2013). Mehlich 3 má mnohem větší účinnost u vytěsňování jednotlivých živin. U fosforu to je přibližně o 20 % více a u draslíku a hořčíku přibližně o 3 – 4 % více oproti výluhu Mehlich 2. K tomu je potřeba přihlížet v případném porovnávání s výsledky před rokem 1999 (Klement *et al.*, 2012).

Extrakční roztok Mehlich III obsahuje 0,2 mol. l⁻¹ CH₃COOH, 0,015 mol. l⁻¹ NH₄F, 0,013 mol. l⁻¹ HNO₃, 0,25 mol. l⁻¹ NH₄NO₃ a 0,001 mol. l⁻¹ EDTA (Škarpa, 2013).

Po rozšíření analýz v Mehlich 3 měření na optickém emisním spektrometru s indukčně vázaným plazmatem (ICP-OES) je měření ještě přesnější a efektivnější a umožňuje i stanovení síry i mikroelementů. ICP-OES umožňuje současné stanovení velkého množství prvků v extraktu. V současné době je možné stanovit v extraktu Mehlich 3: Ca, Mg, K, P, S, Cu, Zn, Fe, Mn, B a Al. Stanovený hliník slouží pro výpočet retence fosforu (Rayment *et Lyons*, 2011).

4.4.3 Využití výsledků z AZPP

ÚKZÚZ předává vyhodnocení AZPP Ministerstvu zemědělství ČR a dalším orgánům státní správy. Pokud si zažádá vlastník pozemku nebo zemědělský podnikatel hospodařící na zemědělské půdě, jsou výsledky poskytnuty za správný poplatek i jim. V hodnotící zprávě jsou kromě hodnot zjištěných analýzami půdních vzorků také doporučené průměrné roční dávky vápnění podle výměnné půdní reakce, rozřídění pozemků do kategorií zásobenosti dle obsahu uhličitánů a obsahu přístupných živin. Dále také poměr K:Mg, aktuální kationová výměnná kapacita a procentuální zastoupení kationtů (K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺) v půdním sorpčním komplexu. Od roku 2006 je pro lepší organizaci provádění AZPP využíváno Registru půdy Ministerstva zemědělství (LPIS). Systém má napomoci při administrativě a kontrole v oblasti zemědělských dotací. Zároveň slouží jako podklad pro vedení evidence o použití hnojiv, přípravků, pastvy a jako podklad pro sledování hospodaření na zemědělské půdě s ohledem na nitrátovou směrnici a erozní ohrožení půd. V LPIS jsou i tzv. kartogramy kritérií zásobenosti. V půdních blocích jsou vygenerovány barevně označené mapy, které vyjadřují zásoby živin P, K, Mg a Ca. S těmito informacemi a nástroji je možné vytvořit tzv. plány racionálního hnojení. Pro potřebu MZe ČR a státní správy jsou výsledky zpracovávány statistických přehledů a následně tříděny

podle krajů nebo okresů. Data jsou dále členěna dle typů pozemků – orná půda, ovocné sady, vinice, chmelnice, TTP (Klement *et al.*, 2012).

Plocha pro odběr jednoho průměrného vzorku je u orné půdy a trvalých travních porostů (TTP) 7-10 ha, u speciálních pozemků tj. chmelnic, vinic a ovocných sadů 2-3 ha. Základní půdní vlastnosti se hodnotí samostatně pro ornou půdu, vinice, sady, chmelnice a trvalé travní porosty. Půdní vzorky se analyzují v akreditované laboratoři ÚKZÚZ a stanovuje se obsah uhličitánů, půdní druh, obsah přístupného fosforu, draslíku, hořčíku a vápníku metodou Mehlich 3 (Zbiral *et al.*, 2016).

Z výměnného pH a půdního druhu se počítá potřeba vápnění a provádí se výpočet zastoupení jednotlivých kationtů v sorpčním komplexu půdy. Doplňujícím kritériem hodnocení stavu úrodnosti půdy je výpočet hmotnostního poměru draslíku ku hořčíku. Výsledky obsahů živin a pH jsou hodnoceny podle kritérií zahrnující pět kategorií. Kategorie nízký obsah vyjadřuje nedostatečnou zásobu v půdě a potřebu hnojení. Vyhovující a dobrý obsah ukazuje optimální zásobu, kterou je třeba udržovat nebo krátkodobě hnojení vynechat. Obsah vysoký a velmi vysoký ukazuje, že na dané půdě není potřeba živinu dodávat (Smatanová *et Sušil*, 2017).

4.4.4 Vývoj půdní reakce a obsahu P v zemědělských půdách ČR

4.4.4.1 Půdní reakce

Jak již bylo zmíněno, jedním z parametrů bezprostředně spojených s příjmem P je půdní reakce. Ta se v orných půdách pohybuje od 5,9 do 6,8. Na lehkých půdách se průměrná výměnná půdní reakce snížila oproti předcházejícímu odběrovému cyklu (2005-2010) z 5,9 na 5,7. Na středních půdách z 6,2 klesla na 6,1 pH se na těžších půdách téměř nezměnilo. Trend okyselování už není tak strmý jako v letech 1995 – 2005. Z rozborů v cyklu 2011 – 2016 vyplývá, že průměrná hodnota pH na orné půdě je 6,2. Silně kyselá a kyselá půdy tvoří 26,11 % (Karlovarský kraj 55,4 %, Plzeňský kraj 50,6 %, Vysočina 48,3 %) (ČSÚ, 2017).

4.4.4.2 Přístupný fosfor

Průměrný obsah přístupného fosforu na orné půdě se pohybuje v rozmezí od 72 do 130 mg.kg⁻¹. Orné půdy s nízkým obsahem fosforu tvoří 26,51 %, to znamená potřebu hnojení fosforečnými hnojivy (Karlovarský kraj 43,1 %, Plzeňský kraj 42,3 %). Vysoký a velmi vysoký obsah je na 24,64 % výměry. Průměrná hodnota přístupného fosforu u půd trvalých travních

porostů je 70 mg.kg⁻¹. Nízký obsah fosforu zaujímá 21,3 % výměry ČR. Největší podíl ploch s nízkým obsahem osforu se nachází v kraji Zlínském (34,3 %). Hnojit by potřebovala více než polovina výměry zemědělské půdy ČR. Půdní zásoba přístupného fosforu dlouhodobě klesá (Smatanová *et* Sušil, 2015).

Celková spotřeba čistých živin v ČR byla v roce 2015 137,1 kg.ha⁻¹ zemědělské půdy, to je asi 59 % úrovně z roku 1989. Spotřeba fosforečných hnojiv je 21 %. Dlouhodobé nedostatečné hnojení fosforem má za následek zvýšené čerpání fosforu z půdy, tím se snižuje úrodnost půdy (Kunzová, 2009).

Průměrná zásoba přístupného fosforu v zemědělské půdě ČR je 88 mg.kg⁻¹. Zemědělská půda s nízkou zásobou fosforu, která potřebuje intenzivní hnojení, představuje více jak 25,6 % výměry ČR. Vyhovující zásoba, která je rovněž nedostatečná pro optimální výživu rostlin a vyžaduje též dosycení fosforem, zahrnuje dalších 27,8 % výměry. Hnojit by tedy potřebovala více než polovina výměry zemědělské půdy ČR, což představuje téměř 1 900 000 hektarů.

Vysoká a velmi vysoká zásoba přístupného fosforu byla zjištěna pouze na 24,1 % výměry ČR. Půdní zásoba přístupného fosforu dlouhodobě mírně klesá. Podle kategorií zásobenosti je výměra zemědělské půdy s nízkou zásobou fosforu meziročně stejná, tj. 25,6 % a u orné půdy došlo k poklesu o 0,32 % (Smatanová *et* Sušil, 2015).

Dlouhodobý bilanční deficit v použití fosforečných hnojiv naznačuje zvýšené čerpání fosforu z půdy, čímž se snižuje její úrodnost. Porovnání vstupů fosforu spolu s průměrným odběrem rostlinami jsou uvedeny v tabulce 4. Fosforem by se mělo hnojit tak, aby nedocházelo k prohlubování jeho deficitu v půdě, které následně ohrožuje produkci rostlin. Tím je potlačena i konkurenceschopnost rostlinné výroby v ČR (Kunzová, 2009).

Tabulka 4: Porovnání vstupu fosforu do půdy v hnojivech s průměrným odběrem rostlinami v kg na ha zemědělsky využívané půdy (Kulháněk *et al.*, 2015)

<i>Období</i>	<i>1986 - 1990</i>	<i>2001 - 2005</i>	<i>2010 - 2014</i>
<i>Minerální hnojiva</i>	30	6	5
<i>Organická hnojiva</i>	15	9	8
<i>Vstupy P celkem</i>	45	16	13
<i>Odběr plodinami</i>	19	15	15
<i>Bilanční rozdíl</i>	+26	+1	-2

4.5 Jarní pšenice

Pšenice (*Triticum*) je stará přibližně 5 – 6 tisíc let. Pěstují se především nahé formy a to hlavně pšenice tvrdá a u nás nejrozšířenější pšenice obecná – setá. Oba tyto druhy mají své dvě formy: pšenici ozimou a pšenici jarní, které se liší nároky na jarovizaci. V ČR se pěstuje hlavně forma ozimá a pšenice jarní zaujímá desetinu její plochy. Její plocha se každoročně mění. Pšenice jarní se seje hlavně jako náhradní plodina na nedoseté plochy nebo za vyzimované pšenice ozimé. Pěstuje se ve všech výrobních oblastech. Jarní pšenice se využívá k potravinářským, krmným i technickým účelům. Agrotechnika pro pěstování je podobná jako u pšenice ozimé. Výjimku tvoří hnojení dusíkem, kdy se 1/2 až 2/3 aplikuje před setím a 1/3 až 1/2 na konci odnožování až začátkem sloupkování. U potravinářské pšenice se podle stavu porostu provádí kvalitativní (pozdní) přihnojení dusíkem, a to ve fázi sloupkování nebo před metáním. Poměr dusíku k fosforu a draslíku by měl být 1 : 1 : 1,5 (Benada *et al.*, 2001). Pšenice jarní odčerpá na 1 t zrna 26 kg N, 5 kg P, 20 kg K, 4 kg Ca a 2 kg Mg (Ryant, 2005).

5 Metodika pokusu

5.1 Odběr vzorků z pozemků

5.1.1 Parametry pro výběr vzorků

Vzorky rostlin a půdy byly odebírány z ploch pro agrochemické zkoušení půd (AZZP), a to v letech 2015 - 2017. Na zájmových odběrových plochách byla zasetá v roce odběru vždy pšenice ozimá, řepka ozimá nebo kukuřice. Zájmovými oblastmi pro odběr vzorků byly:

- a) karbonátové orné půdy, jejichž pH je vyšší než 7 a obsah P je nejvýše 50 mg/kg, tj. horní hranice nízkého obsahu P v M3. Výběr byl proveden tak, aby byly zastoupeny půdy od nejnižších obsahů po horní hranici (tj. 50 mg/kg);
- b) běžné půdy, od nejnižších obsahů P po horní hranici obsahu dobrého (tj. 115 mg/kg).

Odběrové pozemky byly zvoleny na základě dat poskytnutých ústředním kontrolním a zkušebním ústavem zemědělským v Brně (ÚKZÚZ). Na vytipované ploše byl odebírána půdní vzorek (0-30 cm) a současně pěstované plodiny - pšenice ozimá, řepka ozimá a kukuřice v níže uvedených vegetačních fázích. Půdní vzorky byly odebírány vždy pouze v první odebírané vegetační fázi.

5.1.2 Seznam lokalit, kde byly odebírány vzorky

Lokality byly zvoleny na základě obsáhnutí maximálního počtu různých půdních typů i klimatických regionů s ohledem na dopravní obslužnost z hlediska dodržení stanovených fenologických fází. V tabulce 5. jsou půdy jsou rozděleny podle základních charakteristik stanovišť pomocí kódu bonitovaných půdně ekologických jednotek (BPEJ). Některé vzorky byly odebrány z pozemků se stejnou BPEJ. Z důvodu větší přehlednosti tabulky zde tyto kódy nejsou zařazeny.

Tabulka 5: BPEJ půd

č.	BPEJ	č.	BPEJ	č.	BPEJ
1	0.01.00	25	2.08.10	49	3.10.10
2	0.01.10	26	2.10.00	50	3.11.00
3	0.05.01	27	2.13.00	51	3.13.00
4	0.06.10	28	2.16.02	52	3.14.00
5	0.08.00	29	2.17.00	53	3.19.01
6	0.22.10	30	2.19.01	54	3.19.11
7	1.00.00	31	2.21.10	55	3.19.14
8	1.01.00	32	2.22.10	56	3.20.01
9	1.01.10	33	2.23.13	57	3.20.02
10	1.04.01	34	2.25.00	58	3.20.11
11	1.05.01	35	2.31.11	59	3.21.10
12	1.05.11	36	2.63.00	60	3.22.12
13	1.06.00	37	3.01.00	61	3.30.11
14	1.06.02	38	3.02.00	62	3.42.00
15	1.07.00	39	3.02.10	63	3.45.01
16	1.10.00	40	3.03.00	64	3.52.01
17	1.20.01	41	3.05.01	65	3.60.00
18	1.22.12	42	3.05.11	66	3.61.00
19	1.22.13	43	3.06.00	67	4.19.14
20	1.28.04	44	3.06.02	68	4.20.11
21	1.37.16	45	3.07.00	69	5.08.10
22	1.56.00	46	3.07.10	70	5.10.00
23	1.61.00	47	3.08.40	71	5.58.00
24	2.05.01	48	3.10.00	72	8.10.00

5.1.3 Odběr a sušení půdních vzorků

Před uskutečněním odběru osoba garantující vzorkování kontaktovala uživatele pozemku a požádala o souhlas k odběru vzorků.

- Identifikace všech ploch byla provedena pomocí měření geografické polohy souřadnic, odečtených z mapy a zaznamenaných pomocí přístroje GPS.
- Plocha pro odběr půdního vzorku byla totožná s plochou pro odběr rostlin.

- Vzorčky půdy byly odebírány výhradně sondovací tyčí o průřezu 2 cm.
- Po zaměření a označení bodu byl vzorkován okruh přibližně 50 m do hloubky 30 cm. Na této ploše bylo provedeno 40 dílčích vpichů „po lomené čáře“, tak aby pozemek byl rovnoměrně ovzorkován.
- Vzorčky půdy byly usušeny volně na vzduchu a jemně rozrušeny a po homogenizaci, prosetí (<5 mm) a usušení (do 30 °C) rozdělen na dva dílčí vzorky. Jeden dílčí vzorek o hmotnosti 500 g z každého vzorku půdy byl odeslán do ÚKZÚZ V Brně. Druhý dílčí vzorek byl využit k založení nádobových pokusů s pšenicí jarní a k analýzám realizovaným ČZU v Praze.
- Pro další analytická stanovení byly půdní vzorky dále homogenizovány a prosety přes síto s velikostí ok 2 mm.

5.2 Založení nádobového pokusu

5.2.1 První nádobový pokus (2015)

První nádobový pokus byl založen 7.9. 2015 ve sklenících katedry agroenvironmentální chemie a výživy rostlin ČZU, a to v souboru půd odebraných v roce 2015. Jako pokusná plodina byla zvolena jarní pšenice (odrůda Chamsin). Počet pokusných půd (variant) činil 56. Z každé varianty byla provedena nejméně dvě opakování (tři opakování u 22 nádob) . Navážka suché půdy na jednu pokusnou nádobu činila 400 g. Byla zasetá vždy 4 semena pšenice na nádobu do hloubky 3 cm. Zálivkou byl udržován obsah vody v půdě na úrovni $60 \pm 8\%$ vodní kapacity. Po celou dobu pokusu byla udržována teplota v rozmezí 23 ± 3 °C a vzdušná vlhkost 47 ± 12 %. Dne 16.9. bylo provedeno vyjednocení porostu na finální počet dvou rostlin na nádobu. Od 20.9. bylo v čase od 16:00 do 21:00 hod. využíváno umělého osvětlení. Vždy po dvou týdnech od založení pokusu byla prováděna randomizace nádob. Přihnojení bylo provedeno dne 30.9. v dávce 0,04 g N na nádobu a 0,04 g K na nádobu, ve stejných dávkách bylo přihnojeno 2.11. (BBCH 30-31). Dusík byl dodán v roztoku NH_4NO_3 a draslík v roztoku KCl. Sklizeň proběhla 24.11., kdy byla pro pozdější analýzy odebrána nadzemní hmota pšenice. Fenologické fáze pšenice jarní byly následující:

Přehled nejdůležitějších fází pokusu

Datum setí: 7.9. 2015

Počátek vzcházení: 11.9. 2015

Plné vzcházení: 13.9. 2015

Počátek odnožování: u většiny rostlin neproběhlo

Počátek sloupkování: 22.10. 2015

Datum sklizně: 24.11.2015

5.2.2 Druhý nádobový pokus (2017)

Druhý nádobový pokus byl založen 4.5.2017 ve sklenících katedry agroenvironmentální chemie a výživy rostlin ČZU, a to v souboru půd odebraných v roce 2016. Jako pokusná plodina byla zvolena jarní pšenice (odrůda Granny). Počet pokusných půd (variant) činil 54. Z každé varianty byla provedena tři opakování. Navážka suché půdy na jednu pokusnou nádobu činila 500 g. Byla zasetá vždy 4 semena pšenice na nádobu do hloubky 3 cm. Zálivkou byl udržován obsah vody v půdě na úrovni $60 \pm 8\%$ vodní kapacity. Po celou dobu pokusu byla udržována teplota v rozmezí 23 ± 3 °C a vzdušná vlhkost 47 ± 12 %. Dne 19.5. bylo provedeno vyjednocení porostu na počet dvou rostlin na nádobu. Randomizace nádob byla provedena 4.5., 24.5. a 12.6. Dne 12.6. byl porost ošetřen proti padlí 0,1% roztokem přípravku Aperol v jednorázové dávce 400 ml na celý pokus. Přihnojení bylo provedeno dne 24.5. v dávce 0,1 g N a 0,1 g K kg⁻¹ půdy. Ve stejných dávkách bylo přihnojeno dne 12.6. (BBCH 30-31). Dusík byl dodán v roztoku NH₄NO₃ a draslík v roztoku KCl. Porost byl sklizen 27.6. Při sklizni byla stanovena čerstvá hmotnost biomasy, výška rostliny a délka klasu a odebrány vzorky půdy půdní sondovací tyčí o průměru 1 cm. Dále byla stanovena hmotnost kořenového systému.

Přehled nejdůležitějších fází pokusu

Datum setí: 4.5.2017

Počátek vzházení: 8.5.2017

Plné vzházení: 10.5.2017

Počátek odnožování: u většiny rostlin neproběhlo

Počátek sloupkování: 9.6.

Počátek metání: 20.6.

Datum sklizně: 27.6.

5.3 Analytická stanovení

Část půdních vzorků odebraných z vybraných lokalit (vstupní vzorky) byla doručena na pracoviště ÚKZÚZ v Brně, kde byly extrahovány metodou Mehlich 3 (Mehlich, 1984) na obsah P, K, Ca, Mg a S a vybraných mikroprvků. V laboratořích ČZU byly provedeny doplňující analýzy zaměřené na stanovení fosforu v půdách po sklizni pokusů a faktorů úzce souvisejících s příjmem P. Všechny prováděné analýzy jsou popsány níže.

5.3.1 Přehled provedených analýz

Extrakce půd Mehlich 3

Pro analýzy půd byl použit extrakční roztok dle Mehlich 3 (Mehlich, 1984) složený z kyseliny octové (0,2 mol/l), fluoridu amonného (0,015 mol/l); kyseliny dusičné (0,013 mol/l), dusičnanu amonného (0,25 mol/l) a kyseliny ethylendiamintetraoctové (0,001 mol/l). Poměr substrátu a extrakčního roztoku činil 1:10 (10g zeminy, 100 ml roztoku). Následovalo třepání suspenze po dobu 5 minut. Získaný roztok byl zfiltrován, a ve vzniklých extraktech byl analyzován obsah P, Fe, Al a Ca prostřednictvím optického emisního spektrometru s indukčně vázaným plazmatem - ICP-OES (Varian Vista Pro, Austrálie).

Stanovení obsahu fosforu ionto-výměnnými membránami

Iontovýměnné membrány (AEM) jsou již běžně používány pro stanovení obsahu výměnného fosforu v půdě. Proužky AEM membrán (AEM-PES membrane, FumaTech GmbH, Bietigheim-Bissingen, Německo) byly nejprve regenerovány 3 dny v roztoku 0,5 mol/l kyseliny chlorovodíkové a pak 3 dny v roztoku 0,5 mol/l hydrogenuhličitanu sodného. Oba roztoky byly během regenerace 6x měněny. Při regeneraci s NaHCO_3 došlo k navázání skupiny HCO_3^- na kladně nabitě membrány. Principem funkce membrán je výměna iontů HCO_3^- za anionty vyskytující se v roztoku. Proto lze předpokládat, že při třepání membrán v roztoku s půdními vzorky dojde i k výměně fosforečnanové skupiny převedené do roztoku za HCO_3^- .

Postup extrakce AEM membránami byl následující: ke vzorku byly přidány 2 membrány (1 x 5 cm). Poté bylo přilito 30 ml demineralizované vody. Po 16 hod. třepání na horizontální třepače při 150 otáčkách za minutu byly membrány vyjmuty a opláchnuty cca 5 ml demineralizované vody. Opláchnuté membrány byly zality 30 ml 0,5 mol/l HCl a následně opět 16 hodin třepány. Poté byly membrány vyjmuty a zbylé extrakty analyzovány pomocí ICP-OES k získání obsahu výměnné fosforu - P_{AEM} .

Extrakce demineralizovanou vodou

Extrakt byly zhotoveny dle upravené metodiky Luscombe et al. (1979). K 10 g vzorku bylo doplněno 100 ml demineralizované vody. Vzorky byly třepány 2 hodiny a následně filtrovány. Vzniklé extrakty byly analyzovány.

Stanovení hodnoty pH v 0,01 mol/l CaCl₂

Pro stanovení hodnoty pH bylo naváženo 5 g usušeného substrátu, který reagoval po dobu 2 hodin (1hod. třepání, 1 hod. ustálení) s 50 ml 0,01 M CaCl₂ (upraveno dle Minsany et al., 2011) ve 100 ml plastových lahvičkách. Po ustálení proběhlo měření výměnného pH přístrojem HANNA Instruments, (HI 991 300) přímo v roztoku.

5.3.2 Analýzy rostlin

Rostliny byly v době sklizně změřeny, poté byla sklizena nadzemní hmota (0,5 cm nad povrchem půdy), která byla zvážena a usušena (do 40 °C). Na základě podílu suché a čerstvé hmoty bylo vypočteno procento sušiny. Pro další analýzy bylo naváženo 0,25 g (\pm 0,005 g) jemně namleté nadzemní hmoty. Ta byla rozložena pomocí mikrovlnného rozkladu působením koncentrované kyseliny dusičné a peroxidu vodíku (7 + 2 ml). Získaný vzorek byl poté převeden na objem 25 ml pomocí demineralizované vody a analyzován ICP-OES pro stanovení obsahu makroelementů s výjimkou N.

5.3.3 Statistická vyhodnocení

K hodnocení výsledků byly použity zejména korelační a regresní analýzy. K tomu byly využity programy Excel (Excel, 2010) a STATISTICA (StatSoft, 2016).

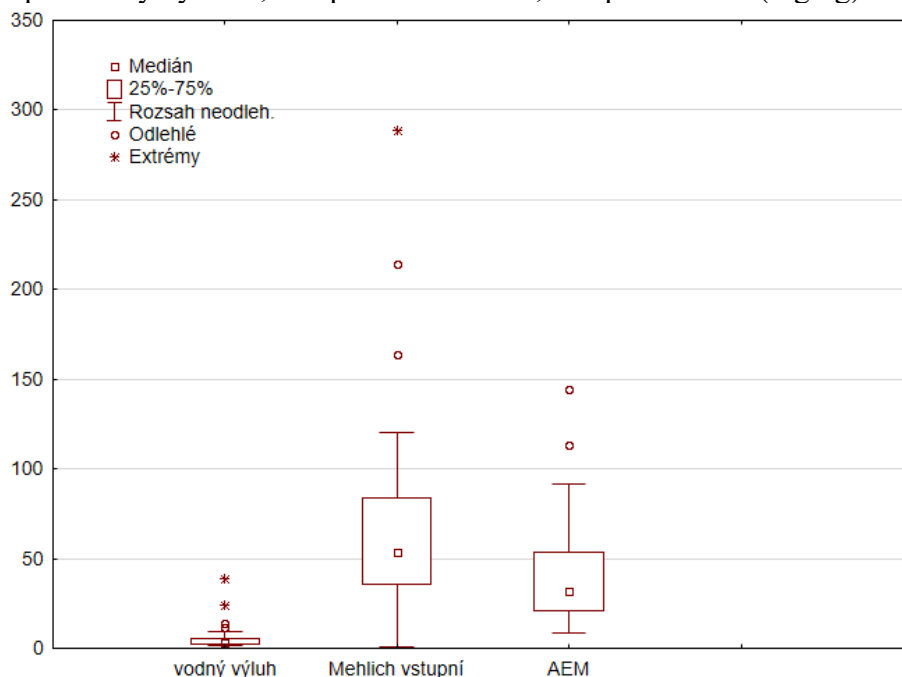
6 Výsledky

6.1 Popisná statistika

V následujících krabicových grafech jsou hodnoceny základní popisné statistiky vybraných ukazatelů za rok 2015 i 2017. V grafech byly hodnoceny údaje ze vstupních analýz na měření obsahu fosforu v převážně karbonátových půdách, vstupní a výstupní hodnoty pH v půdách a v čínidle Mehlich 3 po provedení extrakce, obsahy Ca, Fe, P a Al v roztoku Mehlich 3 po sklizni, obsah a odběr P nadzemní hmotou pšenice jarní, průměrná výška rostlin, hodnoty vstupního a výstupního obsahu P stanoveného čínidlem Mehlich 3 a hodnoty P-indexu. Vzhledem k tomu, že se jednalo o soubory dat s rozdílným počtem pozorování, jsou tyto počty uvedeny níže: P Mehlich 3 vstupní (n = 277), P vodný výluh (n = 277), P AEM (n = 274), vstupní pH (n = 277), pH po sklizni (n = 249), pH v Mehlich 3 (n = 249), Mehlich 3 po sklizni pro Ca, Fe, P a Al (n = 249), P – index (n = 277), průměr výšek rostlin (n = 277), obsah P v nadzemní biomase (n = 248), odběr P rostlinami (n = 248).

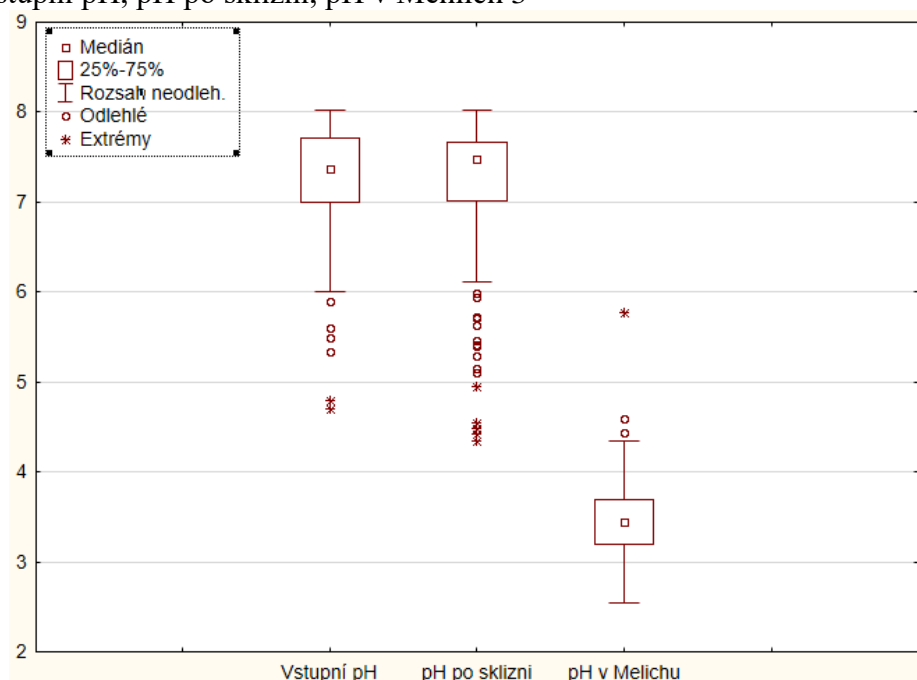
V grafu 1 jsou uvedeny obsahy fosforu v mg/kg v jednotlivých vstupních analýzách. Nejmenší obsah fosforu byl ve vodném výluhu, kde se obsah fosforu pohyboval v rozmezí od 1 do 10 mg/kg, s hodnotou mediánu 5. Naopak nejvyšší obsahy fosforu byly naměřeny ve vstupním Mehlichu 3, kde byly obsahy fosforu nejčastěji kolem mediánu 50 mg/kg. Průměrně 30 mg P/kg bylo v půdách naměřeno analýzou AEM.

Graf 1: Vstupní vodný výluh P, vstupní Mehlich 3 P, vstupní AEM P (mg/kg)



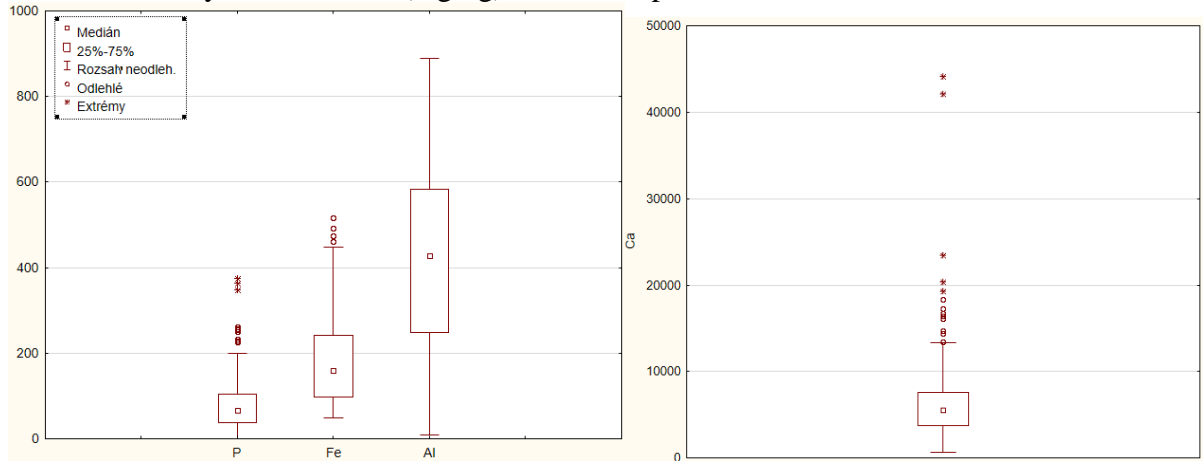
Důležitou roli v pokusech hrálo pH. V následujícím grafu 2 lze pozorovat rozsah vstupního pH, pH po sklizni a pH v činidle Mehlich 3 po provedení extrakce. Vstupní i výstupní pH se pohybovalo v rozmezí od 6 do 8, u těchto dvou pH je vidět celá řada extrémních hodnot, které se pohybovaly hlavně pod pH 5. To je způsobeno tím, že je práce zaměřena na karbonátové půdy, jejichž pH zpravidla přesahuje hodnotu 7. Půdy s nižším pH byly zvoleny jako kontrolní, a proto pouze v menším zastoupení z celkového podílu vzorků. Proto se hodnoty pH nižší než 7 vyskytly v oblasti odlehlých až extrémních pozorování. V kyselém činidle Mehlich 3 bylo pH po provedení extrakce od 2,5 do 4,5. Hodnota v samotném činidle je 2,4, a proto lze usuzovat jeho neutralizaci.

Graf 2: Vstupní pH, pH po sklizni, pH v Mehlich 3



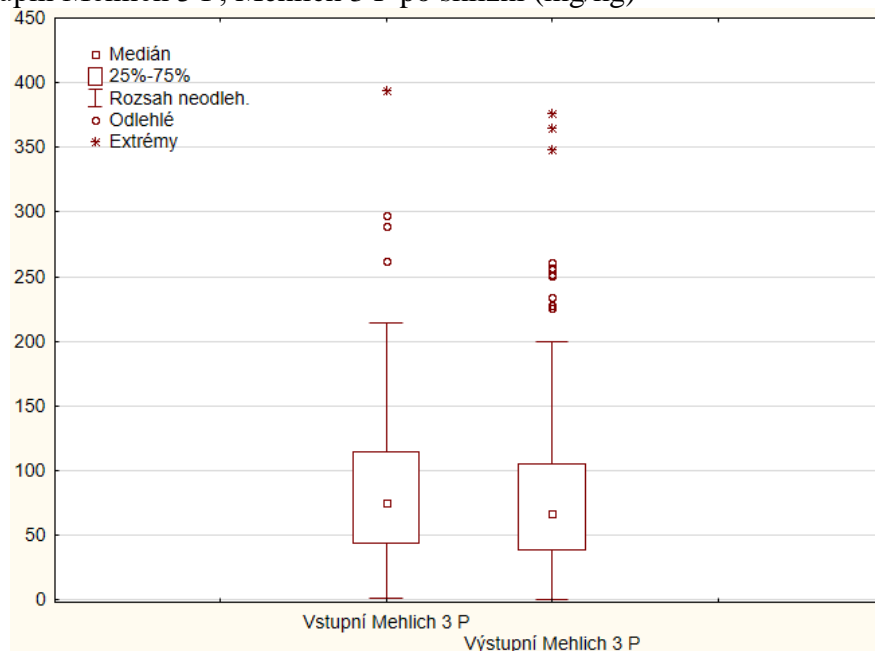
Po sklizni jarní pšenice byly stanoveny metodou Mehlich 3 prvky jako je P, Fe, Al a Ca. Z grafu 3 a popisných charakteristik vyplývá, že největší rozsah měly obsahy Al, a to od 10 do 850 mg/kg. Nejnižší hodnoty byly naměřeny u P od 0,1 do 200 mg/kg s extrémny až okolo 380 mg/kg. Obsah Ca se pohyboval nejčastěji od 600 do 13000 mg/kg.

Graf 3: Hodnoty P, Fe, Al, Ca (mg/kg) Mehlich 3 po sklizni



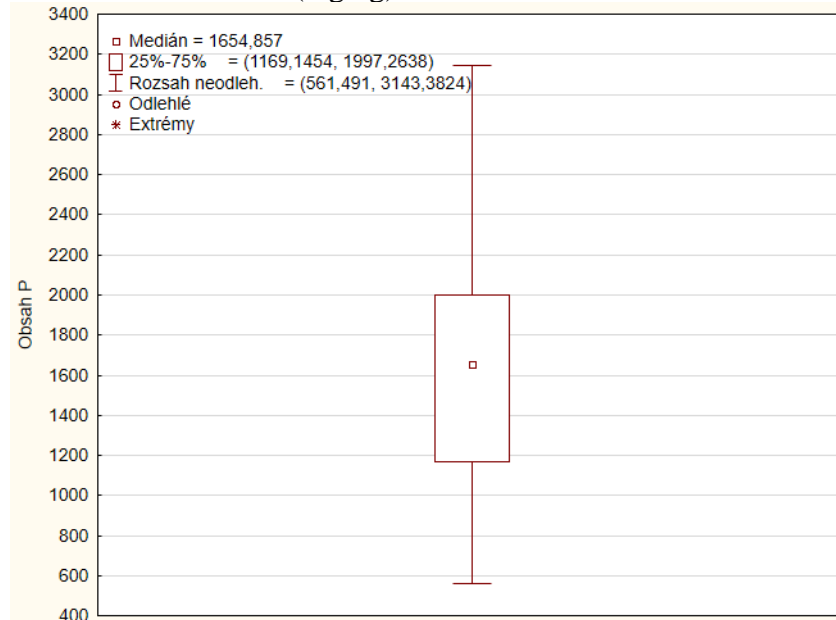
V grafu 4 jsou uvedeny obsahy P v převážně karbonátových půdách stanovené analýzou Mehlich 3. Obsah fosforu u vstupních dat se pohyboval převážně v rozmezí od 1 do 220 mg/kg u výstupních dat se obsah fosforu pohyboval od 0,1 do 200 mg/kg, to znamená, že před založením i po sklizni pokusu bylo dosaženo podobného rozmezí hodnot.

Graf 4: Vstupní Mehlich 3 P, Mehlich 3 P po sklizni (mg/kg)



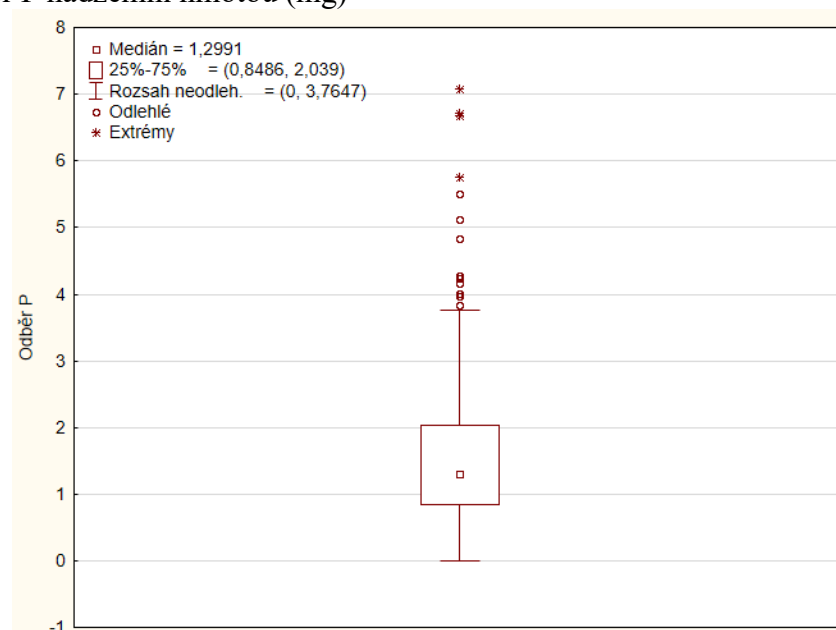
Po sklizni byly určeny obsahy P v nadzemní hmotě jarní pšenice. Z grafu 5 vyplývá, že se obsah P v nadzemní hmotě rostlin pohyboval od 490 do 3180 mg/kg. Průměrná hodnota obsahu fosforu (medián) byla 1655 mg/kg.

Graf 5: Obsah P v nadzemní hmotě (mg/kg)



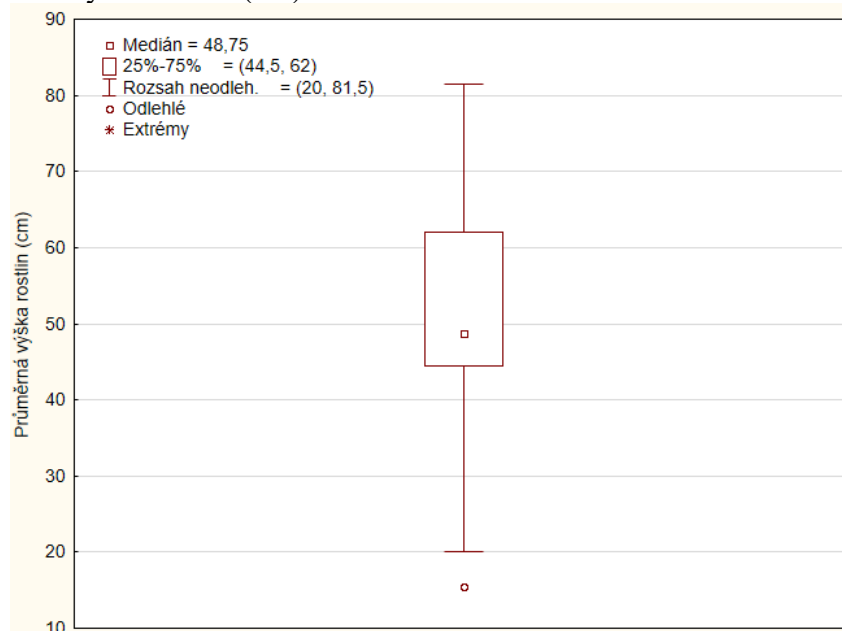
Při známé váze suché hmoty po sklizni a obsahu P v nadzemní hmotě byly dopočítány odběry P rostlinami pšenice jarní v mg. Odběry P se pohybovaly bez odlehých hodnot a extrémů od 0,18 do 3,7 mg. Tyto údaje lze vidět v grafu 6.

Graf 6: Odběr P nadzemní hmotou (mg)



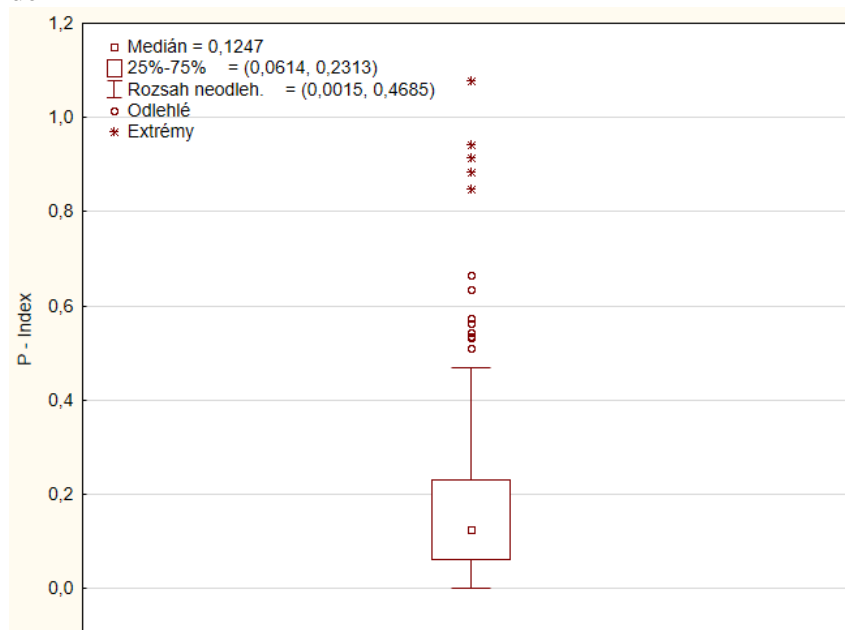
V grafu 7 jsou uvedeny průměrné výšky rostlin pšenice jarní v nádobách v době sklizně. Průměrná výška rostlin bez extrémní a odlehlé hodnoty byla od 20 do 82 cm.

Graf 7: Průměrná výška rostlin (cm)



Potenciální riziko kontaminace vod fosforem ukazuje tzv. index fosforu (P – index). Při výpočtu indexu se vychází z obsahů krystalických či amorfních forem P vázaných s Fe a Al. Potenciální riziko vyplavování P do hlubších vrstev půd nastává zejména v situaci, kdy P-index překročí 1. Hodnoty P – indexu jsou vyjádřeny v grafu 8. Střední hodnota indexu je 0,13. Z toho vyplývá, že potenciální riziko vyplavení P do hlubších vrstev půdy je minimální.

Graf 8: P - index



6.2 Tabulky korelací

V následujících tabulkách jsou hodnoceny korelace mezi jednotlivými vstupními analýzami pro měření obsahu P v převážně karbonátových půdách, mezi vstupními hodnotami Mehlich 3 P a Mehlich 3 P po sklizni, mezi obsahy a odběry P rostlinami s jednotlivými analýzami půdy, korelace vstupních a výstupních hodnot pH, případně pH v Mehlich 3. Zkratka p znamená hladinu významnosti.

Při snížení extrakční účinnosti činidla Mehlich 3 na karbonátových půdách se dá předpokládat, že budou zjištěny slabé korelace mezi obsahem P v půdě a obsahem a odběrem P rostlinami. Z tabulky 6 však vyplývá, že mezi obsahem P v půdě stanoveným činidlem Mehlich 3 a obsahem P v rostlinách jsou významné korelace při hladině významnosti $p \leq 0,001$. Mezi obsahy P a odběry P pšenice jarní v roce 2015 a 2017 byly statisticky průkazné korelace při hladině významnosti $p \leq 0,05$. Vzhledem odlišným hodnotám obsahu a odběru P rostlinami v každém roce byly výsledky rozděleny (tabulka 7. a 8.).

Tabulka 6: Korelační analýza obsahu P v půdě a jeho obsahu a odběru rostlinami – rok 2015, 2017

Proměnná	Mehlich 3 P vstupní	Mehlich 3 P po sklizni	Obsah P rostliny
Mehlich 3 P po sklizni	0,98***		
Obsah P rostliny	0,62***	0,66***	
Odběr P rostliny	0,45***	0,37***	0,16*

* $p \leq 0,05$; ** $p \leq 0,01$; *** $p \leq 0,001$ ***

V tabulce 7 jsou uvedeny korelace mezi obsahy fosforu v půdě před založením a po sklizni pokusu a jejich srovnání s obsahy a odběry P rostlinami. Všechny vztahy byly silně průkazné při hladině významnosti $p \leq 0,001$. Nejtěsnější korelace přitom byly zaznamenány mezi obsahy P v půdě před založením a po sklizni pokusu ($r^2=0,97$). Podstatné jsou těsné korelace obsahu P v půdě s obsahy a odběry P rostlinami, které ukazují na fakt, že činidlem Mehlich 3 je na převážně karbonátových půdách opravdu stanoven rostlinám přístupný fosfor.

Tabulka 7: Korelační analýza obsahu P v půdě a jeho obsahu a odběru rostlinami – rok 2015

Proměnná	Mehlich 3 P vstupní	Mehlich 3 P po sklizni	Obsah P rostliny
Mehlich 3 po sklizni	0,97***		
Obsah P rostliny	0,63***	0,66***	
Odběr P rostliny	0,88***	0,89***	0,79***

* $p \leq 0,05$; ** $p \leq 0,01$; *** $p \leq 0,001$ ***

Výsledky z pokusu 2017 potvrzují předchozí tabulku 7. V následné tabulce 8 se potvrzují statisticky průkazné korelace mezi všemi sledovanými ukazateli při hladině významnosti $p \leq 0,001$ a také je nejvyšší korelace mezi Mehlich 3 P vstupním a Mehlich 3 P v půdě po sklizni.

Tabulka 8: Korelační analýza obsahu P v půdě a jeho obsahu a odběru rostlinami – rok 2017

Proměnná	Mehlich 3 P vstupní	Mehlich 3 P po sklizni	Obsah P rostliny
Mehlich 3 P po sklizni	0,99***		
Obsah P rostliny	0,59***	0,55***	
Odběr P rostliny	0,61***	0,58***	0,77***

* $p \leq 0,05$; ** $p \leq 0,01$; *** $p \leq 0,001$ ***

Tabulka 9 ukazuje korelace dalších analytických metod provedených před založením pokusu s obsahy a odběry P rostlinami. Z tabulky jsou zřejmé statisticky průkazné korelace při $p \leq 0,001$ mezi vstupním Mehlich 3 a ostatními hodnotami. Nejvíce statisticky průkazně korelují vstupní hodnoty Mehlich 3 a vodného výluhu. Podobně jako u vstupních dat Mehlich 3, byly statisticky průkazné korelace u vodného výluhu se všemi srovnávanými proměnnými. U metody AEM pro fosfor nebyla statisticky prokázána korelace pouze s obsahem P v nadzemní hmotě rostlin. Obsahy P v rostlině průkazně korelovaly při $p \leq 0,001$ se vstupním Mehlich 3 i vodným výluhem, při $p \leq 0,05$ s odběrem P rostlinami a statisticky neprůkazně korelovaly obsahy se vstupní AEM. Vztah mezi fosforem stanoveným AEM membránami a obsahem P v rostlinách byl statisticky neprůkazný.

Tabulka 9: Korelační analýza různých analytických metod extrakcí půd a obsah a odběr P rostlinami – rok 2015, 2017

Proměnná	Obsah P rostliny	Odběr P rostliny	Vstupní Mehlich 3 P	Vstupní AEM P
Odběr P rostliny	0,16*			
Vstupní Mehlich 3	0,64***	0,50***		
Vstupní AEM	0,06	0,54***	0,43***	
Vstupní vodný výluh	0,59***	0,59***	0,80***	0,26***

* $p \leq 0,05$; ** $p \leq 0,01$; *** $p \leq 0,001$ ***

V tabulce 10 jsou porovnávány hodnoty jako je vstupní pH, pH po sklizni a pH v Mehlich 3 se vstupním a Mehlich 3 P po sklizni, obsahem a odběrem P rostlinami pšenice, i jednotlivých pH mezi sebou. Vstupní Mehlich 3 i Mehlich 3 po sklizni pro fosfor koreluje se všemi typy pH na hladině významnosti $p \leq 0,001$. Vstupní pH koreluje na hladině významnosti $p \leq 0,001$ statisticky průkazně se všemi hodnotami kromě odběru P rostlinami. Hodnota pH po sklizni nekoreluje pouze s odběrem P. Hodnota pH v Mehlich 3 koreluje se všemi hodnotami v tabulce, avšak korelace s odběrem P rostlinami je na menší hladině významnosti $p \leq 0,05$. Stejně tak je tomu u obsahu P v rostlině, kde hodnoty statisticky průkazně korelují se všemi vybranými ukazateli na hladině významnosti $p \leq 0,001$,

Tabulka 10: Korelační analýza hodnot pH, obsah P v půdě, obsahy a odběry P rostlinami – rok 2015, 2017

Proměnná	pH po sklizni	Vstupní pH	pH v Mehlich 3
Vstupní pH	0,92***		
pH v Mehlich 3	0,72***	0,78***	
Mehlich 3 po sklizni	-0,29***	-0,35***	-0,40***
Obsah P po skl.	0,38***	-0,53***	-0,46***
Vstupní Mehlich 3	-0,27***	-0,31***	-0,37***
Odběr P po skl.	-0,13	-0,53***	-0,03*

* $p \leq 0,05$; ** $p \leq 0,01$; *** $p \leq 0,001$ ***

6.3 Tabulky a grafy regresí

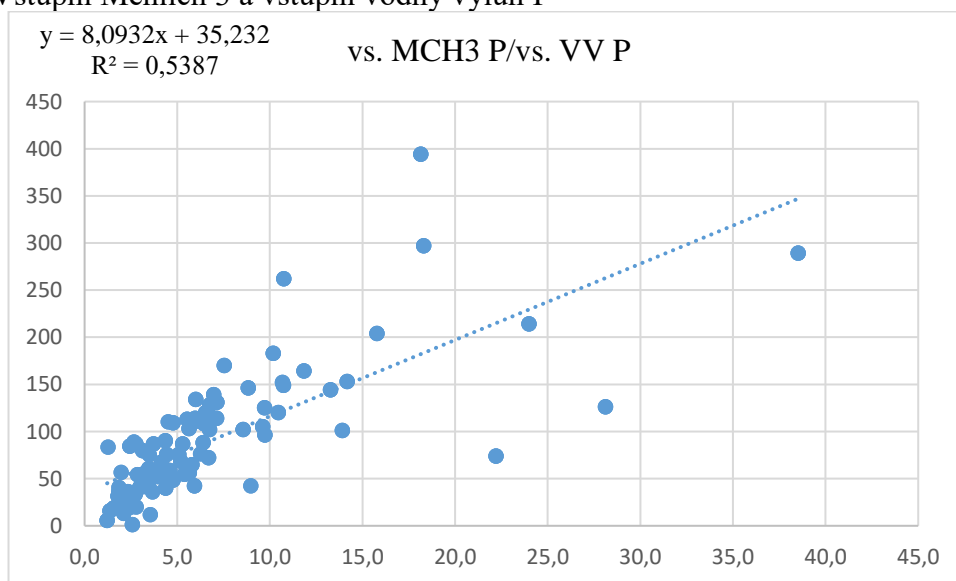
V následujících tabulkách a grafech jsou hodnoceny regresní analýzou (R^2) vztahy mezi různými sledovanými hodnotami. Průkazná hladina regrese byla nastavena na $R^2 > 0,4$. Vztahy mezi hodnotami by měly být potvrzené jak regresní tak i korelační analýzou (r^2). Zkratka p znamená hladinu významnosti.

V tabulce 11 jsou vztahy mezi hodnotami obsahu fosforu stanovenými metodou Mehlich 3 a vodným výluhem ve vstupních odběrech průkazné. To potvrdila korelační ($r^2 = 0,80$) i regresní ($R^2 = 0,54$) analýza. Hodnoty Pro Mehlich 3 lze tak dopočítat podle rovnice $y = 8,09x + 35,2$ dosazením výsledku vodného výluhu za x s 54% spolehlivostí. Pro větší přehlednost jsou tyto výsledky zobrazeny i v grafu 9. Vztahy mezi metodou Mehlich 3 a AEM jsou podle korelační metody statisticky průkazné, avšak průkaznost nepotvrdila regresní analýza ($R^2 = 0,18$), stejně jako mezi vstupními rozbory půdy vodným výluhem a AEM ($R^2 = 0,09$), kde prokazovala regresní analýza nejmenší hodnotu.

Tabulka 11: Regrese vstupního Mehlich 3 P se vstupním vodným výluhem P a vstupní AEM P

Proměnná	funkce	A	B	R^2
Vs. MCH3 P/vs. VV P	$y = ax + b$	8,09	35,2	0,54
Vs. MCH3 P/vs. AEM P	$y = ax + b$	1,27	48,0	0,18
Vs. VV P/vs. AEM P	$y = ax + b$	0,08	4,04	0,09

Graf 9: Vstupní Mehlich 3 a vstupní vodný výluh P



V tabulce 12 byl nejtěsnější regresní vztah zaznamenán mezi Mehlich 3 P a Mehlich 3 Fe, obojí po sklizni. Avšak pravděpodobnost dopočítání správné hodnoty Mehlich 3 pro P v převážně karbonátových půdách by byla pouze 32%. Nejnižší regresi v půdách po sklizni lze pozorovat mezi Mehlich 3 P a Mehlich 3 Al ($R^2 = 0,01$). U vstupního Mehlich 3 a Mehlich 3 Al po sklizni je pravděpodobnost po dosazení za x do rovnice $y = -0,00 + 107$ pouze 12%.

Tabulka 12: Mehlich 3 po sklizni pro P a Mehlich 3 po sklizni pro Ca, Fe a Al

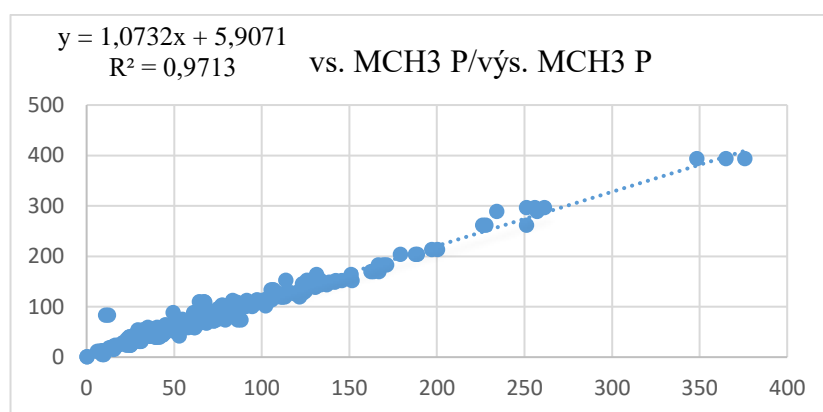
Proměnná	funkce	A	B	R^2
MCH 3 P po skl./MCH 3 Ca po skl.	$y = ax + b$	-0,00	107	0,12
MCH 3 P po skl./MCH 3 Fe po skl.	$y = ax + b$	0,34	17,0	0,32
MCH 3 P po skl./MCH 3 Al po skl.	$y = ax + b$	0,03	68,5	0,01

Z tabulky 13 vyplývá, že u regresní analýzy vstupního obsahu P Mehlich 3 převážně v karbonátových půdách s Mehlich 3 P, Ca, Fe, Al v půdě po sklizni, lze podle předpokladů spočítat největší spolehlivost ve vztahu pro P (viz i graf 10). Druhou největší spolehlivostí lze dopočítat u vodného výluhu podle rovnice $y = 0,07x + 1,24$ dosazením výsledku Mehlich 3 P za x s 52% spolehlivostí. Mezi vstupním AEM a obsahem Mehlich 3 P po sklizni je spolehlivost dopočtu pouze 17%. S 37% spolehlivostí dopočtu hodnoty obsahu P v půdě vodným výluhem je dosazením za x Mehlich 3 Fe po sklizni v půdě. Mezi hodnotami vstupního Mehlich 3 a Mehlich 3 Fe po sklizni je spolehlivost dopočtu vstupního Mehlich 3 29%. U vstupního obsahu AEM pro P a Mehlich 3 Fe po sklizni je $R^2 = 0,05$ a u vstupního Mehlich 3 a obsahu Ca Mehlich 3 po sklizni je $R^2 = 0,11$. Nejnižší spolehlivost dopočtu u vstupního obsahu P nezávisle na extrakční metodě, je při dosazení x v jakékoliv rovnici s obsahem Al po sklizni.

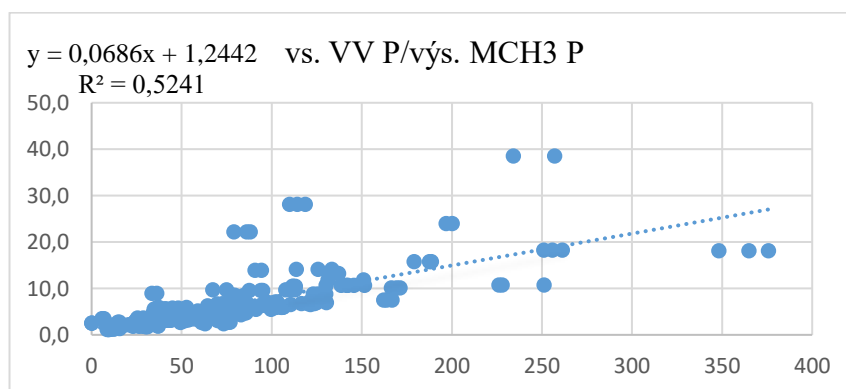
Tabulka 13: Regrese vstupních obsahů P a Mehlich 3 po sklizni pro P, Ca, Fe, Al

Proměnná	funkce	A	B	R ²
Vs MCH 3 P/MCH 3 P po skl.	$y = ax + b$	1,07	5,91	0,97
Vs. VV 3 P/MCH 3 P po skl.	$y = ax + b$	0,07	1,24	0,52
Vs. AEM P/MCH 3 P po skl.	$y = ax + b$	0,14	21,1	0,17
Vs. MCH 3 P/MCH 3 Ca po skl.	$y = ax + b$	-0,01	121	0,11
Vs. VV 3 P/MCH 3 Ca po skl.	$y = ax + b$	-0,00	8,41	0,05
Vs. AEM P/MCH 3 Ca po skl.	$y = ax + b$	-0,00	33,2	0,00
Vs. MCH 3 P/MCH 3 Fe po skl.	$y = ax + b$	0,35	26,2	0,29
Vs. VV 3 P/MCH 3 Fe po skl.	$y = ax + b$	0,03	0,37	0,37
Vs. AEM P/MCH 3 Fe po skl.	$y = ax + b$	0,04	24,3	0,05
Vs. MCH 3 P/MCH 3 Al po skl.	$y = ax + b$	0,02	83,3	0,00
Vs. VV 3 P/MCH 3 Al po skl.	$y = ax + b$	0,00	6,03	0,00
Vs. AEM P/MCH 3 Al po skl.	$y = ax + b$	0,00	30,7	0,00

Graf 10: Vstupní Mehlich 3 P/výstupní Mehlich 3 P



Graf 11: Vstupní vodný výluh/výstupní Mehlich 3 P

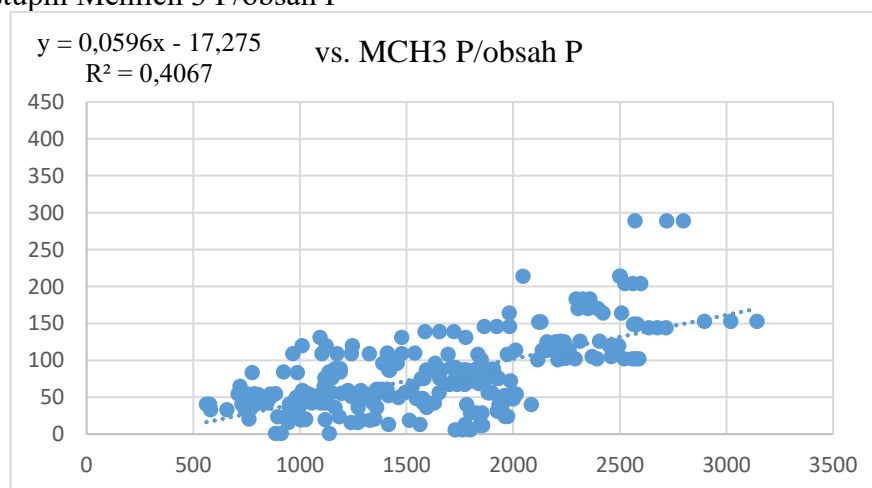


Z tabulky 14 je zřejmé, že nejtěsnější lineární regresní vztah byl zaznamenán u vstupní hodnoty Mehlich 3 P s **obsahem P v rostlině** po sklizni ($R^2 = 0,41$ viz. graf 12, poté mezi vstupním vodným výluhem P a obsahem P v rostlině po sklizni ($R^2 = 0,35$) Nulová regrese byla zjištěna mezi hodnotami vstupní AEM a obsahem P v rostlinách po sklizni. V případě srovnání hodnot **odběrů P rostlinami** s obsahy P v půdě byly nejtěsnější regresní vztahy zjištěny pro vodný vyluh, dále pak pro AEM a až poté pro Mehlich 3. . Druhá nejnižší hodnota regrese byla zaznamenána mezi obsahem a odběrem P v nadzemní hmotě ($R^2 = 0,03$). regresní analýza většinou potvrdila výsledky korelační analýzy.

Tabulka 14: Regrese vstupního Mehlich 3 P, vstupního vodného výluhu P, vstupní AEM P a obsahů, odběrů P nadzemní hmotou

Proměnná	funkce	A	B	R^2
Vs. MCH 3 P/obsah P	$y = ax + b$	0,06	-17,3	0,41
Vs. VV P/obsah P	$y = ax + b$	0,01	-3,86	0,35
Vs. AEM P/obsah P	$y = ax + b$	0,00	29,5	0,00
Vs. MCH 3 P/odběr P	$y = ax + b$	0,01	0,72	0,25
Vs. VV P/odběr P	$y = ax + b$	0,11	0,92	0,32
Vs. AEM P/odběr P	$y = ax + b$	0,03	0,70	0,29
Obsah P/odběr P	$y = ax + b$	0,00	1,07	0,03

Graf 12: Vstupní Mehlich 3 P/obsah P



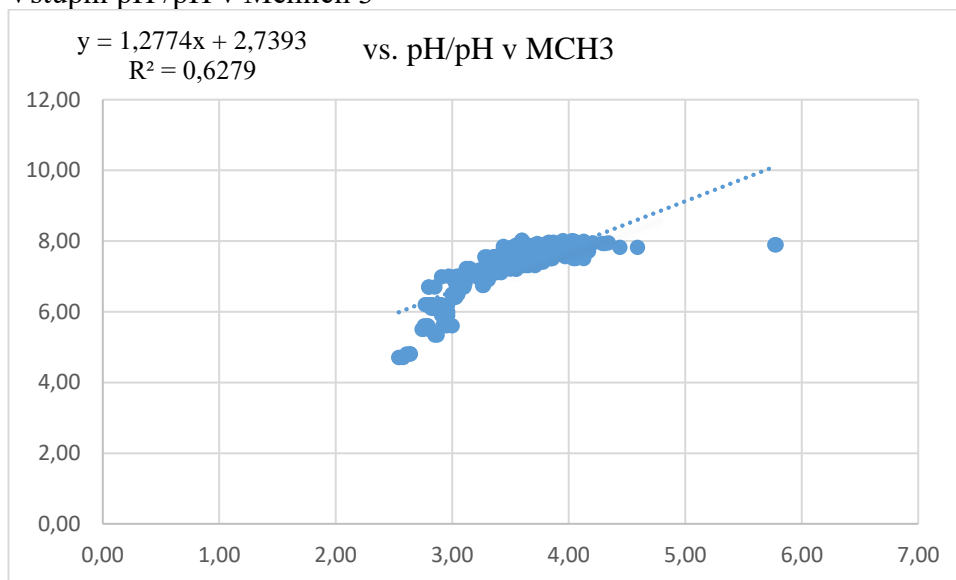
U korelační analýzy byly statisticky průkazné korelace mezi vstupním pH, pH po sklizni a pH v Mehlichu 3 na hladině významnosti $p \leq 0,001$. Korelační analýzu potvrdila regresní analýza pouze ve dvou případech (tabulka 15). Hodnoty pro vstupní pH lze dopočítat podle rovnice $y = 0,95x + 0,30$ dosazením výsledku pH po sklizni za x s 86%

spolehlivostí (znázorněné v grafu 13). Vstupní pH lze také dopočítat s 63% spolehlivostí dosazením výsledku pH v Mehlich 3 za x (viz graf 13). Regresní analýza nepotvrdila korelační analýzu mezi vstupními obsahy P v Mehlich 3 a vstupního pH ($r^2 = -0,31$, $R^2 = 0,08$ %), stejně jako mezi pH po sklizni a pH v Mehlich 3 ($r^2 = 0,72$, $R^2 = 0,14$), mezi vstupním P Mehlich 3 a pH po sklizni ($r^2 = -0,27$, $R^2 = 0,06$) a mezi vstupním P Mehlich 3 a pH v Mehlich 3 ($r^2 = -0,37$, $R^2 = 0,13$).

Tabulka 15: Regrese vstupního Mehlich 3 P, vstupního pH, výstupního pH a pH v Mehlich 3 po sklizni

Proměnná	funkce	A	B	R ²
Vs. MCH 3 P/vs. pH	$y = ax + b$	-0,00	7,46	0,08
Vs. pH/ pH po skl.	$y = ax + b$	0,95	0,30	0,86
Vs. MCH 3 P/pH po skl.	$y = ax + b$	- 23,9	264	0,06
Vs. MCH 3 P/pH v MCH 3	$y = ax + b$	- 53,2	274	0,13
Vs. pH/pH v MCH 3	$y = ax + b$	1,28	2,74	0,63
pH po skl./pH v MCH 3	$y = ax + b$	-51,3	256	0,14

Graf 13: Vstupní pH /pH v Mehlich 3



7 Diskuze

V rámci AZZP jsou v současné době vypracována kritéria pro hodnocení obsahu nejen fosforu, draslíku a hořčíku, ale i pro celou řadu dalších prvků (Cu, Fe, Mn aj.) stanovených extrakční metodou Mehlich 3. Možnost použití této extrakční metody je pro široké spektrum půd. Výjimku tvoří karbonátové půdy, kde je nutné aplikovat určité korekce a to zejména na stanovení reálného obsahu přístupného fosforu. Při analytické metodě Mehlich 3 je používáno extrakční činidlo o pH 2,5 s téměř nulovou pufrací schopností proti změně pH a tím je omezena extrakční efektivita při vyluhování (Zbiral, 2016).

Možnost změny extrakční účinnosti činidla Mehlich 3 v karbonátových půdách potvrzuje Čermák *et al.* (2017), který uvádí, že zvýšená pozornost musí být věnována při stanovení fosforu, kde zejména na karbonátových půdách je nutné upravit kritéria hodnocení a analytický postup. Tato nutnost souvisí se změnou pH činidla v průběhu extrakce, které vede ke snížení extrakční schopnosti. Jeho hodnoty extrahované v půdách neodpovídají koncentracím P reálně využitelným pro rostliny. Proto musí být provedena optimalizace a úprava korekce na změnu pH extrakčního činidla vlivem karbonátů v půdách

Výhody univerzálnosti Mehlich 3, ale i možné nevýhody uvádí Kulhánek *et al.* (2017).

Mezi nevýhody této metody řadí např. extrakci nepřístupného podílu živin a horší extrakční účinnost na půdách s vysokou hodnotou pH (neutralizace činidla). Proto byl proveden pokus především s půdami s hodnotou pH vyšší než 7. Půdy byly extrahovány metodou Mehlich 3, vodným výluhem a AEM membránami pro stanovení obsahu přístupného fosforu. V rostlinách byl pomocí suchého rozkladu stanoven celkový obsah P. Dále byla měřena míra neutralizace činidla Mehlich 3 v závislosti na pH půdy. Ze statistické analýzy vyplynulo, že na půdách s vyšším pH (nad 7,0) poklesly korelace mezi hodnotami dosaženými metodou Mehlich 3 a obsahy P v rostlinách. Byla potvrzena i neutralizace činidla Mehlich 3 se zvyšujícím se pH půdy. Zde na silně alkalických půdách došlo ke zvýšení hodnoty z původních 2,6 na více než 4,0. Proto je u půd s vyšším pH důležité hledat alternativy k hodnocení obsahu P v půdě, např. vyšší okyselení činidla Mehlich 3 nebo použití doplňujících extrakčních metod (vodný výluh, Olsen) (Kulhánek *et al.*, 2017).

Ve dvouletých pokusech Sedlář *et al.* (2018) vychází, že Mehlich 3 půdy nekoreloval s obsahem P v nadzemní biomase pšenice jarní na rozdíl od vztahu mezi Mehlich 3 a nutričním indexem (PID).

Podle Zehetner *et al.* (in press) koreluje Mehlich 3 půdy pro P s příjmem P rostlinami více při pH větší 6,6 než například při pH pod 5,6. U vodného výluhu půdy na obsah P je nejvyšší korelace při pH od 5,6 do 6,6. U metody AEM je nejprůkaznější korelace při pH pod 5,6. Dále uvádí, že regrese mezi vstupním Mehlich 3 a odběrem P rostlinami byla neprůkazná ($R^2 = 0,19$).

Po vyhodnocení nádobových pokusů v této diplomové práci vychází, že korelace byly mezi Mehlich 3 a obsahem a odběrem fosforu nadzemní biomasou statisticky průkazné na hladině významnosti $p \leq 0,001$. Regresní analýza však průkaznost korelační analýzy nepotvrdila. Například mezi vstupním Mehlich 3 a odběrem P rostlinami se $R^2 = 0,25$. Vysoká korelace mezi zmíněnými hodnotami vyvrací pravděpodobnost omezení extrakční efektivity při vyluhování v nádobových pokusech s pšenicí jarní.

Dále z dvouletých pokusů vychází, že vodný výluh koreloval u převážně karbonátových půd na hladině významnosti $p \leq 0,001$ s obsahem i odběrem P rostlinami. Metoda AEM statisticky průkazně korelovala s odběrem P rostlinou při $p \leq 0,001$, ale s obsahem P v rostlině korelace nebyla průkazná.

Do roku 1989 byl obsah přístupného P v půdě vyhodnocován metodou dle Egnera a obsahy přístupných K a Mg dle Schachtschabela. Od roku 1990 byl pro P, K i Mg zaveden společný výluh – Mehlich 2 (Klement *et al.*, 2012). Po modifikaci Mehlich 2 v roce 1999 došlo k nahrazení činidlem Mehlich 3 (Mehlich, 1984). Důvodem je lepší schopnost činidla Mehlich 3 pufovat pH při extrakci tak, aby nedocházelo k jeho zvýšení nad 2,9, kdy již nemá přídavek fluoridu vliv na uvolňování fosforu (Škarpa, 2013).

Jak již bylo výše uvedeno, důležitou roli v pokusech hrálo pH. Práce byla zaměřena především na karbonátové půdy, proto vstupní pH bylo zpravidla větší jak 7. Půdy s nižším pH (pod 5) byly zvoleny jako kontrolní, a proto byly pouze v menším zastoupení (pod 20 %) z celkového podílu vzorků. V kyselém činidle Mehlich 3 bylo pH po provedení extrakce od 2,5 do 4,5. Hodnota v samotném činidle je 2,4, a proto lze potvrdit jeho neutralizaci. Pouze u 27 hodnot z celkových 277 nepřesáhlo hranici pH po extrakci 2,9. Hodnota pH v Mehlich 3 se pohybovala pod 2,9 tam, kde byly zastoupeny nižší hodnoty pH v půdách (<6,5), před založením pokusů. Z toho vyplývá, že Mehlich 3 ve většině výsledků neměl lepší schopnost pufovat pH při extrakci, tím mohlo dojít ke snížení vlivu fluoridu na uvolňování fosforu. Avšak korelace mezi vstupním Mehlich 3 a obsahem a odběrem P rostlinami byly vysoké na hladině významnosti $p \leq 0,001$. Proto lze předpokládat, že vliv neutralizace Mehlich 3 na extrakční účinnost fluoridu byl neprůkazný.

Extraktom Mehlich 3 lze současně stanovit živiny jako je: Ca, Mg, K, P, S, Cu, Zn, Fe, Mn, B a Al. Stanovený hliník lze využít pro výpočet retence fosforu (Rayment *et* Lyons, 2011). V pokusech Kulhánek *et al.* (2009) je uvedeno srovnání obsahu fosforu vázaného na železo a hliník stanoveného dle Schwertmann (1964) s výsledky metody Mehlich 3. Zde byly zaznamenány velmi těsné korelace ($p \leq 0,001$) mezi těmito metodami. Lze tedy předpokládat, že metodou Mehlich 3 je stanoven i signifikantní podíl fosforu vázaného s Fe a Al. Z tohoto tvrzení vychází i Zbíral (2017), který jako rozšířenou možnost určení sorpce P uvádí výpočet tzv. P-indexu vypočítaného kompletně z výsledků metody Mehlich 3 dle rovnice $(P/30,974)/((Al/26,982)+(Fe/55,847))$, kde jsou obsahy P, Fe a Al zadávány v mg/kg. Tento index je možno využít i ke zjištění potenciálního rizika vyplavování P do hlubších vrstev půd. Zvýšená hrozba vyplavování P pak nastává zejména v situaci, kdy P-index překročí 1 (Zbíral, 2017). V rámci této práce byl P – index dopočítán dle uvedené rovnice. Střední hodnota indexu byla 0,13. Z toho vyplývá, že potenciální riziko vyplavení P do hlubších vrstev půdy bylo minimální.

Podle Zbírala (2017) byly pro extrakční činidlo Mehlich 3 zjištěny a ověřeny korelace s dalšími používanými extrakčními činidly. Extrakční činidlo Mehlich 3 otevřelo cestu k dalšímu zvýšení efektivity a k využití simultánních metod analýz pro stanovení jednotlivých prvků.

Tvrzení Zbírala (2017) naše pokusy korelační analýzou potvrdily. Korelace mezi Mehlich 3 a ostatními vstupními činidly na obsah P v půdě, byly statisticky průkazné na hladině významnosti $p \leq 0,001$. Vstupní obsah P Mehlich 3 koreloval na hladině významnosti $p \leq 0,001$ se vstupním vodným výluhem, kde $r^2 = 0,80$ i se vstupním obsahem P iontovýměnnou membránou, kde $r^2 = 0,43$. Regresní analýza potvrdila korelační analýzu pouze ve vztahu mezi vstupním Mehlich 3 a vstupním vodným výluhem, kde $R^2 = 0,54$. Ve vztahu mezi vstupním Mehlich 3 a iontovýměnnou membránou se korelační analýza nepotvrdila, regrese byla neprůkazná a to $R^2 = 0,18$

V pokusech Wuenscher *et al.* (2015) vycházelo, že při srovnání extraktantů pro přístupný P v půdě vycházely nejvyšší hodnoty u metody Mehlich 3, druhé nejvyšší obsahy byly zaznamenány metodou AEM a nejmenší obsahy fosforu vodným výluhem. Dále z pokusů vyšlo, že metoda vodného výluhu a Mehlich 3 spolu statisticky korelovaly na hladině významnosti $p \leq 0,01$. Metoda Mehlich 3 s AEM spolu korelovaly na hladině významnosti $p \leq 0,001$. Mezi vodným výluhem a AEM byla korelace na hladině významnosti $p \leq 0,001$.

Pořadí těchto metod potvrdil i Zehetner *et al.* (in press), kterému také v pokusech vychází nejvyšší hodnoty pro obsah P v půdě mezi těmito 3 metodami u Mehlich 3 dále u AEM a nejmenší naměřené obsahy u vodného výluhu.

Na základě statistického hodnocení provedeného v této diplomové práci je možné výsledky Wuenscher *et al.* (2015) potvrdit. Nejmenší obsah fosforu byl ve vodném výluhu, kde se hodnoty pohybovaly v rozmezí od 1 do 10 mg/kg. Naopak nejvyšší obsahy fosforu byly naměřeny ve vstupním Mehlich 3, kde byly obsahy fosforu nejčastěji kolem mediánu 50 mg/kg. Průměrně 30 mg P/kg bylo v půdách naměřeno analýzou AEM. U vstupních metod byly korelace mezi všemi metodami průkazné na hladině významnosti $p \leq 0,001$.

K rozdílným hladinám průkaznosti u korelační analýzy mezi vodným výluhem a Mehlich 3 mohlo dojít kvůli rozdílům v souboru vzorků i v extrakčních postupech. Zatímco v této diplomové práci byl použit vodný výluh v poměru 1:10 (půda:voda) a doba reakce byla 1 hodina, ve studii Wuenscher *et al.* činil poměr půdy a vody 1:0,3 až 1:1,2 a reakční čas činil 12 hodin.

Holliday (2007) uvádí, že v kyselých podmínkách vytváří fosfor vazby se železem a hliníkem, v zásaditých půdách vytváří vazby s vápníkem. To potvrzuje i Leonardí (1999), který uvádí, že pokud má půda pH vyšší než 7, vzniká především fosforečnan vápenatý ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$), a pokud má pH nižší než 7, pak se ionty železa a hliníku váží na orthofosfátové ionty za vzniku nerozpustných fosfátů. Přestože na vazbu fosforu se železem, hliníkem nebo vápníkem má vliv kyselost půdy, postupem času se i Ca-fosfáty mění na fosfáty vázané na železo a hliník.

Z popisných charakteristik vyplývá, že největší rozsah měly obsahy Al, a to od 10 do 850 mg/kg. Nejnižší hodnoty byly naměřeny u P od 0,1 do 200 mg/kg s extrémy až okolo 380 mg/kg. Obsah Ca se pohyboval nejčastěji od 600 do 13000 mg/kg a u Fe od 40 do 430 mg/kg. Průkaznost regresní analýzy se neprokázala ani v jedné ze vstupních metod obsahu P v půdě s obsahem v půdě po sklizni Mehlich 3 pro Ca, Fe nebo Al. Dá se tak nepřímo vyvodit, že činidlem Mehlich 3 nebyly tyto rostlinám nepřístupné frakce fosforu stanoveny.

8 Závěr

Cílem práce bylo na základě výsledků nádobových pokusů s pšenicí jarní potvrdit nebo vyvrátit teorii o snížené účinnosti metody Mehlich 3 pro stanovení fosforu v karbonátových půdách. Dalším cílem bylo zjištění korelací mezi obsahem P v půdě a obsahem a odběrem P rostlinami pšenice jarní.

Po vyhodnocení nádobových pokusů v této diplomové práci vychází:

- V kyselém činidle Mehlich 3 bylo pH po provedení extrakce od 2,5 do 4,5. Hodnota v samotném činidle je 2,4, a proto lze potvrdit jeho neutralizaci.
- Mehlich 3 tak ve většině případů neměl lepší schopnost pufovat pH při extrakci, tím mohlo dojít ke snížení vlivu fluoridu na uvolňování fosforu.
- Střední hodnota P – indexu byla 0,13, proto nehrozí potenciální riziko vyplavení P do hlubších vrstev půdy.

Z korelační analýzy:

- Korelace mezi vstupním Mehlich 3 a obsahem a odběrem P rostlinami byly vysoké na hladině významnosti $p \leq 0,001$. Proto lze předpokládat, že vliv neutralizace Mehlich 3 na extrakční účinnost rostlinám přístupného P nebyl průkazný.
- U vstupních metod (AEM a vodný výluh) byly korelace mezi těmito metodami pro stanovení přístupného fosforu v půdě a výsledky Mehlich 3 průkazné na hladině významnosti $p \leq 0,001$.

Z regresní analýzy lze vyvodit tyto závěry:

- Regresní analýza průkaznost korelační analýzy mezi Mehlich 3 a obsahem a odběrem fosforu nadzemní biomasou potvrdila jen částečně.

Závěrem lze říci, že nádobové pokusy s pšenicí jarní poskytly pozitivní, avšak pouze orientační výsledky. Proto je nutný terénní výzkum, zaměřený na sledování obsahu P stanoveného metodou Mehlich 3 v karbonátových půdách ve vztahu k obsahu a odběru P u více plodin a v reálných podmínkách.

9 Seznam použité literatury

Ai, P., Sun, S., Zhao, J., Fan, X., Xin, W., Guo, Q., Yu, L., Shen, Q., Wu, P., Miller, Aj., Xu, G. 2009. Two rice phosphate transporters. OsPht1;2 and OsPht1;6. have different functions and kinetic properties in uptake and translocation. *Plant J* 57: p. 798–809.

Baier, J., Baierová, V. 1985) *Abeceda výživy rostlin a hnojení*. Praha. Státní zemědělské nakladatelství. 364 s.

Balík, J., Vaněk, V., Pavlíková, D., Kulhánek, M., Jakl, M. 2002. Fosfor v půdě a jeho koloběh v přírodě. Racionální použití hnojiv. Česká zemědělská univerzita. Praha. s. 26-34. ISBN: 80-213-0957-1.

Benada, J., Flašarová, M., Hubík, K., Kryštof, Z., Krofta, S., Křen, J., Macháň, F., Milotová, J., Míša, P., Onderka, M., Pokorný, E., Štralková, R., Tichý, F., Váňová, M. 2001. Metodika pěstování jarních obilnin. Zemědělský výzkumný ústav Kroměříž. s. 143. ISBN: 80-902545-4-3.

Biedermann, F., Obernberger, I. 2005. [cit. 2015-10-20]. Dostupné z <<http://bioenergy.at/uploads/media/Paper-Biedermann-AshRelated-2005-10-11.pdf>>.

Blume, H. P., Brümmer, G. W., Schwertmann, U., Horn, R., Knabner, I. K., Stahr, K., Auerswald, K., Beyer, L., Hartmann, A., Litz, N., Scheinost, A., Stanjek, H., Welp, G., Wilke, B. M. 2002. Scheffer/Schachtschabel. *Lehrbuch der Bodenkunde*. Stuttgart. Spektrum Akademischer Verlag. p. 607. ISBN 3-8274-1324-9.

Čermák, P., Muhlbachová, G., Lošák, T., Hlušek, J. 2017. Návrh moderního systému agrochemického zkoušení půd. Živiny a rizikové prvky v půdě 15.16.11. 2017. VÚRV Praha.

Černý, J., Balík, J., Kulhánek, M., Vašák, F., Vaněk, V. 2014. Využití kalů z čistíren odpadních vod. Racionální použití hnojiv. Česká zemědělská univerzita. Praha. s. 19-26. ISBN: 978-80-213-2511-1.

Český statistický úřad. Spotřeba průmyslových hnojiv. [online]. [cit. 2017.12.8]. Dostupné z <https://www.czso.cz/csu/czso/zemedelstvi_zem>.

Demeyer, A., Voundi Nkana, J. C., Verloo., May, M. G. 2001. Characteristics of wood ash and influence on soil properties and nutrient uptake an overview. *Bioresource technology* 77(3). p. 287–295. [cit. 2017-03-25]. Dostupné z <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852400000432>>.

Demirbas, M. F., Balat, M., Balat, H. 2009. Potential contribution of biomass to the sustainable energy development. *Energy conversion and management* 50(7). p. 1746-1760. [cit. 2018-03-25]. Dostupné z

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890409000946>>.

Dobermann, A., Fairhurst, T. 2000. Rice: Nutrient disorders & nutrient management. Handbook series. Potash & Phosphate Institute (PPI). Potash & Phosphate Institute of Canada (PPIC) and International Rice Research Institute. p. 191.

Dostál, J., Lošák, T., Javor, T., Hajzlerová, L., Hlušek, J., Linhart, M. 2014. Dosavadní zkušenosti s aplikací digestátu z bioplynových stanic na zemědělskou půdu. Racionální použití hnojiv. Česká zemědělská univerzita. Praha s. 27-35. ISBN: 978-80-213-2511-1.

Duvigneaud, P. 1988. *Ekologická syntéza*. Praha: Academia. s. 414.

Excel. Microsoft Office Excel. 2010. Microsoft office Enterprise 2010. USA. Release SP2.

Fecenko, J., Ložek, O. 2000. *Výživa a hnojení poľných plodín*. Slovenská poľnohospodárska univerzita. Nitra. p. 452. ISBN 80-7137-777-5.

Gardner, F. P., Pearce, R. B., Mitchell, R. L. 1985. *Physiology of Crop Plants*. Iowa State University Press. p. 321. ISBN: 0-8138-1376-X.

Halavatau, S., Asher, C. J., Bell, L. C. 1996. Soil fertility and sweet potato research in Tonga - Nitrogen and Phosphorus. In: Craswell, E.T. Asher, C.J. and O'Sullivan, J.N. (eds.) *ACIAR Proceedings No.65: Mineral nutrient disorders of root crops in the Pacific*. p. 58-64.

Harrison, A. F. 1987. *Soil Organic Phosphorus – A Review of World Literature*. CAB Intl. Wallingford. Oxon, U.K. p 257.

Hlušek, J., Richter, R., Ryant, P., Kolář, L. 2002. *Výživa a hnojení zahradních plodín*. Drtinova 8. 150 00 Praha 5. s. 8. ISBN: 80-902413-5-2.

Holečková, Z., Kulhánek, M., Balík, J. 2014. Racionální použití hnojiv. Sborník z konference konané na ČZU v Praze dne 27. 11. 2014. Česká zemědělská univerzita v Praze. Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů. Katedra agrochemie a výživy rostlin. Praha. s. 80-83. ISBN: 978-80-213-2511-1.

Holečková, Z., Kulhánek, M., Balík, J. 2017. Use of Active Microorganisms in Crop Production - A Review. *Journal of Food Processing & Technology*. 8 (10): 696. DOI: 10.4172/2157-7110.1000696.

Holečková, Z., Kulhánek, M., Černý, J., Kaplan, L., Balík, J. 2013. Využití neseparovaného digestátu jako zdroje živin pro pěstování gazánie. Racionální použití hnojiv. Česká zemědělská univerzita. Praha. s. 89-92. ISBN: 978-80-213-2416-9.

Holliday, V. T., Gartner, W. G. 2007. Methods of Soil P Analysis in Archaeology. *Journal of Archaeological Science* 34. p. 30 –333.

Ivanič, J., Havelka, B., Knop, K. 1984. Výživa a hnojení rastlín. Bratislava. *Príroda*. p. 486.

Jurčík, F. 1978. Živiny v půdě. Institut výchovy a vzdělání ministerstva zemědělství a výživy ČSR. s. 114.

Kalembkiewicz, J., Chmielarz, U. 2012. Ashes from co-combustion of coal and biomass. *New industrial wastes. Resources. Conservation and Recycling*. p. 69. 109-121. [cit. 2017-10-25]. Dostupné z <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344912001711>.

Khan, A. A., De Jong, W., Jansens, P. J., Spliethoff, H. 2009. Biomass combustion in fluidized bed boilers. Potential problems and remedies. *Fuel processing technology* 21. 90(1). [cit. 2017-10-25]. Dostupné z <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378382008001963>.

Klement, V., Smatanová, M. A Trávník, K. (2012). Padesát let agrochemického zkoušení zemědělských půd v České republice. Čtyřicet let dlouhodobých výživářských pokusů v ÚKZÚZ. Brno. Ústřední kontrolní a zkušební ústav zemědělský. ISBN 978-80-7401- 062-0.

Klír, J. 2000. Bilance rostlinných živin: Nutrient balances in agriculture. Praha. Ústav zemědělských a potravinářských informací. s. 15. ISBN 80-727-1061-3.

Kolář, L., Kužel, S., Peterka, J., Borová-Batt, J. 2010. Agrochemical value of the liquid phase of wastes from fermenters during biogas production. *Plant Soil Environment* 56(1). p. 23-27. [cit. 2017-12-28]. Dostupné z <http://81.0.228.28/publicFiles/14885.pdf>.

Kolář, L., Kužel, S., Peterka, J., Štindl, P., Plát, V. 2008. Agrochemical value of organic matter of fermenter wastes in biogas production. *Plant Soil Environment* 54(8). p. 321-328. [cit. 2017-04-02]. Dostupné z <http://www.agriculturejournals.cz/publicFiles/01892.pdf>.

Kulhánek, M., Balík, J., Černý, J., Vaněk, V. 2009. Evaluation of phosphorus mobility in soil using different extraction methods. *Plant, Soil environment*. 55. 7. p. 267-272

Kulhánek, M., Černý, J., Sedlář, O., Balík, J. 2017. Problematika fosforu v půdě a jeho stanovení metodou Mehlich 3. Živiny a rizikové prvky v půdě 15.16.11. 2017. VÚRV Praha.

Kulhánek, M., Černý, J., Vaněk, V., Balík, J., Budňáková, M. 2015. Racionální použití hnojiv. Sborník z konference konané na ČZU v Praze dne 26. 11. 2015. Česká zemědělská univerzita v Praze. Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů. Katedra agroenvironmentální chemie a výživy rostlin. Praha. p. 61-67. ISBN: 978-80-213-2594-4.

Kunzová, E. 2009. Výživa rostlin a hnojení fosforem. Praha. Výzkumný ústav rostlinné výroby. ISBN 978-80-7427-015-4.

Lack, A., Evans, D. 2005. Plant Biology. Second edition. Taylor & Francis Group. p. 351. ISBN: 0-4153-5643-1.

Larcher, W., 1988. Fyziologická ekologie rostlin. Academie Praha. s. 361.

Leonardi, G., Miglavacca, M., Nardi, S. 1999. Soil Phosphorus Analysis as an Integrative Tool for Recognizing Buried Ancient Ploughsoils. Journal of Archaeological Science 26 p. 343–352.

Liu, Y., Chen, J. 2014. Phosphorus Cycle. Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences. from Encyclopedia of Ecology 2008. Elsevier. [cit. 2017-06-18]. p. 2715-2724. Dostupné z <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780124095489090436>>.

Luscombe P. C., Syers J. K., Gregg, P. E. H. 1979. Water extraction as a soil testing procedure for phosphate. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 10. p. 1361-1369.

Mackey, K. R. M. 2009: Phosphorus Cycle, Encyclopedia of Microbiology (Third Edition), Academic Press, [cit. 2017-02-18]. p. 322-335. Dostupné z <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123739445000560>.

Macháček, V. 2002. Metody stanovení obsahu fosforu v půdách. Sborník z konference „Racionální použití hnojiv zaměřené na problematiku fosforu v rostlinné výrobě“. Praha KAVR. s. 46-49, ISBN 80-213-0957-1.

Macháček, V., Čermák, P. 2004. Stabilizace půdní úrodnosti z hlediska výživy rostlin fosforem. VÚRV. s. 17.

McGechan, M. B., Lewis, D. R. 2002. Sorption of phosphorus by soil. part 1: principles. equations and models. Biosystems Engineering 82. p. 1-24.

McGechan, MB., Lewis, DR. 2002. Sorption of phosphorus by soil. part 2: Measurement methods, results and model parameter values. Biosystems Engineering. p. 82. 115-130.

- Mehlich A. 1984. Mehlich 3 soil test extractant: A modification of Mehlich 2 extractant. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 15. 1409-1416.
- Mehlich, A. 1984. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 15. 1409.
- Mengel, K. 1991. *Ernährung und Stoffwechsel die Pflanze*. Gustav Fischer Verlag Jena. p. 466. ISBN 3-334-00310-8.
- Michalík, I. 2001. Molekulárne a energetické aspekty príjmu a asimilácie živín v rastlinách. Slovenská poľnohospodárska univerzita v Nitre p. 158. ISBN: 80-7137-836-4.
- Mikanová, O., Šimon, T. 2011. Alternativní výživa rostlin fosforem. metodika. Výzkumný ústav rostlinné výroby. v. v. i. ISBN 978-80-7427-080-2.
- Minasny, B., McBratney A. B., Brough, D. M., Jacquier, D. 2011. Models relating soil pH measurements in water and calcium chloride that incorporate electrolyte concentration. University of Sydney. Australia, p. 728–732.
- Montag, D., Gethke, K., Pinnekamp, J. 2008. Protecting the Phosphorus Resource by Phosphorus Recycling. *Wastewater Treatment Plants*. p. 1.
- Nash, D. M., Watkins, M., Heaven, M. W., Hannah, M., Robertson, F., McDowell, R. 2014. Effects of cultivation on soil and soil water under different fertiliser regimes. *Soil and Tillage Research*. Volume 145. [cit. 2017-12-29] p. 37-46. Dostupné z <http://www.scopus.com/record/display.url?eid=2-s2.0>.
- Nátr, L., Laštůvka, Z. 1980. Několik aspektů příjmu a metabolismu fosforu v rostlinách. *Agrochémia* 20(1). 8-11.
- Neuberg, J. 1990. Komplexní metodika výživy rostlin. ÚVTIZ. Praha. s. 327.
- Ochecová, P., Tlustoš, P., Száková, J., Košnár, Z., Mercl, F. 2014. Popepl z biomasy - významný zdroj živin. Racionální použití hnojiv. s. 43-50. ISBN: 978-80-213-2511-1.
- Olsen, S.R., Cole, C.V., Watanabe, F.S., Dean, L.A. 1954. Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. USDA Circular No. 939. U.S. Gov. Print. Office, Washington D.C. p. 19.
- Omil, B. I., Piñeiro, V., Merino, A. 2007. Race elements in soils and plants in temperate forest plantations subjected to single and multiple applications of mixed wood ash. *The Science of the Total Environment* 381(1-3). p. 157-168.
- Öpik, H., Rolfe, S. A. 2005. *The Physiology of Flowering Plants*, Fourth Edition. Cambridge. p. 392. ISBN: 13 978-0-521-66485-3.

Ostatek-Boczynski Z.A., Lee-Steere P. 2012. Evaluation of Mehlich 3 a universal nutrient extractant for Australian sugarcane soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 43. p. 623–630.

Park, B. B., Yanaj, R. D., Sahm, J. M., Ballard, B. D., Abrahamson, L. P. 2004. Wood Ash Effects on Soil Solution and Nutrient Budgets in A shrub Willow Bioenergy Plantation. *Water Air and Soil Pollution* 159. p. 209-224.

Rayment, G. E., Lyons, D.J. 2011. *Soil Chemical Methods – Australasia*. CSIRO Publishing. Collingwood.

Richter, R., Hlušek, J. 1994. *Výživa a hnojení rostlin. 1. Obecná část*. Brno. Vysoká škola zemědělská. s. 171 ISBN: 80-7157-138-5.

Ruttenberg, K. C. 2014. The Global Phosphorus Cycle. Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences. *Treatise on Geochemistry (Second Edition)*. Elsevier. Volume 10. Biogeochemistry. [cit. 2017-011-12]. p. 499-558. Dostupné z <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780080959757008135>.

Ryant, P. 2005. *Pšenice jarní*. Brno. Ústav agrochemie a výživy rostlin MZLU v Brně.

Sanchez, Ch., A. 2007. *Handbook of Plant Nutrition*, Taylor & Francis Group. New York. ISBN 978-0-8247-5904-9.

Sedlář, O., Balík, J., Kulhánek, M., Černý, J., Kos, M. 2018. Mehlich 3 extractant used for the evaluation of wheatavailable phosphorus and zinc in calcareous soils. *Plant, Soil environment*. Vol. 64. No. 2. p. 53-57.

Sharpley, A. N. 1995. Soil phosphorus dynamics. agronomic and enviromental impacts. *Ecological Engineering*, 5. p. 261 – 279.

Sims, J. T., Pierzynski, G. M. 2005. *Chemistry of phosphorus in soils*. Soil Science Society of America Book Series Number 8. p. 151-192. ISBN: 0-89118-843-6.

Smatanová, M., Sušil, A. 2015. *Výsledky agrochemického zkoušení zemědělských půd za období 2009-2014*. Sekce zemědělských vstupů. Brno. Ústřední a kontrolní zkušební ústav zemědělský. ISBN 978-80-7401-114-6.

Smatanová, M., Sušil, A. 2017. Racionální použití hnojiv. Sborník z konference konané na ČZU v Praze dne 30. 11. 2017. Česká zemědělská univerzita v Praze. Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů. Katedra agrochemie a výživy rostlin. Praha. s. 25-31. ISBN: 978-80-213-2793-1.

Sorauner, P., Lindau, G., Reh, L. 1969. Handbuch der Pflanzenkrankheiten Bd. 1 – Die nichtparasitären Krankheiten. 2. Teil – Ernährungsstörungen. Allgemeine Schäden auf Boden und Pflanze. Berlin. Parey. p. 478.

StatSoft, Inc. 2013. STATISTICA (data analysis software system). version 12.0. Dostupné z <www.statsoft.com>.

Steward, J. W. B., Sharpley, A. N. 1987. Controls of dynamics of soil and fertilizer phosphorus and sulphur. In: Follet R. F., Steward J. W. B. et Cole C. V. (eds). Soil Fertility and Organic Matter as Critical Components of Production. SSSA Spec. Pub. 19. Am. Soc. Agron. Madison. WI. Cit. in Sharpley 1995.

Škarpa, P. 2013. Moderní trendy v laboratorní výuce agrochemie a výživy rostlin. Odborný kurz. další vzdělávání pedagogických pracovníků Středních odborných škol. Brno. Mendelova univerzita v Brně. ISBN 978-80-7375-734-2.

Van Wazer, J. R. 1958. Phosphorus and Its Compounds. New York: Vol. I. Wiley (Interscience).

Vaněk, V., Černý, J., Balík, J., Pavlík, M., Pavlíková, D., Tlustoš, P., Valtera, K. 2012. Výživa zahradních rostlin. Nakladatelství Academia. Praha. s. 570. ISBN 978-80-200-2147-2.

Vaněk, V., Balík, J., Němeček, R., Pavlíková, D., Tlustoš, P. 1998. Výživa a hnojení polních plodin, ovoce a zeleniny. Farmář-Zemědělské listy. s. 124. ISBN: 80-902413-1-X.

Vaněk, V., Balík, J., Pavlíková, D., Tlustoš, P. 2007. Výživa polních a zahradních plodin. Praha. Profi Press. Praha. s. 167. ISBN 978-80-86726-25-0.

Vaněk, V., Balík, Jiří., Pavlík, M., Pavlíková, D., Tlustoš, P. 2016. Výživa a hnojení polních plodin. Profi Press s.r.o. Praha. s. 220.

Voplakal, K. 2001. Fosfor v půdě. Úroda. Profi Press s.r.o. [cit. 2017-08-12]. Dostupné z <<http://uroda.cz/fosfor-v-pude/>>.

Wallace, T. 1961. The Diagnosis of mineral Deficiencies in Plants by visual symptoms. A colour atlas and guide. Journal of plant nutrition and soil science 101(1). p. 52-52.

Wuenschel, R., Unterfrauner, H., Peticzka, Z., Zehetner, F. 2015. A comparison of 14 soil phosphorus extraction methods applied to 50 agricultural soils from Central Europe. Plant, Soil Environment. Vol. 61.No. 2. p. 86-96.

Zbíral J. 2016. Determination of plant-available micronutrients by the Mehlich 3 soil extractant – a proposal of critical values. Plant, Soil and Environment. 62. p. 527-531.

Zbiral, J. 2001. Porovnání extrakčních postupů pro stanovení základních živin v půdách ČR. Brno. Ústřední kontrolní a zkušební ústav zemědělský. ISBN 80-860-5169-2.

Zbiral, J. 2002. Analýza půd - jednotné pracovní postupy. Vyd. 2. přeprac. a rozš. Brno. Ústřední kontrolní a zkušební ústav zemědělský. ISBN 80-865-4815-5.

Zbiral, J., Čižmarová, E., Obdržálková, E., Rychlý, M., Vilamová, V., Srnková, J., Žalmanová, A. 2016. Analýza půd I. Jednotné pracovní postupy. vyd. 4. ÚKZÚZ. Brno.

Zbiral, J., Obdržálková, E., Smatanová, M., 2012. Ústřední kontrolní a zkušební ústav zemědělský. Bulletin Národní referenční laboratoře XVI 2012/1. Optimalizace a širší využití metody Mehlich 3 v systému agrochemického zkoušení půd. Část 1. Optimalizace stanovení P a S metodou Mehlich 3. ISSN 1801-9196.

Zbiral, J. 2017. Analytické možnosti pro agrochemické zkoušení půd, Sborník 23. mezinárodní konference. Racionální použití hnojiv. Konané 30.11.2017. ČZU. Praha. s. 21-24.

Zbiral J. (2017): Předběžný návrh kritérií pro obsah mikroelementů metodou Mehlich 3. Živiny a rizikové prvky v půdě. Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i., Praha-Ruzyně. Součást prezentace na semináři 16.11.2017

Zehetner F., Wuenscher R., Peticzka R., Unterfrauner H. (2018): Correlation of extractable soil P with plant P uptake: 14 extraction methods applied to 50 agricultural soils from Central Europe. Plant soil and Environment. In press

10 Seznam obrázků, tabulek a grafů

Obrázek 1: Cyklus fosforu (Duvigneaud, 1988).....	5
Obrázek 2: Půdní cyklus fosforu podle přeměn (Steward et Shapley, 1987).	7
Graf 1: Vstupní vodný výluh P, vstupní Mehlich 3 P, vstupní AEM P (mg/kg).....	29
Graf 2: Vstupní pH, pH po sklizni, pH v Mehlich 3.....	30
Graf 3: Hodnoty P, Fe, Al, Ca (mg/kg) Mehlich 3 po sklizni	31
Graf 4: Vstupní Mehlich 3 P, Mehlich 3 P po sklizni (mg/kg).....	31
Graf 5: Obsah P v nadzemní hmotě (mg/kg)	32
Graf 6: Odběr P nadzemní hmotou (mg)	32
Graf 7: Průměrná výška rostlin (cm)	33
Graf 8: P - index.....	33
Graf 9: Vstupní Mehlich 3 a vstupní vodný výluh P	37
Graf 10: Vstupní Mehlich 3 P/výstupní Mehlich 3 P	39
Graf 11: Vstupní vodný výluh/výstupní Mehlich 3 P	39
Graf 12: Vstupní Mehlich 3 P/obsah P	40
Graf 13: Vstupní pH /pH v Mehlich 3	41
Tabulka 1: Průměrný obsah organických látek (OL) a živin v sušině čistírenského kalu (%) (Vaněk et al., 2016).....	15
Tabulka 2: Průměrné hodnoty pH, obsah organických látek (OL), sušiny a živin ve zbytcích po fermentaci (Vaněk et al., 2016)	16
Tabulka 3: Průměrné celkové obsahy vybraných živin u souboru popelů (Ochecová et al., 2014).....	17
Tabulka 4: Porovnání vstupu fosforu do půdy v hnojivech s průměrným odběrem rostlinami v kg na ha zemědělsky využívané půdy (Kulhánek et al., 2015).....	21
Tabulka 5: BPEJ půd	24
Tabulka 6: Korelační analýza obsahu P v půdě a jeho obsahu a odběru rostlinami – rok 2015, 2017	34
Tabulka 7: Korelační analýza obsahu P v půdě a jeho obsahu a odběru rostlinami – rok 2015	35
Tabulka 8: Korelační analýza obsahu P v půdě a jeho obsahu a odběru rostlinami – rok 2017	35
Tabulka 9: Korelační analýza různých analytických metod extrakcí půd a obsah a odběr P rostlinami – rok 2015, 2017.....	36
Tabulka 10: Korelační analýza hodnot pH, obsah P v půdě, obsahy a odběry P rostlinami – rok 2015, 2017	36
Tabulka 11: Regrese vstupního Mehlich 3 P se vstupním vodným výluhem P a vstupní AEM P	37
Tabulka 12: Mehlich 3 po sklizni pro P a Mehlich 3 po sklizni pro Ca, Fe a Al	38
Tabulka 13: Regrese vstupních obsahů P a Mehlich 3 po sklizni pro P, Ca, Fe, Al	39
Tabulka 14: Regrese vstupního Mehlich 3 P, vstupního vodného výluhu P, vstupní AEM P a obsahů, odběrů P nadzemní hmotou	40
Tabulka 15: Regrese vstupního Mehlich 3 P, vstupního pH, výstupního pH a pH v Mehlich 3 po sklizni.....	41