

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů

Katedra agroenvironmentální chemie a výživy rostlin



**Hnojení pšenice ozimé fosforem v dlouhodobých polních
pokusech s aplikací čistírenských kalů**

Diplomová práce

Autor práce: Bc. Markéta Burgetová

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

© 2016 ČZU v Praze

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci "Hnojení pšenice ozimé fosforem v dlouhodobých polních pokusech s aplikací čistírenských kalů" jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autorka uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušila autorská práva třetích osob.

V Praze dne 4. 4. 2016 _____

Poděkování

Ráda bych touto cestou poděkovala Ing. Martinu Kulhánkovi Ph.D. za odborné vedení práce, trpělivost, dále také za přínosné rady a informace. Ráda bych také poděkovala svým nejbližším za podporu.

Hnojení pšenice ozimé fosforem v dlouhodobých polních pokusech s aplikací čistírenských kalů

Souhrn

Cílem teoretické části práce je popsat důležitost fosforu v půdě a v rostlinách, a jednotlivé systémy hnojení, jimiž je fosfor do půdy dodáván. V současné době je fosfor považován za limitující prvek ve výživě rostlin, a proto je nutné jeho obsah monitorovat a doplňovat ho do půdy podle potřeby. Fosfor je do půdy aplikován různými druhy hnojiv. K jeho doplnění je možné použít organická i minerální hnojiva, či hnojiva v pohodě odpadních látek, jimiž jsou kaly z čistíren odpadních vod. Čistírenské kaly se jeví jako bohatý zdroj organických látek a dalších živin včetně fosforu, a jejich aplikací na zemědělskou půdu se při správném použití projevuje zlepšení půdních vlastností.

Cílem experimentální části je porovnání jednotlivých variant hnojení (čistírenské kaly, hnůj a minerální hnojiva) z hlediska vodorozpustného, přístupného a reziduálního fosforu v půdě a rovněž z hlediska vlivu uvedených variant na výnosy ozimé pšenice. Experiment byl realizován na stanovištích Humpolec, Hněvčeves a Suchdol a hodnocení probíhalo v období 1996 - 2015.

Obsahy vodorozpustného fosforu byly na všech stanovištích poměrně vyrovnané a nelze z nich jednoznačně vyvodit nejlepší variantu hnojení. Nejvyšší obsahy však byly ve většině případů naměřeny při hnojení čistírenskými kaly.

Na všech 3 stanovištích kaly vykazovaly nejvyšší hodnoty přístupného fosforu v půdě. Z výsledků vyplývá, že se kaly projevily jako velmi stabilní dlouhodobý zdroj mobilního fosforu.

Zjišťování obsahu reziduálního fosforu bylo prováděno oproti ostatním frakcím jen v letech 1996, 2005 a 2014. Na stanovištích Humpolec a Suchdol bylo dosaženo nejvyšších obsahů reziduálního P po aplikaci čistírenských kalů. Na stanovišti Hněvčeves byl nejvyšší obsah zaznamenán na variantě hnojené minerálními hnojivy.

I přesto, že se kaly projevily jako nejlepší zdroje z hlediska sledovaných frakcí fosforu, u varianty hnojené NPK byly zjištěny nejvyšší výnosy pšenice ozimé. Varianta hnojená kaly se projevila pro výnos jako druhý nejlepší způsob hnojení a jako třetí způsob poté hnojení hnojem.

Klíčová slova: Fosfor; půda; čistírenské kaly; minerální hnojiva; hnůj; dlouhodobý pokus

Phosphorus fertilizing of winter wheat in long-term field experiments including the sewage sludge treatment

Summary

The theoretical part of the work is to describe the importance of phosphorus in soils and plants, and individual fertilizing systems, which is phosphorus in the soil supplied. Currently phosphorus considered limiting element in plant nutrition and it is therefore necessary to monitor the content and add it into the soil as required. Phosphorus is applied to the soil in different sorts of fertilizers. It is possible to use organic and mineral fertilizers and waste materials, for example sludge from sewage treatment plants. Sewage sludge appears to be a rich source of organic substances and other nutrients including phosphorus. Thanks to the application of sewage sludge on agricultural land, when used properly, reflects in the improvement of soil properties.

The aim of this work is to compare different fertilizing treatments (sewage sludge, manure and mineral fertilizers) in terms of water-soluble, accessible and residual phosphorus in the soil and also in terms of the influence of the mentioned treatments on winter wheat yields. The experiment was conducted at Humpolec, Hněvčeves and Suchdol sites and the evaluation was realized between the years 1996 and 2015.

The contents of readily available phosphorus at all sites were fairly balanced and did not clearly indicate the best fertilization option. The highest values were, however, in most cases measured at the sewage sludge treatment.

Sewage sludge appeared to be good source of mobile phosphorus. The values were almost always higher in comparison to the other studied treatments. It was confirmed at all three sites. The increasing tendency in mobile soil P content was clearly visible during the experiments. Estimating of residual phosphorus was carried out in comparison with other fractions only in the years 1996, 2005 and 2014. The highest levels of residual P after application of sewage sludge were achieved at Humpolec and Suchdol sites. At the station Hněvčeves, the highest content was estimated on the variant fertilized with mineral fertilizers.

Even though the sludge proved to be the best phosphorus resource in our experiments, the highest winter wheat yields were reached using mineral fertilizers. A variant fertilized with sludge appeared to be second best way, and thereafter followed farmyard manure treatment.

Keywords: Phosphorus; soil; sewage sludge; mineral fertilizers; manure; long-term effort

Obsah

1	Úvod.....	1
2	Cíl práce	2
3	Hypotéza.....	3
4	Literární rešerše	4
4.1	Fosfor v půdě	4
4.1.1	Minerální formy fosforu	4
4.1.2	Organické formy fosforu	5
4.1.3	Přístupný fosfor	6
4.1.4	Vodorozpustný fosfor	7
4.2	Koloběh fosforu	8
4.2.1	Koloběh fosforu v prostředí	8
4.2.2	Koloběh fosforu v půdě	8
4.3	Fosfor v rostlinách	10
4.3.1	Význam fosforu v rostlinách	10
4.3.2	Příjem fosforu rostlinou	11
4.3.3	Nadbytek a nedostatek P v rostlině.....	12
4.4	Hnojení fosforem	13
4.4.1	Hnojení chlévským hnojem	14
4.4.2	Hnojení minerálními hnojivy.....	15
4.5	Hnojení za použití čistírenských kalů.....	16
4.5.1	Legislativa pro používání kalů na zemědělské půdě	18
4.5.2	Složení a úprava kalu.....	20
4.5.3	Podmínky pro užívání kalů	22
4.6	Hnojení pšenice ozimé.....	22
5	Metodika	25

5.1	Analytická stanovení	27
6	Výsledky	29
6.1	Vývoj různých frakcí fosforu v půdě a výnosy pšenice v závislosti na hnojení v daných lokalitách	29
6.1.1	Stanoviště Humpolec	30
6.1.2	Stanoviště Hněvčeves	34
6.1.3	Stanoviště Suchdol.....	38
6.2	Porovnání forem fosforu a výnosů pšenice ozimé na všech pokusných stanovištích.....	42
6.3	Hodnocení analytických metod pro stanovení forem fosforu	44
7	Diskuze	47
8	Závěr.....	51
9	Použitá literatura.....	52

1 Úvod

Pšenice ozimá je hojně zastoupena po celé České republice a je přizpůsobivá nejrůznějším přírodním podmínkám. Pro docílení kvalitní sklizně je nutná vysoká půdní úrodnost, při níž je velmi důležitý obsah přijatelných živin zejména N, P, K a Mg v půdě.

Fosfor se řadí mezi základní biogenní prvky rostlin. Je potřebný pro procesy v metabolismu, a je tedy jedním z nejdůležitějších prvků pro růst a vývoj rostlin, stejně tak i pro výnos. Fosfor je důležitou součástí pro zakládání a tvorbu květů. Rostlinami je přijímán pomocí kořenů rozpuštěný půdním roztokem ve formě fosforečnanových aniontů. U rostlin s dostatečnou zásobou fosforu se projeví zrychlený přechod do generativní fáze, dále dříve dozrávají a zkrátí se u nich vegetační období. V případě, že rostlina trpí nedostatkem fosforu, projeví se u plodiny nižší vzrůst, úzké a malé vzpřímené listy, slabší stonky, u obilnin pak omezené odnožování. Obsah fosforu v obilninách se během vegetace tvoří 0,3 až 0,4 % sušiny.

Fosfor je do půdy doplňován podle potřeby s ohledem na stav půdy, lze ho aplikovat mnoha způsoby za použití širokého spektra hnojiv. Lze použít jak hnojiva organická, tak minerální. Další možností je aplikace odpadů z čistíren odpadních vod.

Aplikace statkových hnojiv příznivě ovlivňuje půdní vlastnosti, jako je retenční schopnost, díky které je fosfor lépe využíván. Hnojem jsou do půdy dodávány organické látky, které zlepšují mobilitu fosforu. Za použití minerálních hnojiv je možné docílit navýšení výnosů, a zlepšení úrodnosti půdy. Aplikací čistírenských kalů je půda obohacena o poměrně velké množství fosforu, živin, organických látek a stopových prvků. Zároveň je důležité, aby kaly dodáním do půdy negativně neovlivnily ekosystém. Jelikož kaly mohou obsahovat těžké kovy, toxické látky nebo patogeny, jsou pro jejich aplikaci na půdy stanovena přísná legislativní opatření. Po použití kalu na půdu je nutné provádět dlouhodobé pokusy, spolu s nimi i rozbor půdy, a tímto způsobem kontrolovat vliv kalů na obsah prvků v dané půdě. Využití kalů z čistíren odpadních vod není vhodné jen pro dodání živin do půdy, ale v současné době se jeví jako efektivní a dobrý způsob využití vzniklých odpadů ve srovnání s jejich skládkováním nebo spalováním.

2 Cíl práce

Cílem práce je porovnání vývoje zásobenosti různých frakcí fosforu v půdě v závislosti na různých systémech hnojení pšenice ozimé včetně aplikace čistírenských kalů.

Dalším cílem je vyhodnocení odběrů fosforu a výnosů ozimé pšenice u vybraných variant hnojení.

3 Hypotéza

Předpokládá se, že na kontrolní nehnojené variantě bude v dlouhodobém pokusu zejména vlivem odběrů rostlinami klesat obsah fosforu v půdě.

Na hnojených variantách je očekáván vzestupný trend obsahu všech frakcí P v půdě zejména u varianty hnojené čistírenskými kaly, kde je v našich pokusech dodávána nejvyšší dávka P.

Dalším předpokladem je, že stoupající dávka fosforu do půdy povede ke zvýšeným odběrům fosforu pšenicí ozimou.

Na stanovištích s nižší zásobou P v půdě bude se stoupající dávkou fosforu v hnojivech dosaženo pravděpodobně i vyšších výnosů pšenice.

4 Literární rešerše

4.1 Fosfor v půdě

V půdě se nachází množství celkového fosforu v rozmezí 0,03 - 0,1 % (Kalinová *et al.*, 2007). Vaněk *et al.* (2007) uvádí množství 0,01-0,15 %. Celkový půdní fosfor je možné dělit na organicky vázaný a minerální P. Obě zmiňované frakce P jsou považovány za velmi důležitý zdroj mobilních fosforečnanů přijatelných pro rostliny, z tohoto důvodu je nutné sledovat vliv různých hnojiv na jejich podíl v půdě (Kulhánek *et al.*, 2006). Z agronomického hlediska je nejvýznamnějším přirozeným zdrojem fosforu v půdě minerál apatit. Ten nalezneme ve všech magmatických horninách jako rozptýlené různé formy fluor-, chlór- a hydroxylapatitu (Mackey et Payton, 2009). V menší míře se vyskytují v půdách také primární minerály fosforečnanu železa s příměsí Mn - tripity nebo hydratované fosforečnany hliníku - wawelity. V málo provzdušených, zamokřených půdách může se také vyskytovat fosforečnan železnatý – vivianit (Richter, 1999).

Zvětráváním apatitů a dalších primárních fosfátových minerálů jsou uvolňovány anionty kyseliny ortofosforečné, ty dále přecházejí do tzv. sekundárních forem – forem minerálních či organických, z nichž některé slouží jako zdroj fosforu pro výživu rostlin (Mackey et Paytan, 2009).

Převážná část fosforečných sloučenin jsou látky nerozpustné ve vodě, a tím jsou pro rostliny nepřijatelné. Podíl vodorozpustných sloučenin je velmi malý. Pro příjem fosforu rostlinami je důležitá přiměřená intenzita slunečního záření, teplota a vlhkost půdy, dostatek půdní organické hmoty, dobrá mikrobiální aktivita a v neposlední řadě hodnota pH půdy (Sharpley *et al.*, 2003).

4.1.1 Minerální formy fosforu

Obsah fosforu v minerálních vazbách zastupuje v našich podmínkách více než polovinu celkového obsahu fosforu v zemědělsky obhospodařovaných půdách. Prakticky všechny minerální sloučeniny fosforu jsou nerozpustné ve vodě, tedy pro rostliny málo přístupné (Richter, 1999). Zastoupení sloučenin fosforu, které jsou rozpustné ve vodě, je velmi malé a pohybuje se mezi hodnotami 0,8 – 8 mg fosforu na 1 kg vyschlé půdy.

Vodorozpustnost těchto sloučenin závisí na půdní reakci, typu a druhu půdy a klimatických podmínkách (Sharpley *et al.*, 2003).

Minerální formy fosforu jsou tvořeny skupinami primárních fosforečných minerálů a sekundárními vysráženými a adsorbovanými fosforečnany. Primární fosforečnany se vyskytují rozptýleně ve všech magmatických horninách- jedná se o vápenaté sloučeniny, které se skládají ze tří molekul $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ a dále z jedné molekuly chloridu, fluoridu nebo hydroxidu vápenatého. Dle doprovodné sloučeniny je následně odvozen jejich název např. chlorapatit apod. (Mackey et Paytan, 2009).

V kyselých až alkalických půdách převažují anorganické sloučeniny fosforu, konkrétně soli vápenaté. Jedná se o sloučeniny vznikající v půdě při chemické reakci původně rozpustných sloučenin nebo uvolňované kyseliny fosforečné: $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$, CaHPO_4 atd., ty vedou až k tvorbě apatitů. V neutrálních půdách prakticky vždy vzniká sloučenina složená z molekuly fosforečnanu vápenatého a hydrogenfosforečnanu vápenatého. V alkalickém prostředí vzniká především hydroxylapatit. Vznik solí kyseliny fosforečné závisí na pH prostředí. Má velký vliv na chování P v půdě jeho dostupnost pro rostliny (Vaněk *et al.*, 2012).

4.1.2 Organické formy fosforu

Organický fosfor je v půdě vázán především v humifikované organické hmotě, ale je možné ho nalézt i v rostlinných reziduích, ve zbytcích živočišných těl a půdních mikrobů. Kumulují se zejména v horním humusovém horizontu, podíl organického fosforu většinou klesá s rostoucí hloubkou půdního profilu (Sharpley *et al.*, 2003). Organický fosfor je podstatnou částí celkového fosforu v půdě. Zastoupení organického fosforu se v různých druzích půd liší. Mezi nejbohatší půdy na organicky vázaný fosfor patří půdy travních porostů. V některých případech dosahuje organicky vázaný fosfor až 80% veškeré zásoby půdního fosforu (Withers *et al.*, 2014). Naopak v ornici lze obsah organického fosforu z celkového zastoupení nalézt v intervalu od 25 do 60 %.

Až 50 % z organického fosforu tvoří fyтин, a následně jeho odvozené soli – fytáty. Fyтин je potenciálním zdrojem využitelného fosforu pro rostliny (Vaněk *et al.*, 2007). Jako další organické formy fosforu jsou uváděny zejména poměrně mobilní fosfolipidy, nukleové kyseliny, nukleoproteidy a fosforylované lipidy, ty se nachází v kořenové hmotě, a do půdy putují spolu s posklizňovými zbytky a se statkovými hnojivy (Withers *et al.*, 2014).

Fosforylace a defosforylace organických látek jsou nejdůležitějšími přeměnami energie v procesu látkové výměny v půdě. Nadbytek fosforu v půdě snižuje energetické tepelné ztráty, a zlepšuje produktivitu především humifikace a dalších procesů probíhajících v půdě (Vaněk *et al.*, 2007). Fosfor působí pozitivně na půdní bilanci organické hmoty. Půdní humus přispívá ke zlepšení fyziologické využitelnosti fosforu z půdy i hnojiv. Nejvýznamnější funkcí je ochrana před reakcemi s vápníkem a těžkými kovy (Sharpley *et al.*, 2003). Při tomto účinku nastává tvorba chelátových vazeb mezi jednotlivými složkami půdního humusu a minerálními sorbenty fosfátových iontů. Ochranný účinek humusu je tedy nepřímý, ale hraje významnou roli v tzv. humusového efektu. Humusový efekt je typický tím, že přijatelnost fosforu rostlinami v půdním prostředí vzrůstá díky přítomnosti humusových látek. Z toho vyplývá, že organicky vázaný fosfor může mít velký význam pro potenciální využitelnou zásobu fosforu v půdě, za předpokladu dodržení určitých podmínek (Richter, 1999).

4.1.3 Přístupný fosfor

Zdrojem pro rostliny je jen malá zásoba fosforu, která je obsažena v půdním roztoku, tj. okamžitě přístupný fosfor. V případě odčerpání této zásoby fosforu dojde k narušení rovnováhy systému a do půdního roztoku se postupně uvolňuje labilní fosfor. Odčerpaný fosfor je tedy nepřetržitě doplňován z ostatních zásob (McGecha et Lewis, 2002). Proto je velmi důležitý vyrovnaný vztah mezi formami přístupného fosforu, konkrétně mezi okamžitě přístupným, a labilním fosforem. Rovněž minerální vápenaté sloučeniny fosforu mohou postupně uvolňovat fosfor do půdního roztoku, a zajistit tak výživu pro rostliny (Ivanov *et al.*, 2012).

Chemická sorpce P v půdě probíhá rychle, především spolu s hliníkem a železem. Tento proces probíhá za spoluúčasti procesu srážení rozpustných fosforečnanů přes řadu nestabilních sloučenin, vysrážených ve formách koloidních hydratovaných částic. Tyto částice mají poměrně velký povrch, tím pádem jsou pro rostliny stále přijatelné, a to až do doby, kdy dojde k jejich dehydrataci a následné krystalizaci (Mackey et Paytan, 2009). Fosfor je v půdě málo mobilní a jeho obsah v půdním roztoku je malý. Nízkou mobilitu potvrzuje výzkum z publikace Jiang (2006), ze které je patrné, že i po dlouhodobém hnojení je zaznamenán velmi malý průnik fosforu do hlubších horizontů.

Z výsledků studie „Obsah fosforu v půdě po přihnojení Amofosem k ozimé pšenici v období regeneračního hnojení“ vyplývá, že povrchová aplikace není předpokladem pro lepší

výživu rostlin, jelikož se fosfor velmi obtížně dostává ke kořenům. Samozřejmě povrch půdy přesychá, a tím pádem nejsou vytvořeny ideální podmínky pro příjem živin. (Vaněk *et al.*, 2002).

Pro výživu rostlin je důležitý fosfor z půdní zásoby, z něhož je tvořena velká část produkce. Hnojením jsou doplňovány živiny, které byly odebrány při sklizni. Je důležité aplikovat fosforečná hnojiva tak, aby následným zpracováním a zapravením do půdy pronikla do celého půdního profilu (Sharpley *et al.*, 2003).

4.1.4 Vodorozpuštěný fosfor

Doplňování zásoby rozpuštěného P probíhá především ze dvou hlavních zásobníků: z organicky vázaného P a z minerálních sloučenin P. Tyto přeměny zahrnují biologické a fyzikálně-chemické procesy, přesto podíl mikroorganismů často převažuje. Rozpuštěním anorganických sloučenin fosforu a jeho uvolňováním do půdního roztoku jsou ovlivňovány jak půdní mikroorganismy, tak i kořeny rostlin (Šimek, 2003). Vaněk *et al.* (2007) uvádí, že mechanismy zmíněných procesů nejsou ještě zcela objasněny, nicméně je již udáváno několik způsobů, kterými mikroorganismy zvyšují rozpustnost fosforečných minerálů:

- Vznik H_2CO_3 a HCO_3^- jako důsledek tvorby CO_2 respirací,
- vznik organických kyselin a jejich uvolňování do půdního prostředí,
- uvolňování H^+ v důsledku příjmu kationů,
- tvorba chalátů Ca, Fe a Al reakcí s organickými kyselinami
- tvorba anorganických kyselin některými specifickými skupinami mikroorganismů.

Mackey et Paytan (2009) uvádí, že procesu rozpouštění anorganických sloučenin fosforu v půdě se účastní asi 10 % druhů půdního mikrobiálního společenstva, zejména rhizosférické bakterie rodu *Bacillus*, *Micrococcus*, *Mycobacterium* a *Pseudomonas* a některé houby.

Je pozoruhodné, že biologické procesy postupného uvolňování fosforu byly uplatňovány pro obohacení půdy přijatelným a rozpustným fosforem již dávno předtím, než byla zavedena průmyslová výroba fosforečných hnojiv. Např. při smíchání půdy s hnojem, s práškovou sírou a s rozemletými horninovými fosfáty získala půda organické látky a předpoklad pro tvorbu H_2SO_4 oxidací síry pomocí thiobakterií (Mikanová et Šimon, 2001).

V dnešní době jsou fosforečná hnojiva vyráběna mnoha způsoby. Nicméně obvykle jsou všechny procesy zahajovány rozkladem fosfátů za pomoci silných kyselin, např. H_2SO_4 (Vaněk *et al.*, 2007).

4.2 Koloběh fosforu

4.2.1 Koloběh fosforu v prostředí

Fosfor v přírodě lze nalézt v jeho nejvyšším oxidačním stupni, tj. aniont kyseliny ortofosforečné PO_4^{3-} . Fosfor se v přírodě vyskytuje jen jako jeden stabilní izotop tj. ^{31}P . V případě malého množství se v přírodě nachází jako dva radioaktivní izotopy tj. ^{32}P a ^{33}P . Prakticky veškerý fosfor v prostředí je ve formě PO_4^{3-} , tzn. v oxidačním stavu P^{5+} . V zemské kůře je fosfor v zastoupení 0,12 % a jeho koncentrace se odhaduje cca na 1 - 2 g na 1 kg (Šimek, 2003).

Primárním zdrojem fosforu jsou sedimenty a horniny, které tvoří současně i největší přírodní zásobník. Zvětráváním minerálů a také z organických zbytků se fosfor uvolňuje do prostředí a akceleruje globální cyklus fosforu. Významnou roli hraje i lidský faktor. Suchozemské ekosystémy uvolňují fosfor do koloběhu, ten se dále dostává do moří a oceánů, a následně je ukládán v sedimentech (Vaněk *et al.*, 2012). Z globálního měřítko se nejedná v případě fosforu o klasický cyklus, ale spíše o jednosměrný přesun fosforu z hornin do sedimentů. Avšak ty se mohou postupem času ze dna moří vyzdvihnout, a posléze formovat usazené horniny. Následně může být fosfor opět zvětráván a jinými procesy se pak může uvolňovat a přesouvat do nových sedimentů. Lidský faktor v podobě těžby fosforečných minerálů či užití fosforu jako hnojiva, výrazně urychluje cyklus. Z těchto procesů se uvolněný fosfor nakonec vrací zpět do sedimentů moří a oceánů (Šimek, 2003).

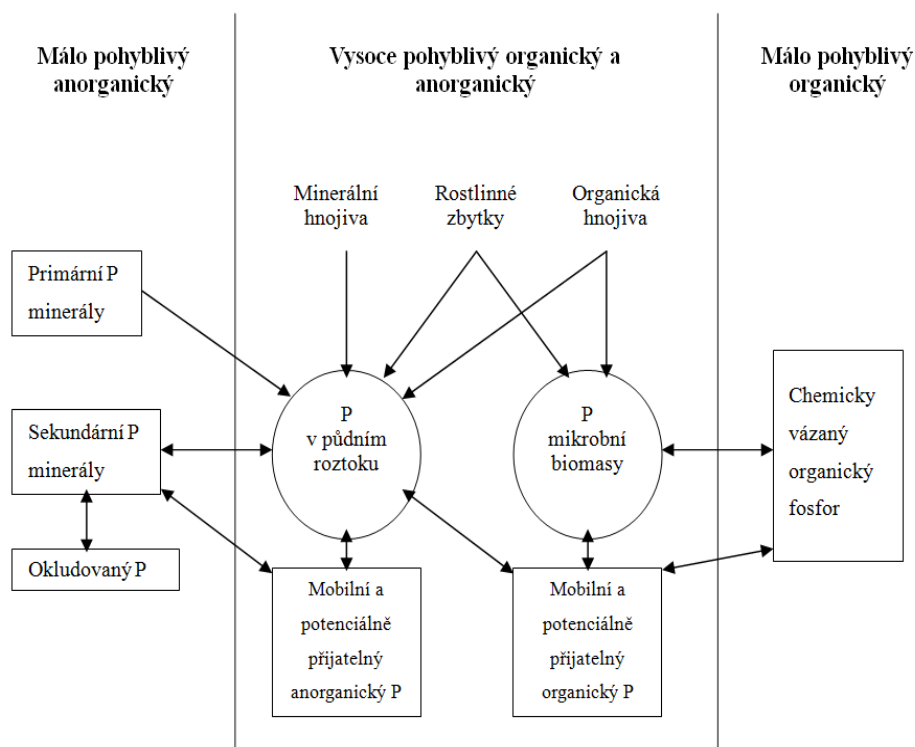
4.2.2 Koloběh fosforu v půdě

Mackey et Paytan (2009) uvádí, že cyklus fosforu v půdě suchozemského ekosystému je složen z části geochemické a části biologické. Tyto dva subcykly jsou propojeny fosforem rozpuštěným v půdním roztoku.

Cyklus fosforu nezahrnuje masivní přenos mezi vodními, suchozemskými ekosystémy a atmosférou, jak je tomu u koloběhů uhlíku a dusíku. Naproti tomu při cyklu fosforu hrají velmi důležitou roli mikroorganismy, ty samozřejmě zastupují svou roli i při cyklech uhlíku a

dusíku. Z velké části se podílejí na rozpouštění anorganických sloučenin fosforu a na mineralizaci organických sloučenin (Šimek, 2003). Koncentrace fosforu v půdních organismech je několikanásobně vyšší než v rostlinách. Průměrný obsah fosforu v rostlinách se pohybuje mezi hodnotami 0,05 - 0,7 % jejich hmotnosti (Mackey et Payton, 2009). Zatímco v mikrobiální biomase je v zastoupení 1 - 2 %. Díky dočasnému vázání fosforu na půdní sorpční komplex je v biomase mikroorganismů zamezováno ztrátám rozpouštěného fosforu vyplavením nebo imobilizací. Mikrobiální buňky mají poměrně rychlý životní cyklus (Vaněk *et al.*, 2012). Takových cyklů může nastat i několik desítek za rok. Po jejich odumření je relativně velké množství fosforu průběžně uvolňováno (Mackey et Payton, 2009). Uvolněný fosfor pak může být přijat rostlinami, dříve než je imobilizován nebo vyplaven. Z hlediska zásobení rostlin fosforem je tedy mikrobiální biomasa jeden z velmi významných zásobníků. Naproti tomu zásobník fosforu v podobě půdního roztoku neobsahuje vysokou koncentraci prvku. I přesto se jedná se o zásobník velmi významný (Ivanov *et al.*, 2012). Mikanová et Šimon (2011) ve své studii uvádějí, že při intenzivním růstu rostlin, a tím tedy při zvýšeném příjmu fosforu, se obsah prvku v půdním roztoku může obnovit 50 až 250 krát za den. Rostlinami i mikroorganismy odčerpaný fosfor je nepřetržitě nahrazován z jiných zásobníků fosforu v půdě, samozřejmě jsou-li k dispozici. Cyklus fosforu v půdě je graficky znázorněn na obrázku č. 1.

Obrázek č. 1: Cyklus P v půdě: komponenty a měřitelné frakce



(Sharpley a Menzel, 1987)

4.3 Fosfor v rostlinách

4.3.1 Význam fosforu v rostlinách

Fosfor je řazen mezi makrobiogenní prvky, a plní v rostlině mnoho důležitých funkcí (Pavlíková *et al.*, 2008). Je potřebný pro základní průběhy v metabolismu, a tedy velmi důležitý pro růst a vývoj rostlin. Stejně tak je nepostradatelným faktorem pro tvorbu výnosu. Fosfor se významně podílí na zakládání a tvorbě květů (Withers *et al.*, 2014). Dostatečné množství fosforu je předpokladem pro větší květenství, více květů a pro tvorbu semen. Rostliny, které jsou dobře zásobené fosforem, mají urychlený přechod do generativní fáze, dříve dozrávají a mají kratší vegetační období. Množství fosforu v obilninách během vegetace kolísá v rozmezí 0,3 až 0,4 % sušiny. V zrně je ukládán jako fytát se 6 atomy fosforu v molekule, jako draselnohořečnatá sůl kyseliny fytové s vysokou afinitou k zinku a železa (Vaněk *et al.*, 2007). Tímto způsobem navázaný fosfor tvoří v obilném zrně až 60-70 % celkového fosforu, v otrubách se pohybuje obsah až okolo 85 %. Zmíněné sloučeniny jsou u obilnin soustředěny zejména v aleuronové vrstvě, ve fázi klíčení se rozkládají a fosfor i

příslušné kationty syntetizují organické látky v nových kořenech a listech (Vaněk *et al.*, 2012).

4.3.2 Příjem fosforu rostlinou

Fosfor je rostlinami přijímán po celou dobu vegetace ve formě H_2PO_4^- a HPO_4^{2-} . Příjem fosforu je aktivní proces, který potřebuje dostatečné množství energie, jejíž zásobárnou je makroergická vazba v ATP. Nejvíce je fosfor potřeba, a zároveň je zaznamenána nejvyšší spotřeba v době kvetení a zrání plodů. Více jak 50 % přijatého fosforu se kumuluje v semenech a plodech (Withers *et al.*, 2014). Pro dostatečný příjem fosforu je důležitý rozvoj kořenové soustavy. Pro lepší příjem není až tak důležitá délka kořene, jako kořenové vlášení. Některé rostliny v případě deficitu fosforu, rozvíjí svou kořenovou soustavu na úkor nadzemní biomasy, aby zajistily co největší příjem fosforu (Vaněk *et al.*, 2012).

Pro příjem fosforu je důležitá dostatečná vlhkost, rozmezí pH mezi 5,5 až 7,0 dle půdního druhu, dostatečné množství organických látek, a v neposlední řadě dostatek přijatelného P v půdě (Richter, 1999).

Získaný minerální fosfor je okamžitě zabudován do organických sloučenin a převeden do míst, kde je ho nejvíce třeba tj. mladé listy, vegetační vrcholy, následně semena a květy. Kyselina fosforečná lehko reaguje s organickými látkami a výsledkem je vznik organofosfátů. Organofosfáty jsou zejména estery glycerolů a cukrů. Mezi nejvýznamnější se řadí nukleotidy, jelikož to jsou složky organismů a zastávají v nich důležité funkce (Vaněk *et al.*, 2007). Nukleotidy tvoří základní stavební jednotky nukleových kyselin. Jsou tedy molekulovým základem pro genetický kód a podílí se na přenosu genetické informace. Další funkcí nukleotidů je aktivace meziproductů v řadě biosyntéz např. aminokyseliny při syntéze bílkovin. Nukleosidpolyfosfáty jsou převodníky energie v biologických systémech (Šimek, 2003). Mezi nejzásadnější se řadí adenosintrifosfát neboli taky ATP, který je základním kamenem pro chemické energie v biologickém systému. Adenosinové nukleotidy jsou součástí kofaktorů enzymů. Mezi nejznámější patří NADP^+ a FAD, jedná se o nebilkovinné části enzymů, které přenášejí atomy či elektrony při biochemických reakcích a následně je katalyzují (Mackey et Payton, 2009).

Z výše uvedených organických fosforečných sloučenin je tedy zřejmé, že fosfor je nedílnou součástí pro biochemické reakce přenos energie. V případě, že je fosforu v rostlině nedostatek, jsou narušeny důležité funkce a probíhající procesy (McGechan et Lewis, 2002).

4.3.3 Nadbytek a nedostatek P v rostlině

Je všeobecně známé, že při **nedostatku fosforu** přecházejí rostliny dříve do generativní fáze, rychleji dozrávají, a tím pádem mají kratší vegetační období. Fosfor je rostlinami přijímán během celé vegetace poměrně rovnoměrně. Nejdůležitější je ale příjem mladými rostlinami, což je předpoklad pro dobý výnos kvalitní produkci. U pšenice ozimé je uváděná koncentrace fosforu v sušině na počátku vegetace v rozmezí 0,4 až 0,6 % (Baier *et al.*, 1988). V dalších stadiích je zaznamenáván v hodnotách 0,3 až 0,4%. V případě snížení fosforu v rostlinách pod hodnotu 0,2 % v sušině se projevují známky nedostatku P. Nároky na fosfor se u jednotlivých rostlin významným způsobem neliší. Odběry fosforu při sklizních se odvíjí dle výnosu, avšak pohybují se v rozmezí 20-40 kg P/ha (Vaněk *et al.*, 2007).

Za běžných podmínek při nedostatku P nejsou pozorovány výrazné změny. Celkově není nedostatek fosforu u rostlin častý. Jedná se spíše o tzv. latentní nedostatek. Latentní nedostatek znamená, že se neprojevují viditelné změny přímo na rostlinách (Mackey et Payton, 2009). Avšak, jak již bylo zmíněno výše, fosfor se podílí na biologických procesech a základních funkcích rostlin, proto při jeho nedostatku tyto funkce řádně neprobíhají. Jeho příjem je ztížený chladným a suchým počasím. Je-li fosfor v nedostupný pro rostlinu delší dobu, začíná se jeho nedostatek projevovat vnějšími příznaky. Nejen u pšenice ozimé listy bývají malé a starší pozvolna začínají odumírat. Může dojít k hyperchlorofylaci listu, která se projevuje černo-fialovým. Postupně přechází z listů na báze stonků. Stébla jsou krátká a slabě vyvinutá U obilnin má nedostatek P vliv na odnožování, a je omezena tvorba a růst kořene (Vaněk *et al.*, 2007).

Odstranit nedostatek fosforu během vegetace je obtížné. Jak již bylo zmíněno hnojení na povrch půdy není až tak účinné. Ani mimokořenová aplikace se neshledává s velkým úspěchem, jelikož fosfor pomalu proniká povrchem listů. K této aplikaci se doporučuje dle Vaněk *et al.* (2012) použít jako hnojivo Amofos či kapalná hnojiva Fostim, protože ta kromě fosforu obsahují i dusík. Aby aplikace proběhla účinně, měla by být zopakována po 14 dnech. Dobrým opatřením při zjištění nedostatku fosforu během vegetace rostlin může být závlaha. Ta je prováděna v případě, že viníkem nedostatku fosforu je dlouhodobé sucho. Tímto lze vyřešit zlepšení příjmu nejen fosforu, ale i jiných živin.

Větší možnosti v odstranění nedostatku fosforu nastávají až po sklizni rostlin. Nabízí se možnost upravit půdní vlastnosti, které zabraňují přijatelnosti P. Mezi nevhodné vlastnosti patří kyselá pH půdy, to lze odstranit pomocí vápnění. Dále se nabízí možnost zvýšení podílu

organické hmoty, toho lze dosáhnout díky hnojení statkovými hnojivy, můžeme zakomponovat i zelené hnojení. V neposlední řadě sem patří i hnojení fosforečnými hnojivy a jejich následné zapravení do celé orniční vrstvy. Nejčastěji užívaný je superfosfát. Nabízí se také možnost aplikovat hnojivo spolu s výsevem. Takto aplikované hnojivo se zapravuje asi 5 cm pod výsev a 5 cm do strany. Pro tuto techniku je užívána speciální secí technologie (Šimek, 2003).

Nadbytek fosforu v rostlinách je ojedinělý, a setkáváme se s ním zřídka. Ten je způsoben velmi dobrou sorpcí fosforu do půdy, jeho množství není tak velké, aby přecházel ve vyšších koncentracích do půdního roztoku (Vaněk *et al.*, 2007). Ze zahraničních publikací je zřejmé, že se obsah fosforu pohybuje v mnohonásobně vyšších koncentracích. Množství fosforu je zde zvýšené především díky vyššímu podílu organického fosforu, který je do půdy aplikován spolu se statkovými hnojivy. Jelikož se v zahraničí potýkají s větším počtem dobytčích jednotek na ha (Jiang *et al.*, 2006). Symptomy značící přebytek P se neprojevují na rostlinách rostoucích na středních a těžších půdách, z důvodu vysoké schopnosti poutat fosforečnany. Přesto je i v našich podmínkách zaznamenán přebytek fosforu důsledkem vysoké dávky fosforečných hnojiv při melioračním hnojení. Vysoké dávky fosforu mohou způsobit špatné přijímání některých kovů. Může se tedy stát, že rostlina bude trpět nedostatkem např. zinku (Vaněk *et al.*, 2007).

4.4 Hnojení fosforem

Jak vyplývá z výše uvedených kapitol, fosfor je oprávněně zařazen mezi nepostradatelné a velmi významné stavební živiny pro výživu rostlin. Výživa rostlin je závislá na obsahu přijatelného fosforu v půdách. V dnešní době dochází k poklesu hnojení statkovými hnojivy, je vyvíjena snaha na nahrazení hnoje jinými organickými hnojivy, které se mají obdobné vlastnosti (Černý *et al.*, 2009). Dlouhotrvající nedostatek v užívání fosforečných hnojiv se projeví na zvýšeném odčerpávání fosforu z půdy, tímto je snižována její úrodnost. Hnojení fosforem by mělo probíhat tak, aby nedocházelo k jeho deficitu v půdě, a aby nebyla ohrožena produkce rostlin (Kunzová, 2009). Aplikace veškerých hnojiv na půdu promrzlou více jak na 8 cm, přesycenou vodou či pokrytou sněhem více jak 5 cm, je zakázána (Vaněk *et al.*, 2007).

4.4.1 Hnojení chlévským hnojem

Chlévský hnůj je řazen mezi tzv. statková hnojiva, což jsou materiály vyznačující se živočišným původem a vznikající jako sekundární produkt živočišné výroby. Chlévská mrva je složena ze steliva, tuhých a tekutých výkalů hospodářských zvířat spolu se zbytky krmiva (Richter et Římovský, 1996).

Chlévský hnůj je vyráběn fermentací chlévské mrvy. Jedná se o náročný biologicko-chemický proces, při němž dochází ke kvašení, tlení a hnití mrvy. Tímto způsobem jsou komponenty rozkládány transformovány na látky s kvalitnějším složením (Vaněk *et al.*, 2007). O nejvyšší intenzitě rozkladu organických látek rozhoduje přístup vzduchu, teplota a vlhkost prostředí. Jedná se tedy o proces probíhající za aerobních podmínek, a díky tomu probíhá rychleji, přičemž dochází ke ztrátám (Nest *et al.*, 2015). Pro co nejmenší množství ztrát, je k dispozici několik technologií, které slouží k zušlechťování chlévské mrvy a k výrobě hnoje. Jedná se způsob horkou či studenou cestou. Prioritou je uchování maximálního množství organických látek, a zároveň snaha o uchování co největšího množství živin (Richter et Hlušek, 1994). Vyráběný hnůj je možné zkvalitnit přidáním fosforu. Hnojivo je vhodné přidávat při naskladnění mrvy na hnojiště v množství cca 10 až 20 kg fosforečného hnojiva na 1tunu mrvy (Vaněk *et al.*, 2007).

Optimální dávku chlévského hnoje není možné přesně definovat, především se odvíjí od potřeb pěstované rostliny a půdních vlastností. Na orné půdě a půdách lehčích se doporučuje hnojení v menších dávkách v intervalu kratších cyklů. Naopak na půdách těžších se doporučuje aplikace vyšších dávek hnoje (Nest *et al.*, 2015). Richter et Římovský (1996) uvádějí, že optimální dávka se pohybuje v rozmezí od 9 - 40 t hnoje na hektar. U obilnin je jako optimální dávka udáváno 20 t hnoje na hektar. Pro co nejlepší využití hnoje je důležité rozmetání a zapravení do půdy, které by dle současných předpisů mělo nastat do 48 hodin. Aplikace na pozemek je ideální 1 krát mezi 3 až 5 lety. Hnojení by mělo být prováděno na podzim (Vaněk *et al.*, 2012).

Dodání hnoje velmi příznivě ovlivňuje půdní vlastnosti, zejména pak zlepšuje retenční schopnost, díky níž půda lépe vyživá fosfor. Společně se statkovými hnojivy do půdy pronikají koloidní částice, ty mají možnost fosfor dočasně poutat (Agbenin et Igbokwe, 2006). Vazby, které takto vznikají, jsou poměrně nestabilní, a proto se fosfor stává lehce přístupný pro rostliny. Další pozitivum vazeb je omezení prosakování fosforečnanů do povrchových vod, kde nejsou žádoucí (McGechan et Lewis, 2002). Aplikací hnoje dodáváme

do půdy organické látky, díky kterým se půdní fosfor stává mobilnějším, díky němu vzniká energie, která je nezbytná pro cyklus živin v půdě. Organická hmota je v půdě velmi důležitá, jelikož ji obohacuje o půdní mikroorganismy, které mají též pozitivní vliv na zpřístupnění živin (Agbenin et Igbokwe, 2006). Další výhodou aplikace hnoje je uváděna nižší sorpce fosforu, díky které se využitelnost fosforu rostlinami zvyšuje. Pro zlepšení půdní úrodnosti je dobré hledat i jiná opatření, jako například zaorání slámy či použití zeleného hnojení (Barzegar *et al.*, 2002).

4.4.2 Hnojení minerálními hnojivy

Zemědělskou činností jsou odčerpávány potřebné živiny z půdy, a tímto způsobem jsou exportovány z cyklu živin exportu živin. Ke ztrátám dochází zejména při sklizních, vyplavování do hlubších vrstev půdy, erozí a při sorpci (McGechan et Lewis, 2002). Průmyslovými hnojivy lze exportované živiny do půdy zpět vrátit. Provedení této akce je nutné, jelikož pouze živiny z primárních minerálů nebo humusu nejsou dostatečné pro zajištění množství živin, které je nutné pro výživu pěstovaných plodin (Richter et Hlušek, 1994). V případě vyčerpávání živin, se kterým souvisí i snížení výnosu, je snížen i přísun potravin obyvatelstvu. Což se neshoduje se stále se navyšujícími nároky. Taková situace si žádá obohacení organických hnojiv o hnojení za použití minerálních živin (Richter et Římovský, 1996).

První účelné použití fosforečných hnojiv zaznamenáváme již od druhé poloviny 18. století. Prvním zdrojem fosforu pro hnojení byly používány namleté a zpopelněné kosti. Pro velký úspěch započala následná výroba průmyslových hnojiv, datována k roku 1853. Padesátá léta 20. století popisují změny ve výrobě průmyslových hnojiv, a jejich velmi zvýšenou aplikaci na ornou půdu. Základní přísadou pro výrobu fosforečných hnojiv byly zejména přírodní fosfáty, jako je apatit a fosforit (Sharpley *et al.*, 2003).

Většinou se jedná o výrobky chemického průmyslu, podobně jako u velkého množství minerálních hnojiv, přesto jejich výrobu zahrnuje nejen odvětví zemědělství, ale i stavební a hutnické odvětví. Stetardně se vyznačují zvýšeným obsahem živin. Minerální hnojiva mohou být jedno či vícesložková, a jsou vyráběna převážně z fosfátů (Vaněk *et al.*, 2007).

Při správném aplikování a užívání minerálních hnojiv se setkáváme s mnoha pozitivními vlivy. Pozitiva jsou zaznamenána u výživy a výnosu pěstovaných rostlin i po nich následných pěstovaných plodin, jelikož je zvýšen obsah přístupných živin. Samozřejmě jsou pozitivní výsledky zaznamenány i v úrodnosti půdy. Proto je podporována výroba statkových

hnojiv. Jelikož je dosahováno vyšší sklizně, je umožněn rozvoj živočišné výroby. Aplikace průmyslových hnojiv se odráží ve výsledcích zvýšené odolnosti plodin, na dobré jakosti a trvanlivosti produktů při jejich skladování (Richter et Hlušek, 1994).

Jen málo sloučenin fosforu je v půdě jen zcela rozpustných, a z toho důvodu je nutná aplikace minerálních hnojiv, aby bylo dosaženo vyšších výnosů. Naopak při jejich dlouhodobém užívání se mohou projevit negativní účinky (Vaněk *et al.*, 2007). Může nastat zvýšené okyselení půdy, což působí zhoršený příjem fosforu rostlinami. Přesto, že hnojení NPK hnojivy může zvýšit výnos, nesmí být opomenuta hrozba eutrofizace povrchových vod (Sharpley *et al.*, 2003).

4.5 Hnojení za použití čistírenských kalů

Další možností, jak lze do půdy dostat fosfát pro hnojení rostlin, je použití upravených kalů z čistíren odpadních vod. Aplikací čistírenských kalů získává půda poměrně velké množství fosforu. V současné době se jedná o efektivnější způsob využití vzniklých odpadů, nežli je jejich likvidace. S odpadní vodou putuje do kanalizací velké zastoupení fosfátů, které je následně možné upravovat a použít dále jako hnojivo s velkým množstvím organických látek. Díky recyklaci fosforu z odpadních vod jsou pozitivně snižovány emise fosforu putující do povrchových vod (Raclavská, 2007).

Základním požadavkem pro užití kalu v zemědělství je jeho užitek, a zároveň nesmí negativně ovlivnit ekosystém. Prospěšnost kalů pro agronomii spočívá v přítomnosti živin, organických látek, stopových prvků a v některých případech i vápna. Z ekonomického hlediska se jedná o významné nahrazení anorganických hnojiv a přínos organické hmoty (Catroux *et al.*, 1981).

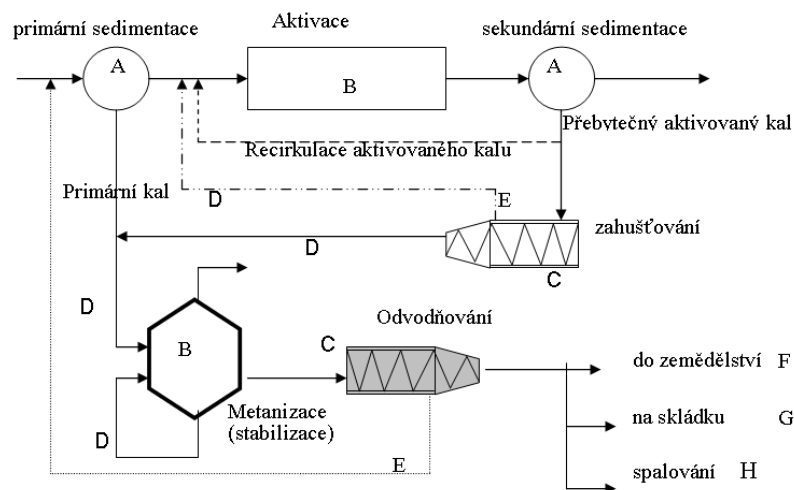
Cameron *et al.* (1997) ve své publikaci popisuje, že po aplikaci kalů na zemědělskou půdu je pozorována výrazně zvýšená produkce, a současně jsou zlepšeny i fyzikální a chemické vlastnosti půdy. Průmyslové či komunální kaly však mohou obsahovat těžké kovy, toxické látky, nebo patogeny, v takovém případě je důležité omezení aplikace kalů. Proto je jejich obsah limitován v legislativě (Matějů et Zimová, 2002). Riziko kalů pro podzemní či povrchové vody může také spočívat v obsahu dusičnanů a fosfátů (Cameron *et al.*, 1997).

Kal vzniká v zařízení čističek odpadních vod při procesu čištění. Čistírenské kaly jsou složitou heterogenní suspenzí, která je složena z organických a anorganických látek,

vzniklých za technologických procesů čištění odpadní vody (Kolář et Kužel, 2000). V odpadech z čištění se vyskytuje 50 – 80 % původního znečištění odpadní vody a v objemu čištěných vod jsou zastoupeny asi v rozmezí 1-2. Koncentrace kalu je vyjádřena jako obsah sušiny kalu, v jednotkách v g/l nebo % (Raclavská, 2007). Složení a sušina se odvíjí od způsobu a míry znečištění odpadních vod, a dále pak od provedení procesů, které se k čištění užíly. Množství vyprodukovaných kalů z ČOV závisí na množství znečištění odpadních vod, na zvoleném způsobu čištění, určitou roli hraje i typ kanalizace. (Dohányos, 2006).

Kaly z ČOV jsou zdrojem zejména organických vázaných živin, avšak jejich nutriční hodnota pro plodiny se může významně lišit. Díky kalům jsou zajišťovány krátkodobé vstupy přístupných živin pro plodiny, dále podporují aktivitu půdních mikroorganismů, a v neposlední řadě podporují dlouhodobé udržení živin a organické hmoty v půdě (Warman et Termeer, 2005). Složení živin, které se následně podílí na výživě rostlin, se odvíjí od původu kalu, a je důležité jeho zpracování před použitím na ornou půdu (Raclavská, 2007). Schéma běžné čistírny odpadních vod s kalovým hospodářstvím je znázorněno na obrázku č. 2.

Obrázek č. 2: Základní schéma čistírny odpadních vod s kalovým hospodářstvím



(Dohányos, 2006)

Výhody zemědělského využití odpadních kalů jsou následující:

- Získání užitečných živin obsažených v kalech (dusík a fosfor),

- získání užitečných organických látek přispívá ke zlepšení humusového podílu půdy,
- výhoda regulace aplikace.

Nevýhody zemědělského využití odpadních kalů:

- Vysoké náklady na skladování, jelikož aplikace kalu je možná jen několikrát do roka,
- závislost aplikace na uživatelích a na administrativních dohodách,
- nedostatečné znalosti o obsahu organických toxických a patogenních organismů v kalech.

4.5.1 Legislativa pro používání kalů na zemědělské půdě

Legislativa jednotlivých zemí Evropské unie a USA se při použití kalů v zemědělství výrazně liší. V Dánsku, Švédsku, Nizozemí, Švýcarsku a v USA je množství živin aplikovaných na zemědělskou půdu legislativně limitováno. Ve Finsku, Německu, Irsku, Itálii a Španělsku je omezení na množství sušiny. Ve Velké Británii a ve Francii se legislativa zaobírá obsahem těžkých kovů. V některých zemích je legislativa tak přísná, že je možné užívat velmi malé množství kalů pro zemědělské účely (Raclavská, 2007).

V České republice se legislativou ohledně problematiky aplikace kalů z čistíren odpadních vod na zemědělskou půdu, jejich úpravou a dalšími otázkami zabývá vyhláška ministerstva životního prostředí č. 382/2001 Sb., o podmínkách použití upravených kalů na zemědělské půdě, která je součástí zákona o odpadech č. 185/2001 sb. Vyhláška je platná od 1. ledna 2002. V zákoně o odpadech nalezneme definici kalu obecně a kalu stabilizovaného. Vyhláška č. 382/2001 Sb., o podmínkách použití upravených kalů na zemědělské půdě, stanovuje mezní hodnoty koncentrací vybraných rizikových prvků a látek v kalu aby byly dodrženy tak, jak stanovuje tabulka č. 1. Na zemědělskou půdu lze aplikovat kal, který splňuje mezní hodnoty koncentrací vybraných rizikových prvků a odpovídá mikrobiologickým kritériím, popsaným ve vyhlášce. Zákon č. 185/2001 Sb., o odpadech popisuje upravený kal jako kal, který byl upravován biologickým, chemickým nebo tepelným procesem. Dále za upravený kal považujeme takový kal, který po dlouhodobém skladování nebo jakémkoliv jiném vhodném procesu, sníží obsah patogenních mikroorganismů v kalech, a tím také zdravotní riziko hrozící po jejich aplikaci.

V tabulkách č. 1 a 2 jsou zaznamenány maximální povolené koncentrace rizikových látek a mikrobiologická kritéria pro užití čistírenského kalu na zemědělské půdě.

Tabulka č. 1: Mezní hodnoty koncentrací vybraných rizikových prvků a látek v kalech určených pro aplikaci na zemědělskou půdu dle vyhlášky č. 382/2001 Sb., o podmínkách použití upravených kalů na zemědělské půdě.

Riziková látka	Mezní (maximální) hodnoty koncentrací v kalech
As - arzén	30
Cd - kadmium	5
Cr - chrom	200
Cu - měď	500
Hg - rtuť	4
Ni - nikl	100
Pb - olovo	200
Zn - zinek	2500
AOX	500
PCB (suma 6 kongenerů - 28+52+101+138+153+180)	0,6

(Vyhláška 382/2001 Sb., <http://www.zakonyprolidi.cz>)

Tabulka č. 2: Mikrobiologická kritéria pro použití kalů na zemědělské půdě

Kategorie kalů	Připustné množství mikroorganismů (KTJ*) v 1 gramu sušiny aplikovaných kalů		
	Termotolerantní koliformní bakterie	Enterokoky	Salmonella sp.
I.	< 10 E3	< 10 E3	negativní nález
II.	10 E3 -10E6	10 E3 -10E	nestanovuje se

(Vyhláška 382/2001 Sb., <http://www.zakonyprolidi.cz>)

V případě, že kaly z ČOV stanovené limity nesplňují, mohou se v souladu se zákonem o odpadech a vyhláškou č. 383/2001 Sb., o podrobnostech nakládání s odpady ve znění vyhlášky 294/2005 Sb., o ukládání odpadů na skládky a jejich využívání na povrchu terénu, přepracovat jako biologicky rozložitelný odpad, a dále mohou být použity pro rekultivační účely, nebo uloženy na povrch terénu.

Do legislativy v rámci EU, upravující nakládání s kaly, řadíme směrnice 86/278/EHS, o ochraně životního prostředí a zejména půdy při používání kalů z ČOV v zemědělství. Dále směrnici 91/271/EHS, o čištění městských odpadních vod a směrnici 31/99/ES o skládkování odpadů. Nařízení Rady a Evropského parlamentu č. 1774/2002, kterým se stanoví hygienické pravidla pro vedlejší produkty živočišné výroby, které nejsou určeny ke spotřebě.

4.5.2 Složení a úprava kalu

Mezi hlavní vlastnosti kalu patří konzistence. Konzistence je úzce spjata s celkovým obsahem tuhých složek v kapalině, tzv. obsahem sušiny v kalu. V kalu je obsažena prostorová voda, kterou lze oddělit sedimentací, dále pak voda relativně pevně vázaná v kalu, kterou je možné separovat v odstředivce. Sušina se pohybuje do 10 %, a toto množství se odvíjí od charakteru kalových částic. Neznamená tedy, že mají-li dva kaly stejné zastoupení sušiny, že mají i stejnou konzistenci (Raclavská, 2007).

Sušina je složena z 60 až 70 % organických látek a 30 až 40 % anorganických látek. Pevná fáze kalu obsahuje asi 80 % suspendovaných částic o rozměru nad 0,1 mm, a asi 20 % částic o rozměru pod 0,1 mm (Kyncl *et al.*, 2007). Průměrné množství a složení závisí na místních podmínkách, a proto se od sebe liší. Z větší části se jedná o koloidní částice. Organická hmota v sušině váže a zadržuje velké množství vody, to působí zhoršené odvodňování kalů sedimentací, a může proto lehce dojít k zanešení filtračních plachetek (Helena *et al.*, 1998).

Produkce kalů z ČOV v roce 2014 z celé České republiky činí 159 162 tun sušiny (ČSÚ, 2014). Z mezinárodních dohod a závazků vyplývá, že v nejbližší době by měly být vybudovány čistírny odpadních vod ve všech obcích s více než 2 000 obyvateli, tento fakt samozřejmě ještě navýší produkci kalů.

Kaly se v čističkách odpadních vod usazují formou primárního kalu, ten je oddělován ze surové vody v usazovacích nádržích. Převážně má zrnitou strukturu, a je složen z nerozpuštěných látek, které prošly přes lapač písku a česlemi (Dohányos et Kutil, 2005). Dále kaly z ČOV sedimentují ve formě sekundárního neboli aktivovaného kalu, který je tvořen při biologickém stupni čištění. Je oddělován od vyčištěné vody v dosazovacích nádržích, vyznačuje se vločkovitou strukturou. Obě formy kalů jsou spojeny, a jednotně či společně se zahušťují před další fází zpracování. Spojený kal je nazýván jako surový kal (Dohányos et Zábranská, 2002).

Surový kal obsahuje asi 70 % organických látek v sušině (Černý *et al.*, 2009). Z důvodu, že může obsahovat patogenní mikroorganismy, je surový kal dle zákona o odpadech 185/2001 Sb. definován jako nebezpečný odpad. A proto je z pravidla na všech linkách ČOV, kde je kal zpracováván, použita taková technologie zpracování, která přetváří surový kal na stabilizovaný během procesu biologické stabilizace (Kyncl *et al.*, 2007). Ta probíhá nejčastěji za anaerobních podmínek (Černý *et al.*, 2009). Stabilizovaný kal již není označován jako nebezpečný odpad. Stabilizovaný kal je naopak doporučován k aplikaci na zemědělskou půdu díky svým vhodným vlastnostem (Dohányos *et al.*, 2005).

Úpravy kalů jsou dle Dohányose (2006) rozděleny na primární a finální metody. Mezi primární metody se řadí separace, při které dochází k třídění materiálu podle kvality a následně jsou odděleny organické frakce od nevhodných k recyklaci např. plasty, sklo apod. Po separaci následuje předúprava probíhající chemicky, termicky nebo fyzikálně. Před dalším zpracováním je nutné kal zahustit a odvodnit, aby byla výsledná koncentrace kalu maximálně cca 40 %. Dalším krokem je desinfekce a hygienizace kalu. Při hygienizaci kalu jsou odstraňovány patogenní mikroorganismy. Kal je nutné biologicky stabilizovat, pomocí procesu methanizace - anaerobně, nebo provést aerobní proces kompostování. Mezi výsledné primární metody je řazeno vysušování kalů, při kterém je hlavním cílem zvýšení sušiny na 60 až 95 %.

Mezi finální metody se řadí kompostování, při němž je využíváno hnojivých vlastností čistírenských kalů. Do finálních metod je řazena i aplikace kalu na zemědělskou půdu, která je vhodná pro obohacení potřebnými živinami. Kal je možné stabilizovat chemicky, jednou z možností je vápnění. Kaly je také možné spalovat, zplyňovat nebo skládkovat (Appels *et al.*, 2008).

Skládkování a spalování je v současné době považováno za neudržitelnou formu nakládání s kaly z čistíren odpadních vod. Jako jeden z nejlepších způsobů využití se jeví aplikace na zemědělskou půdu. Metoda je nejlevnější, a je řešením problému v otázce ohledně vzniklého odpadu po čišťení. Kromě toho aplikace na půdu působí pozitivně na půdní vlastnosti a výnosy pěstovaných plodin. Je ovšem nutné dělat dlouhodobé rozborů půd, na které jsou kaly dodávány, jelikož je zde možný výskyt toxických prvků, které se mohou začít projevovat až po několika letech (Raclavská, 2007).

4.5.3 Podmínky pro užívání kalů

Kal může být aplikován na zemědělskou půdu, jen v případě, že je tak vyžadováno půdou či rostlinami. Zároveň se vylučuje ohrožení zdraví zvířat nebo osob, znečištění podzemních a povrchových vod, a narušení kvality půdy (VÚRV, 2000).

Kaly musí být zapraveny do půdy nejpozději v následujících 48 hodinách po jejich aplikaci. Nutnost takto dodaných živin do půdy musí být doložena výsledky rozborů agrochemických vlastností půd. Dle vyhlášky č. 382/2001 Sb., o podmínkách použití upravených kalů na zemědělské půdě, lze aplikovat upravené kaly na zemědělskou půdu v případě, že jsou dodrženy následující podmínky:

- nesmí být použito více než 5 tun sušiny kalů na 1 hektar v průběhu po sobě jdoucích tří let,
- v případě, že aplikované kaly obsahují méně než polovinu mezní hodnoty každé ze sledovaných rizikových látek a prvků, může být množství aplikovaných kalů zvýšené na 10 t sušiny v průběhu po sobě jdoucích pěti let,
- přesná dávka sušiny pro aplikaci se vypočte z obsahu dusíku. Dávka dusíku dodaného aplikací kalu nesmí být více jak 70 % celkového potřebného množství dusíku pro danou plodinu.

4.6 Hnojení pšenice ozimé

Pšenice ozimá je nejrozšířenější plodinou v České republice. Pšenice je přizpůsobivá nejrůznějším přírodním podmínkám, ale nejvyšší kvality je dosaženo v teplých oblastech. Důležitými faktory, díky kterým je dosaženo kvalitní sklizně patří: vysoká půdní úrodnost, kde je důležitý obsah přijatelných živin zejména P, K, Mg v půdě. Ozimou pšenici řadíme mezi plodiny se střední potřebou živin. Na 1 tunu zrna a odpovídající množství slámy a kořenů odčerpá v průměru 25 kg dusíku, 5 kg fosforu, 20 kg draslíku, 2,4 kg hořčíku, 4 kg síry. Druhým faktorem je vysazení vhodné předplodiny, ideálně bobovité čeledi. A v neposlední řadě je velmi důležitá správná výživa rostlin. Správnou výživu zajistíme živinami dodanými hnojením, zejména dusíkatými hnojivy (Vaněk *et al.*, 2007).

Cílem výživy a hnojení je vytvoření co nejlepších podmínek pro růst a vývoj plodin takovým způsobem, aby bylo dosaženo optimálního výnosu při požadované kvalitě produktu.

Podíl odebraného dusíku na podzim nepřekračuje 10 % z celkového odběru, z tohoto důvodu není nutná aplikace vysoké dávky dusíku před setím. Zvýšený odběr dusíku je zaznamenáván na jaře, jelikož plodiny po zimním období musí obnovovat biomasu. Využití dusíku pro tvorbu zrna negativně ovlivňují nízké obsahy fosforu, draslíku, hořčíku a síry (Scherer, 2001).

Torma (2007) uvádí, že při zakládání porostů pšenice ozimé je nutné provést základní hnojení fosforem a jinými hnojivy. Své uplatnění má i dohnojení hořčíkem či přihnojení sírou. Přihnojování sírou nabývá svého významu zejména v případě, že zapravujeme do půdního profilu zvýšené množství slamnatých posklizňových zbytků. Pro podporu rozkladu slámy je nutné dodávat do půdy též dusík. Obecně je dáno, že na 1 tunu slamnatých zbytků z obilnin je aplikováno 8-10 kg dusíku. Předplodina a následně i její zbytky mají vliv na půdu a půdní strukturu, dále na biologickou aktivitu a fyzikální poměry, především pak ovlivňují živinný režim v půdě (Zimolka *et al.*, 2005).

Hnojení dusíkem

Postupným dodáváním dusíkatých hnojiv je podporován i příjem ostatních živin. Díky stupňujícím dávkám dusíku je pozvolna zvyšováno množství bílkovin a technologická jakost zrna. Pšenice ozimá přijímá N od začátku růstu až po jeho ukončení, tzn. do její sklizně. A proto je důležité provádět aplikaci dusíku dle fáze vývoje, ve které se obilnina právě nachází, a ne najednou. Z hlediska časové aplikace je možné hnojení dusíkem rozdělit na hnojení základní a přihnojování během vegetace (Torma, 2007).

Hnojení draslíkem a hořčíkem

Draslík má přímý vliv na enzymy fotosyntézy a tvorbu proteinů, je tedy důležitým článkem pro docílení dobré kvality. Optimální zásoba K je předpokladem pro lepší využití dusíku v plodinách, draslík také způsobuje nárůst obsahu bílkovin a zlepšení sedimentace. Dále má vliv na pevnost buněčných stěn a zvyšuje odolnost proti poléhání (Vaněk *et al.*, 2007, Knapowski *et al.*, 2015). Hořčík je významný pro aktivaci četných enzymových systémů. Je součástí chlorofylu a ovlivňuje enzymové reakce, a proto je významný v procesu fotosyntézy. V Calvinově cyklu zaujímá funkci fixace CO₂ v organických sloučeninách až do vzniku glukosy. Při nedostatku K a Mg klesá intenzita proteosyntézy a narůstá množství aminokyselin a amidů, tímto způsobem je následně snížena i kvalita pšenice ozimé (Jaskulska *et al.*, 2015).

Hnojení fosforem

Fosfor sehrává podstatnou roli v energetickém metabolismu, a právě pšenice je velmi citlivá na jeho nedostatek. Fosfor má výrazný vliv na proces fotosyntézy, dělení buněk, a také na syntézu proteinů a lipidů. Množství P vysoce koreluje s výnosem zrna a schopností rostliny přezimovat (Vaněk *et al.*, 2007). Během vegetace se fosfor výrazně podílí na intenzitě a rozsahu asimilace dusíku. Jeho význam se odráží především v prvním období růstu, protože je zvyšována odolnost vůči vymrzání, a dále se fosfor podílí na tvorbě kořenového systému. Kladně působí během všech fází růstu (Šimek, 2003).

Základní hnojení fosforem, draslíkem a hořčíkem by se mělo provádět již při předseťové přípravě. Doporučená dávka při aplikaci dusíku je 30 kg N.ha^{-1} a odvíjí se od stavu pozemku a množství minerálního dusíku v půdě. Množství P, K, Mg hnojiva je určeno na základě plánovaného výnosu zrna, měl by být brán ohled na živiny v půdě, a také na živiny, které se do půdy vrací spolu s posklizňovými zbytky. Dávku hnojiva lze stanovit pomocí součinu odběrového normativu na 1 tunu produkce zrna a předpokládaného výnosu (Vaněk *et al.*, 2007).

5 Metodika

Experiment byl založen na pokusných stanicích ČZU a VÚRV v.v.i. Ruzyně v roce 1996. Jedná se o stanoviště s různými půdně-klimatickými podmínkami (Humpolec, Hněvčeves a Suchdol). Půdně-klimatické charakteristiky jsou patrné z tabulky č. 3. Na parcelách byly pěstovány v tříhonném osevním sledu tyto plodiny: brambory, ozimá pšenice a jarní ječmen (odrůdy jsou uvedeny v tabulce č. 4).

Tabulka č. 3: Základní charakteristika pokusných stanovišť

Stanoviště	Humpolec	Suchdol	Hněvčeves
Severní šířka	49°33'15"	50°07'40"	50°18'46"
Východní délka	15°21'02"	14°22'33"	15°43'01"
Nadmořská výška (m n. m.)	525	286	265
Průměrná roční teplota (°C)	7	9,1	8,2
Průměrný roční úhrn srážek (mm)	665	495	573
Půdní typ	kambizem	černozem	hnědozem
Půdní druh	hlinitopísčité	hlinitá	jílovitohlinitá
pH ¹⁾	5,1	7,5	5,9
P (mg/kg) ²⁾	77 (±10)	74 (±9)	87 (±11)
K (mg/kg) ²⁾	238 (±47)	209 (±18)	214 (±29)
Ca (mg/kg) ²⁾	1625 (±187)	7803 (±1760)	2156 (±251)
Mg (mg/kg) ²⁾	112 (±14)	209 (±16)	240 (±24)

¹⁾ Stanoveny 0.01 mol/l CaCl₂, 1:10 w/v

²⁾ Průměrné základní hodnoty stanovené metodou Mehlich 3 (rok 1996)

Tabulka č. 4: Přehled odrůd pěstovaných v dlouhodobých pokusech

Rok	Humpolec a Suchdol			Hněvčeves		
	Brambory	Pšenice	Ječmen	Brambory	Pšenice	Ječmen
1997	Karin	Samanta	Akcent	Karin	Samanta	Akcent
1998	Karin	Samanta	Akcent	Karin	Samanta	Akcent
1999	Karin	Samanta	Akcent	Karin	Samanta	Akcent
2000	Cordoba	Alana	Akcent	Cordoba	Alana	Akcent
2001	Cordoba	Alana	Akcent	Cordoba	Alana	Akcent
2002	Cordoba	Alana	Akcent	Cordoba	Alana	Akcent
2003	Cordoba	Alana	Akcent	Cordoba	Alana	Akcent
2004	Cordoba	Alana	Akcent	Cordoba	Alana	Akcent
2005	Cordoba	Alana	Calgary	Cordoba	Alana	Akcent
2006	Dita	Alana	Calgary	Ditta	Alana	Jersey
2007	Dita	Alana	Calgary	Ditta	Alana	Jersey
2008	Dita	Alana	Calgary	Ditta	Alana	Jersey
2009	Dita	Alana	Calgary	Ditta	Alana	Calgary
2010	Dita	Alana	Calgary	Ditta	Alana	Calgary
2011	Dita	Alana	Calgary	Ditta	Alana	Calgary
2012	Dita	Alana	Xanadu	Ditta	Alana	Xanadu
2013	Dita	Alana	Xanadu	Ditta	Alana	Xanadu
2014	Dita	Alana	Xanadu	Ditta	Alana	Xanadu

Organickými hnojivy je hnojeno pouze k první plodině v osevním sledu, proto je u brambor sledováno přímé působení aplikace organických hnojiv, u ozimé pšenice a jarního ječmene působení následné. Dávky fosforu v hnojivech u jednotlivých variant jsou uvedeny v tabulce č. 5. Pro potřeby pokusu jsou používány čistírenské kaly z Ústřední čistírny odpadních vod Praha Trója. Živiny z průmyslových hnojiv jsou dodávány v LAV (27,5 %), trojitým superfosfátu (21 % P) a 60 % draselné soli (50 % K).

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

Tabulka č. 5: Systém hnojení polního pokusu ČZU (množství dodaných živin na 1 ha)

Varianta	Brambory	Ozimá pšenice	Jarní ječmen
Kontrola	0	0	0
Kal 1	330 kg N 240 kg P	0	0
Hnůj 1	330 kg N 70 kg P	0	0
NPK*	120 kg N	140 kg N	70 kg N
	30 kg P	30 kg P	30 kg P
	100 kg K	100 kg K	100 kg K

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

Odběr vzorků je prováděn každoročně. Na podzim po sklizni obilnin a brambor byl vždy proveden odběr ornice (0-30 cm). Ta byla usušena a přeseťa přes síto s velikostí otvorů 2 mm. Pro potřeby diplomové práce byly k analýzám využity archivní vzorky půdy z roku 1996 (před založením pokusu) a půdy odebrané po sklizni pšenice ozimé z každého ukončení cyklu osevního postupu, tj. z let 1999, 2002, 2005, 2008, 2011 a 2014.

5.1 Analytická stanovení

Extrakce demineralizovanou vodou

Extrakty byly zhotoveny dle Luscombe *et al.* (1979). K 10 g vzorku bylo doplněno 50 ml demineralizované vody. Vzorky byly třepány 2 hodiny a následně filtrovány. Vzniklé extrakty byly analyzovány.

Obsah fosforu stanovený metodou Mehlich 3

Ke stanovení obsahu přístupného fosforu byl použit extrakční roztok Mehlich 3 (Mehlich, 1984) složený z CH_3COOH (0,2 mol/l), NH_4F ($c=0,015$ mol/l), HNO_3 ($c=0,013$ mol/l), NH_4NO_3 ($c=0,25$ mol/l) a EDTA ($c=0,001$ mol/l). Poměr zeminy a vyluhovadla činil 1:10 (10g zeminy, 100 ml vyluhovadla). Třepání na třepačce VWR®Advanced 15000 Orbital Shaker probíhalo po dobu 10 min. Získaný roztok byl filtrován (filtrační papíry č. 388). Pro vyloučení chyby měření byly extrakty zhotoveny ve dvou opakováních.

Stanovení obsahu reziduálního fosforu lučavkou královskou

Postup byl proveden dle normy EN 13346 (2000). Do 250 ml tub pro digesce (fa Gerhardt, Německo) byly naváženy 3 g půdního vzorku. Vzorky byly vždy zvlhčeny malým množstvím demineralizované vody a po přilítí 21 ml koncentrované HCl a 7 ml koncentrované HNO₃ byly po dobu minimálně 16 hodin ponechány v klidu. Následně proběhla digesce ve spalovacím bloku (Gerhardt, Německo) při teplotě 110 °C po dobu 2 hodin. Vzorky byly následně přefiltrovány do 100 ml odměrných baněk a doplněny na objem pomocí 1,5% HNO₃.

Měření obsahu fosforu ve výluhu

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

Hodnocení výnosů ozimé pšenice

Po každé sklizni pokusů jsou vždy zaznamenány hektarové výnosy pěstovaných plodin. Pro účely této práce bude u sledovaných variant hodnocen vývoj výnosů pšenice ozimé od roku 1996 do roku 2015.

6 Výsledky

V této části je diplomová práce zaměřena na hodnocení výsledků frakcí fosforu. Jsou hodnoceny změny vodorozpustného fosforu z vodného výluhu, mobilního fosforu za pomoci metody Mehlich 3 a změny obsahu reziduálního fosforu z výluhu lučavkou královskou. Všechny 3 frakce fosforu jsou hodnoceny samostatně. Hodnocení je provedeno u změn obsahů frakcí během pokusu, dále budou porovnány korelace jednotlivých metod a výnosy pšenice ozimé po aplikaci různých hnojiv. Změny množství fosforu jsou pozorovány po dobu 18-ti let, tedy 6-ti osevních cyklů. Výsledky jsou znázorněny pomocí tabulek a grafů.

6.1 Vývoj různých frakcí fosforu v půdě a výnosy pšenice v závislosti na hnojení v daných lokalitách

Pokus byl založen v roce 1996 na všech třech stanovištích. V tabulce č. 6 jsou zaznamenány některé naměřené hodnoty fosforu v mg/kg sušiny půdy před založením pokusu. Změny budou pozorovány u vodorozpustného, přístupného a reziduálního fosforu. V roce 1996 se hodnoty vodorozpustného P na stanovišti Suchdol pohybovaly v rozmezí 2,5 – 6,4 mg P/kg, na stanovišti Humpolec v roce 1996 byl zaznamenán obsah fosforu v rozmezí 2,7 – 8,8 mg P/kg. Nejvyšší hodnoty byly naměřeny na stanovišti Hněvčeves. Množství se pohybovalo mezi hodnotami 6,1 – 11,1 mg P/kg.

Ve stejném roce se hodnoty přístupného P na stanovišti Suchdol pohybovaly v rozmezí 59 - 91 mg P/kg. V Humpolci byly v roce 1996 zaznamenány obsahy fosforu v hodnotách mezi 59 – 89 mg P/kg. Nejvyšší hodnoty byly naměřeny na pokusném stanovišti Hněvčeves, kde se množství pohybovalo mezi hodnotami 70 – 105 mg P/kg.

Před založením dlouhodobého pokusu v roce 1996 byl také měřen obsah reziduálního fosforu na všech stanovištích. Na Suchdole bylo jeho množství naměřeno v rozmezí hodnot 578 – 697 mg P/kg. Na stanovišti Humpolec se reziduální fosfor pohyboval mezi 570 – 651 mg P/kg. Naopak nejnižší hodnoty byly naměřeny na stanovišti Hněvčeves v hodnotách mezi 462 – 633 mg P/kg. Další měření reziduálního P probíhaly v letech 2005 a 2014.

Tabulka č. 6: Množství jednotlivých forem fosforu na jednotlivých stanovištích v roce 1996

	HUMPOLEC	SUCHDOL	HNĚVČEVES
	mg P/kg	mg P/kg	mg P/kg
vodorozpustný P	5	5,2	9,6
	2,7	2,5	6,1
	8,8	6,4	11,1
	7,5	4,4	8,5
přístupný P	59	59	79
	89	70	105
	76	91	70
	60	77	94
reziduální P	570	578	633
	614	610	462
	623	697	508
	651	642	539

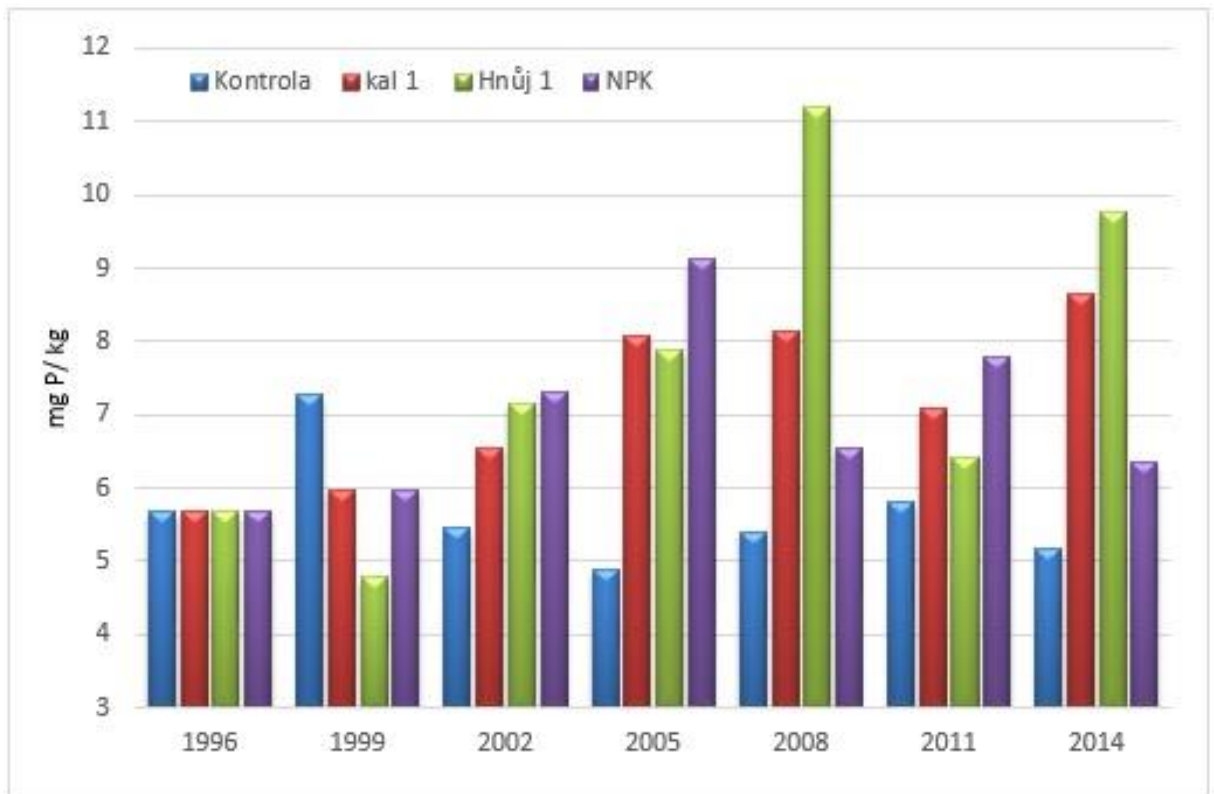
Výnosy pšenice ozimé byly sledovány od roku 1997. Nehnojená, kontrolní varianta je v grafech znázorněna jako 100 %, a byly hodnoceny jednotlivé procentické změny u ostatních variant hnojení.

6.1.1 Stanoviště Humpolec

Vodorozpustný fosfor

Graf č. 1 znázorňuje obsah vodorozpustného fosforu v letech 1996 - 2014 na stanovišti Humpolec. Před založením pokusu byla naměřena průměrná hodnota fosforu na stanovišti 5,7 mg P/kg. Nejvyšší množství fosforu u nehnojené varianty bylo zaznamenáno v roce 1999, kde obsah P překročil výsledky všech hnojených variant. Nejnižší obsah P u nehnojené varianty byl v roce 2005. Množství fosforu po aplikaci hnoje se v roce 1999 snížilo oproti nehnojené variantě v roce 1996. Největší rozdíly v obsahu P po aplikaci hnoje byly naměřeny mezi lety 2008 a 2011, kdy množství pokleslo cca o polovinu. Z grafu lze vyčíst, že hnojení kaly se jeví jako nejstabilnější, jelikož nejsou viditelné výrazné výkyvy mezi jednotlivými roky, a zároveň je zde téměř vždy pozorovatelné zvýšení oproti kontrolní nehnojené variantě.

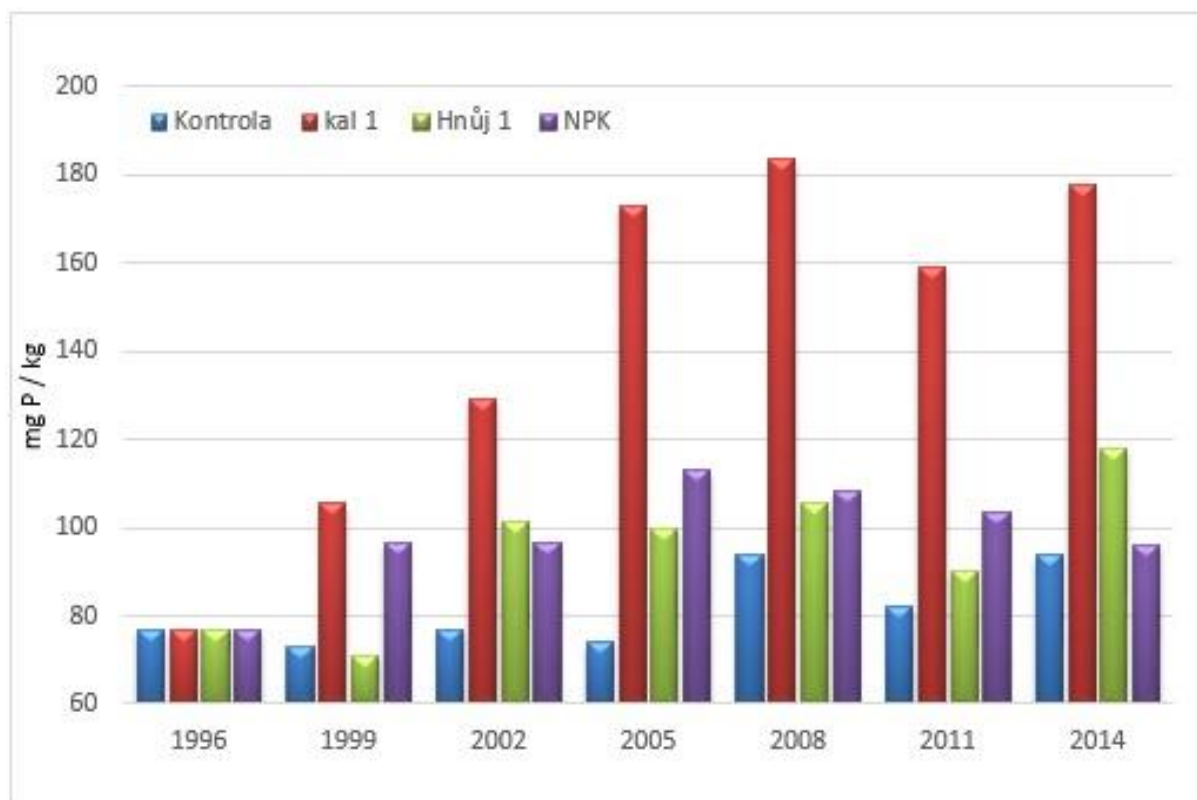
Graf č. 1: Množství vodorozpuštěného fosforu v půdě při různých systémech hnojení v letech 1996 - 2014 na stanovišti Humpolec



Přístupný fosfor

Graf č. 2 znázorňuje obsah mobilního fosforu v letech 1996 - 2014 v Humpolci. Před založením pokusu byla naměřená průměrná hodnota fosforu 76,9 mg P/kg. Zvýšení obsahu přístupného fosforu oproti kontrolnímu roku 1996 bylo dle grafu č. 2 docíleno především hnojením čistírenským kalem. Nejvyšší podíl mobilního fosforu byl dosažen při hnojení kalem v roce 2008 (184 mg P/kg). Lze tedy jednoznačně vyvodit, že hnojení kaly má pozitivní vliv na obsah mobilního fosforu v půdě. Průměrné množství fosforu po aplikaci čistírenských kalů v letech 1999 – 2014 činí 155 mg P/kg. Varianta, kde je aplikován hnůj neprokázala ve srovnání s čistírenskými kaly tak jednoznačný nárůst. Z grafu č. 2 je možné vidět, že do roku 2008 se trend obsahu fosforu u varianty hnůj mírně zvyšoval. Nejvyšší hodnota zde byla zaznamenána v roce 2014 (118 mg P/kg). Hnojení NPK dosahovalo podobných výsledků jako hnojení hnojem. U nehnojených variant bylo vždy dosaženo obsahů nižších než 100 mg P/kg.

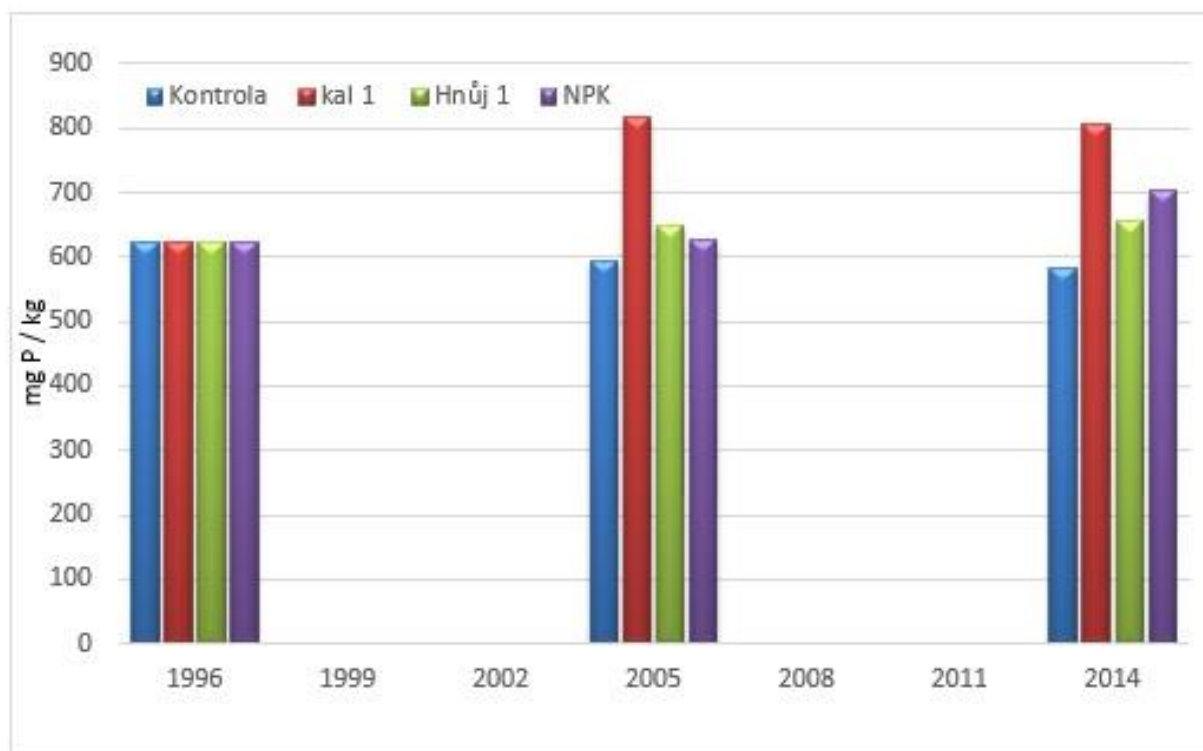
Graf č. 2: Množství přístupného fosforu v půdě při různých systémech hnojení v letech 1996 - 2014 na stanovišti Humpolec



Reziduální fosfor

Z grafu č. 3 lze vyčíst, že množství reziduálního fosforu, který byl zjištěn pomocí výluhu lučavkou královskou, se v jednotlivých letech výrazně nelišilo. Největší nárůst obsahu byl zaznamenán po aplikaci čistírenských kalů. Hodnoty se v roce 2008 a 2014 pohybovaly až okolo 800 mg P/kg. Varianta hnojení minerálními hnojivy mírně vzrostla mezi roky 2008 a 2014. U varianty hnojené hnojem se obsah reziduálního fosforu v průběhu pokusu výrazně neměnil. U nehnojených variant rovněž nebyla zaznamenána téměř žádná změna.

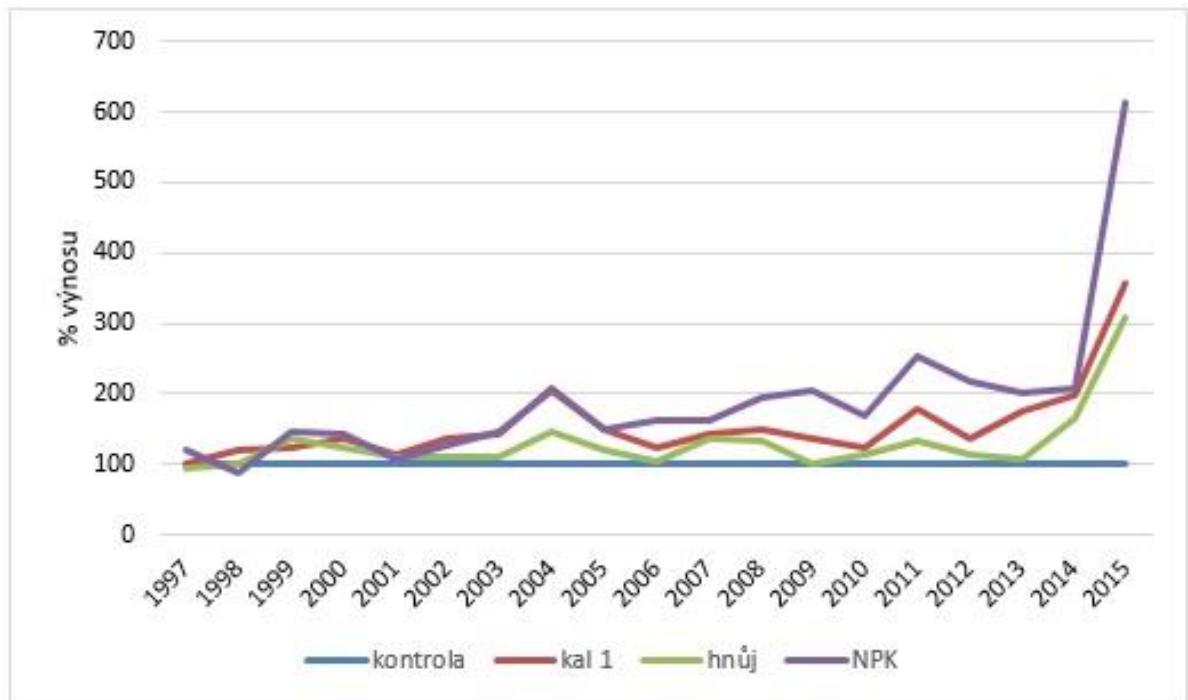
Graf č. 3: Množství reziduálního fosforu v půdě při různých systémech hnojení v letech 1996, 2005 a 2014 na stanovišti Humpolec



Výnosy pšenice ozimé

V grafu č. 4 jsou znázorněny výnosy pšenice ozimé od roku 1997. Kontrolní varianta znázorňuje 100 %. Z grafu lze vyčíst, že všechny systémy hnojení vykazovaly lepší výsledky než nehnojená varianta. Nejlepších výnosů bylo prokazatelně dosaženo po aplikování minerálního hnojení, výnosy po hnojení NPK výrazně narůstaly. V roce 2015 vzrostl výnos pšenice dokonce na 613 %. Druhou nejlepším variantou pro výnos se projevilo hnojení čistírenskými kaly, kdy nejvyššího navýšení výnosů na 358 % bylo dosaženo rovněž v roce 2015. Aplikování hnoje se projevilo ze všech systémů hnojení z hlediska výnosů pšenice nejhůře. Nejvyšší nárůst výnosů po aplikování hnoje byl 308 %, též v roce 2015. Nicméně do roku 2014 aplikace hnoje neprojevovala tak vysoký vliv na výnos jako hnojení kaly a zejména NPK.

Graf č. 4: Výnosy ozimé pšenice po aplikaci variant hnojení v letech 1996- 2015 pro stanoviště Humpolec

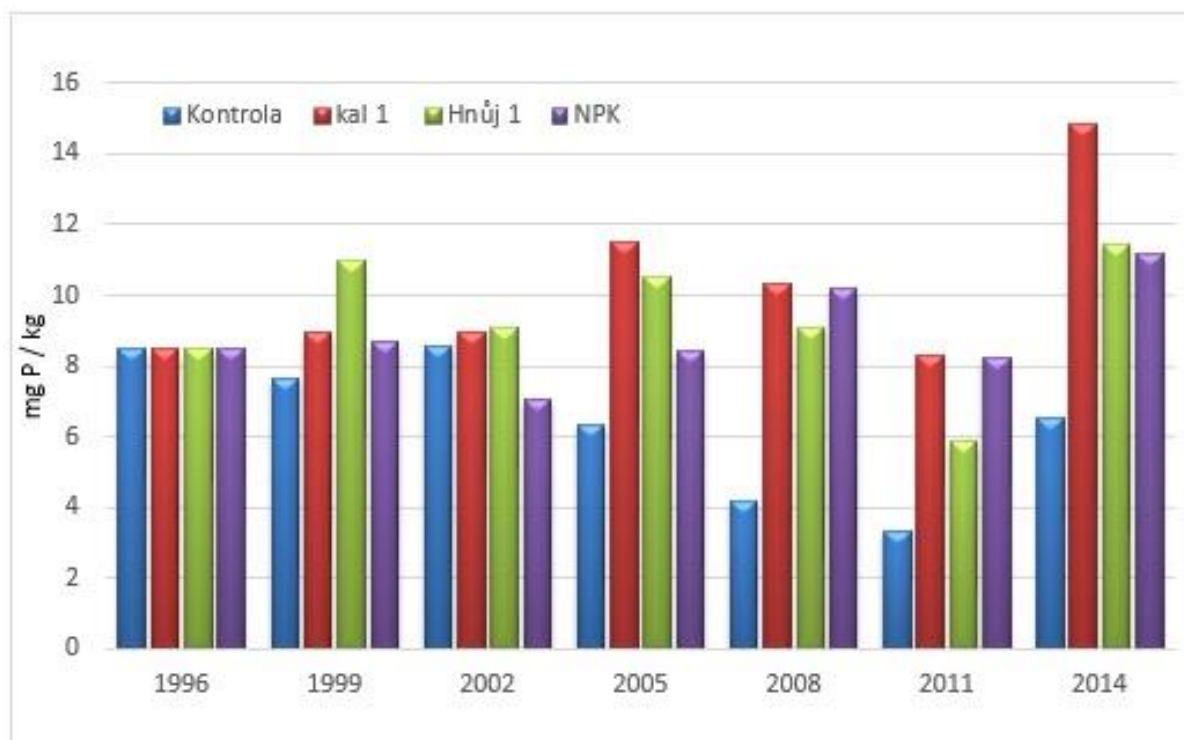


6.1.2 Stanoviště Hněvčeves

Vodorozpustný fosfor

Graf č. 5 znázorňuje obsah vodorozpustného fosforu v letech 1996 - 2014 na stanovišti Hněvčeves. V roce 1996, před založením pokusu na stanovišti byla naměřena průměrná hodnota vodorozpustného fosforu 8,5 mg P/kg. Nejvyšší množství fosforu u nehnojené varianty bylo zaznamenáno v roce 2002. V tomto roce obsah P u kontrolní varianty překročil množství fosforu po aplikování NPK, naopak s ostatními variantami hnojení byl jeho obsah srovnatelný. V následujících letech množství fosforu u nehnojené varianty klesalo. V roce 2014 se obsah P u všech variant oproti roku 2011 zvýšil. Nejvyšších hodnot bylo dosaženo u varianty hnojené čistírenskými kaly v roce 2014 (14,8 mg P/kg), ostatní varianty dosahovaly hodnot 11 mg P/kg. Na kontrolních variantách je zřetelný postupný pokles obsahu mobilního P v půdě. U hnojených variant jsou tendence zpravidla vzestupné. Nejvyšších hodnot bylo téměř vždy dosaženo u varianty hnojené čistírenskými kaly. Poté následovala varianta hnojená hnojem a varianta NPK.

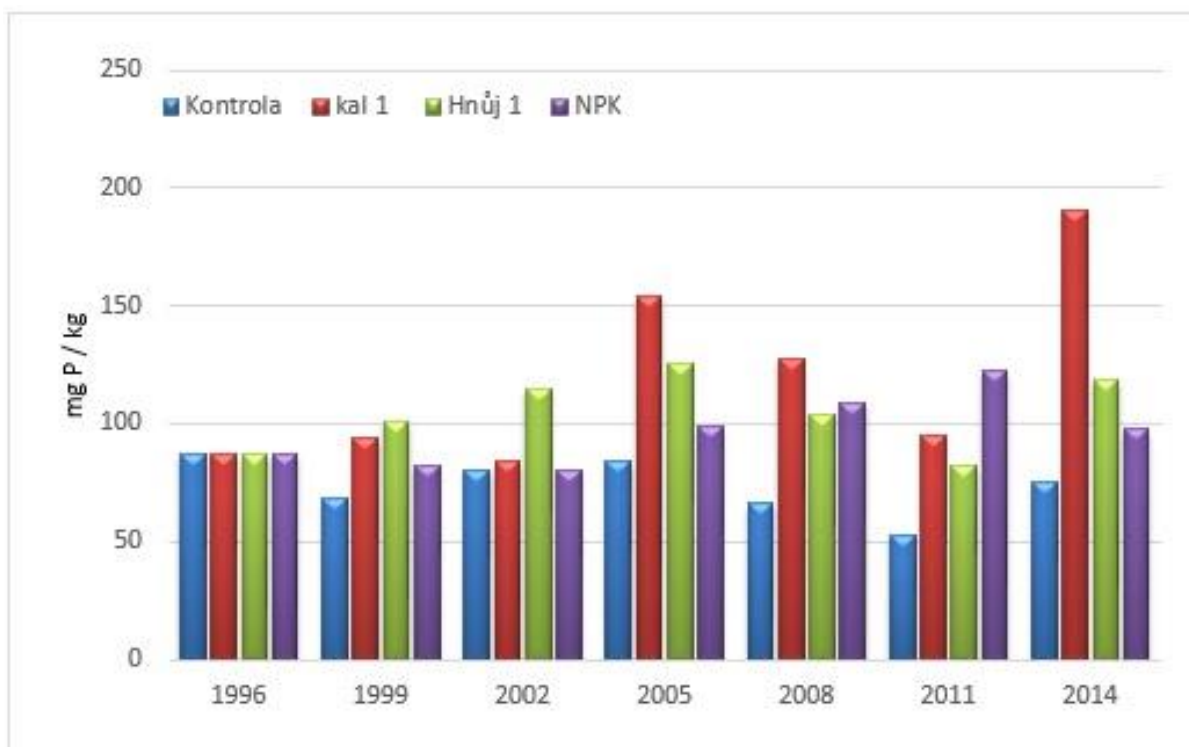
Graf č. 5: Množství vodorozpustného fosforu v půdě při různých systémech hnojení v letech 1996 - 2014 na stanovišti Hněvčeves



Přístupný fosfor

V grafu č. 6 jsou znázorněny obsahy mobilního fosforu mezi roky 1996 - 2014 na stanovišti Hněvčeves. Před založením pokusu byla naměřena průměrná hodnota fosforu 87,3 mg P/ kg. Zvýšení obsahu přístupného fosforu oproti kontrolnímu roku 1996 bylo dle grafu č. 6 docíleno hnojením kalem a hnojem. Nejvyšší podíl mobilního fosforu byl dosažen při hnojení kalem v roce 2014 (191 mg P/kg). Průměrné množství fosforu po aplikaci čistírenských kalů v letech 1999 – 2014 činí 125 mg P/ kg a u hnojení hnojem 108 mg P/kg. Průměrné množství fosforu po aplikaci NPK bylo 97 mg P/kg. Výsledky nehnojených variant dosahovaly v dalších letech vždy nižších obsahů než při vstupním měření, množství P se pohybovalo do 90 mg P/kg.

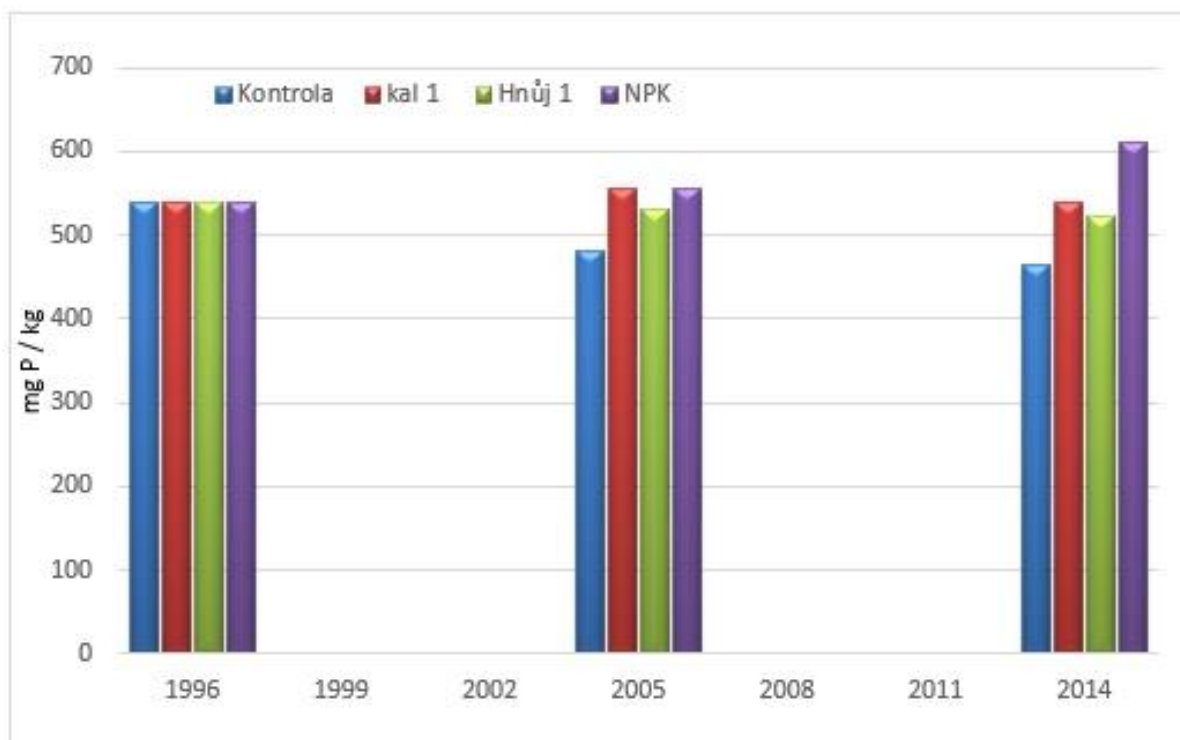
Graf č. 6: Množství přístupného fosforu v půdě při různých systémech hnojení v letech 1996 - 2014 na stanovišti Hněvčeves



Reziduální fosfor

Z grafu č. 7 je patrné, že množství reziduálního fosforu, který byl zjištěn pomocí výluhu lučavkou královskou, se v jednotlivých letech výrazně nelišilo. Největší nárůst obsahu je patrný po aplikaci varianty NPK, kdy v roce 2014 bylo dosaženo výsledku přes 600 mg P/kg. U kontrolní varianty se množství reziduálního fosforu v průběhu pokusu snižovalo. U variant hnojení hnojem a kaly se obsah fosforu výrazně neměnil. Mezi lety 2005 a 2014 zde došlo pouze k mírnému poklesu.

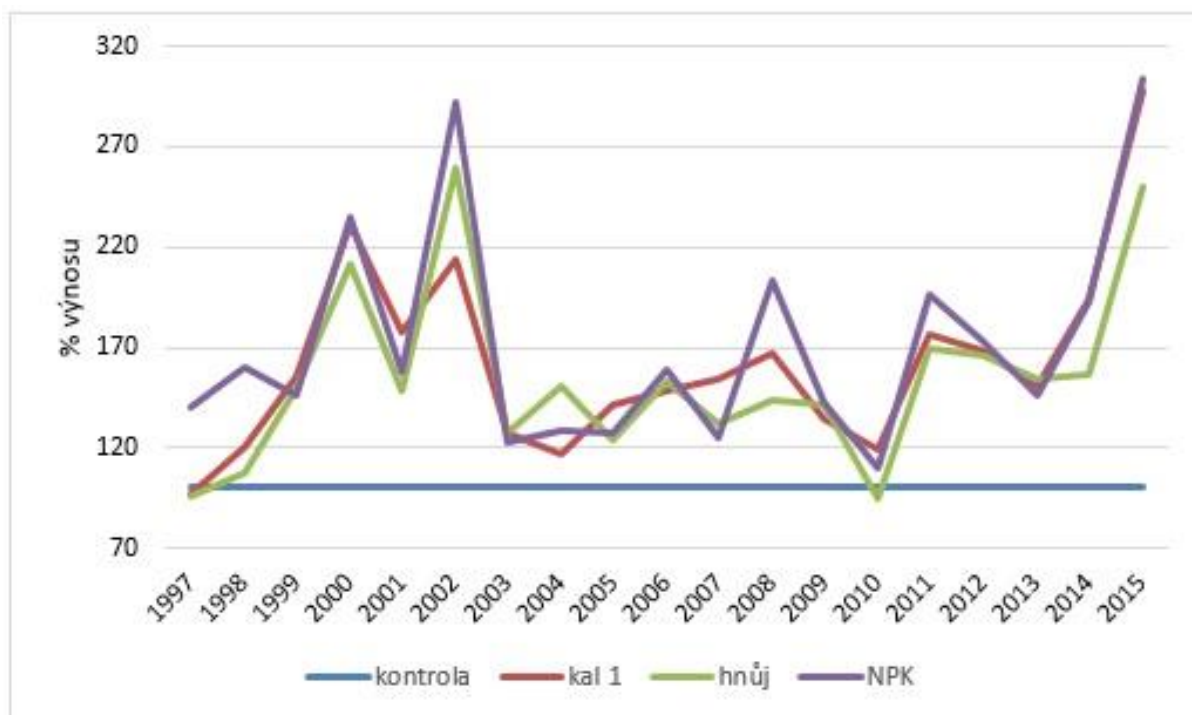
Graf č. 7: Množství reziduálního fosforu v půdě při různých systémech hnojení v letech 1996, 2005 a 2014 na stanovišti Hněvčeves



Výnosy pšenice ozimé

V grafu č. 8 jsou znázorněny výnosy pšenice ozimé od roku 1997 na stanovišti Hněvčeves. Kontrolní, nehnojená varianta znázorňuje 100 %. Z grafu lze vyčíst, že nejvyšších procentuálních nárůstů bylo dosaženo po aplikaci NPK, následně po aplikaci kalů a nejnižšího nárůstu bylo dosaženo po aplikaci hnoje. Nejvyšší nárůst výnosů byl zaznamenán po aplikaci NPK, nejvyšší hodnota 303 % byla naměřena v roce 2015, ve stejném roce bylo dosaženo 292 % nárůstu po aplikování kalů a 250 % po použití hnoje. Nejnižší hodnoty 95,5 % bylo dosaženo v roce 1997 po aplikaci hnoje.

Graf č. 8: Výnosy ozimé pšenice po aplikaci variant hnojení v letech 1996- 2015 na stanovišti Hněvčeves

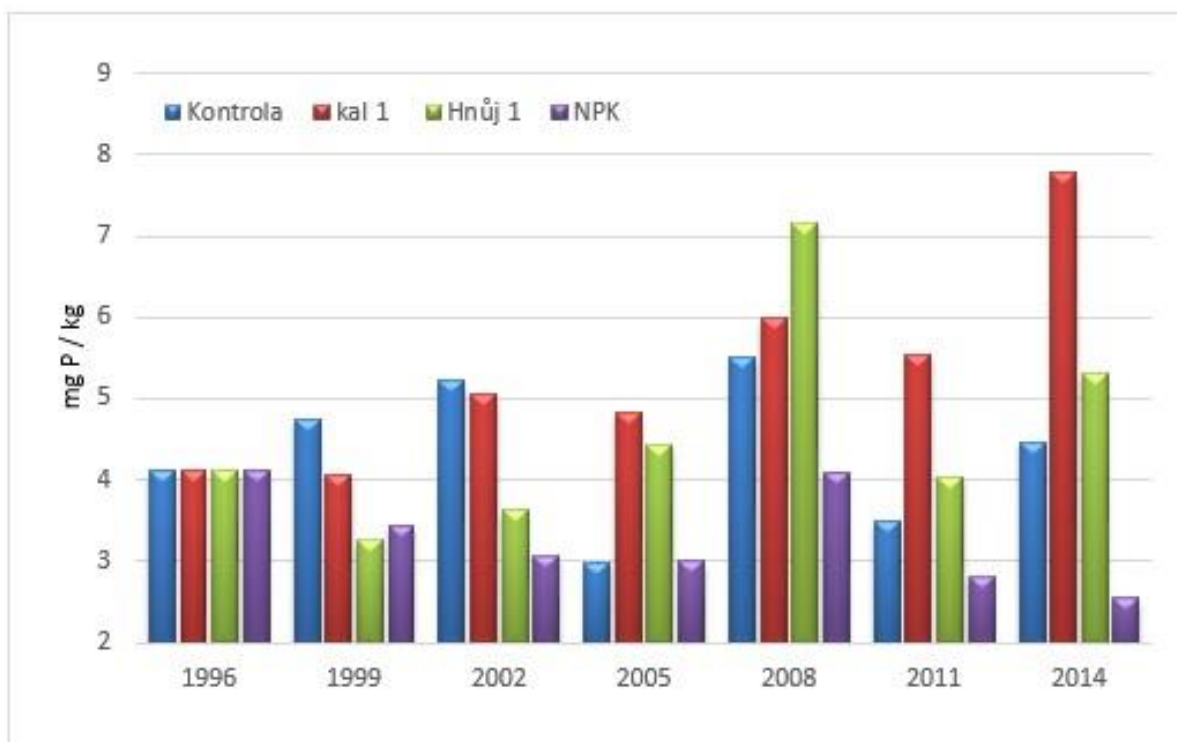


6.1.3 Stanoviště Suchdol

Vodorozpustný fosfor

V grafu č. 9 jsou znázorněny hodnoty obsahů vodorozpustného fosforu v letech 1996 - 2014 na stanovišti Suchdol. Před založením pokusu na stanovišti činila průměrná hodnota vodorozpustného fosforu 4,1 mg P/kg. Nejvyšší množství fosforu u nehnojené varianty bylo zaznamenáno v roce 2002. V tomto roce byly výsledky nehnojené varianty vyšší než u variant hnojených. V následujících letech pak množství fosforu u nehnojené varianty nepřekročilo množství hnojených variant. Z grafu č. 9 je rovněž patrné, že nejstabilnější pozitivní efekt byl zjištěn u varianty hnojené čistírenskými kaly. Hnojení NPK vedlo k výraznému snížení obsahu vodorozpustného fosforu v půdě. V průběhu všech let byly u tohoto systému hnojení naměřeny nižší hodnoty než u kontrolní varianty. To bylo pravděpodobně způsobeno nejvyššími výnosy pšenice u této varianty a tedy pravděpodobně i nejvyšším odběrem P.

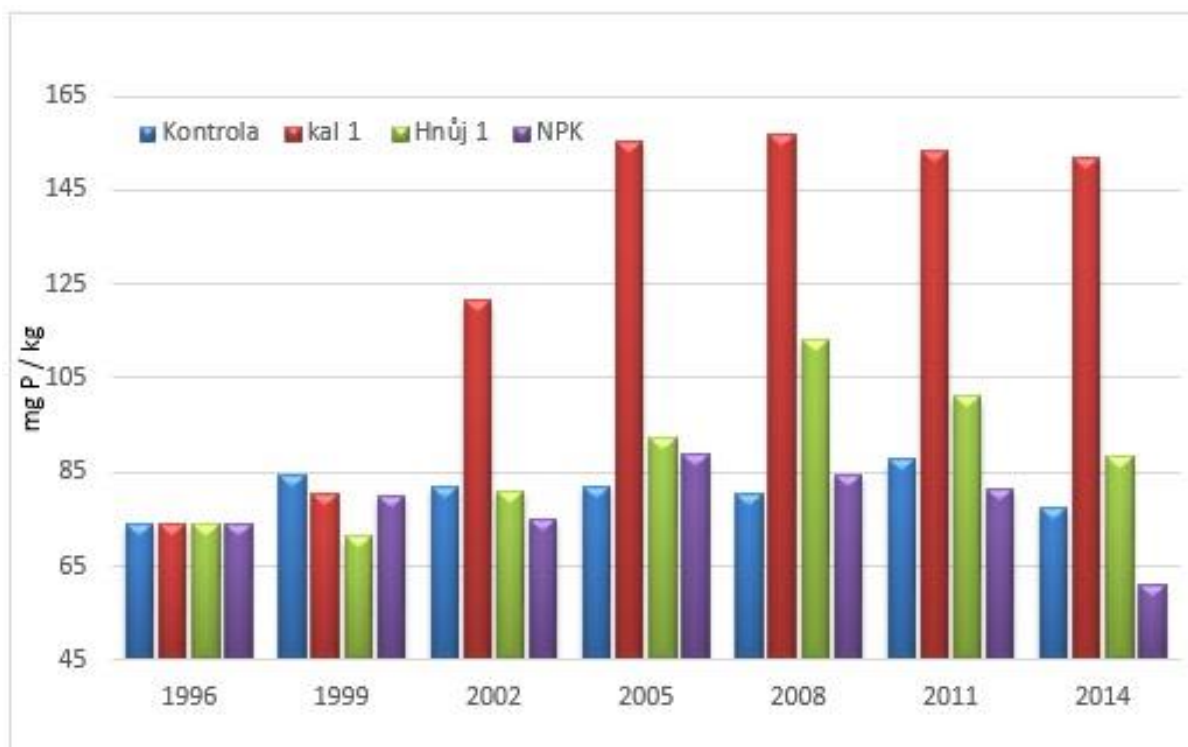
Graf č. 9: Množství vodorozpuštěného fosforu v půdě při různých systémech hnojení v letech 1996 - 2014 pro stanoviště Suchdol



Přístupný fosfor

V grafu č. 10 je vidět, že byla před založením pokusu na stanovišti Suchdol naměřena průměrná hodnota 74,1 mg/kg fosforu. Od roku 2002 bylo zvýšení obsahu přístupného fosforu docíleno zejména díky hnojení čistírenskými kaly. Nejvyšší podíl mobilního fosforu byl naměřen při hnojení kalem v roce 2008 (157 mg P/kg). Z výsledků vyplývá, že hnojení kaly mělo pozitivní vliv na obsah mobilního fosforu v půdě. Průměrné množství fosforu po aplikaci čistírenských kalů v letech 1999 – 2014 činí 136 mg P/kg. Druhých nejvyšších výsledků dosahovala varianta hnojená hnojem, při které došlo k výraznějšímu nárůstu zejména v roce 2008. Systém hnojení NPK byl během let vyrovnaný, výjimku tvoří rok 2014, kdy množství P v půdě takto hnojené varianty výrazně poklesl, a to až na 61 mg P/kg. Nehnojená varianta vykazovala velmi podobné výsledky jako hnojení pomocí NPK, avšak výsledky byly po všechny sledované roky vyrovnané.

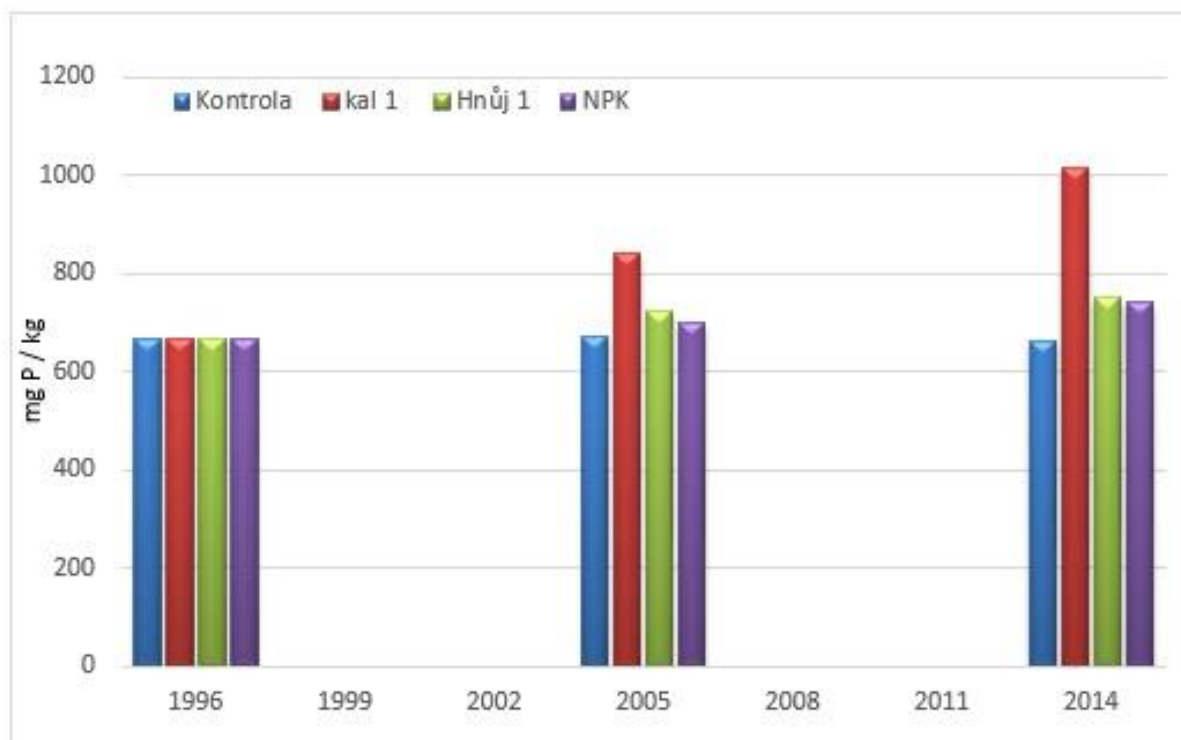
Graf č. 10: Množství přístupného fosforu v půdě při různých systémech hnojení v letech 1996 - 2014 pro stanoviště Suchdol



Reziduální fosfor

Z grafu č. 11 je patrné, že obsah reziduálního fosforu nejvýrazněji vzrostl po aplikaci čistírenských kalů. V roce 2014 byly naměřeny hodnoty mírně vyšší než 1000 mg P/kg. Varianty hnojením hnojem a minerálními hnojivy sice vzrostly oproti roku 1996, avšak, jak lze vidět v grafu č. 11, v následujících letech zůstávají konstantní. U nehnojené varianty nebyla pozorována žádná změna.

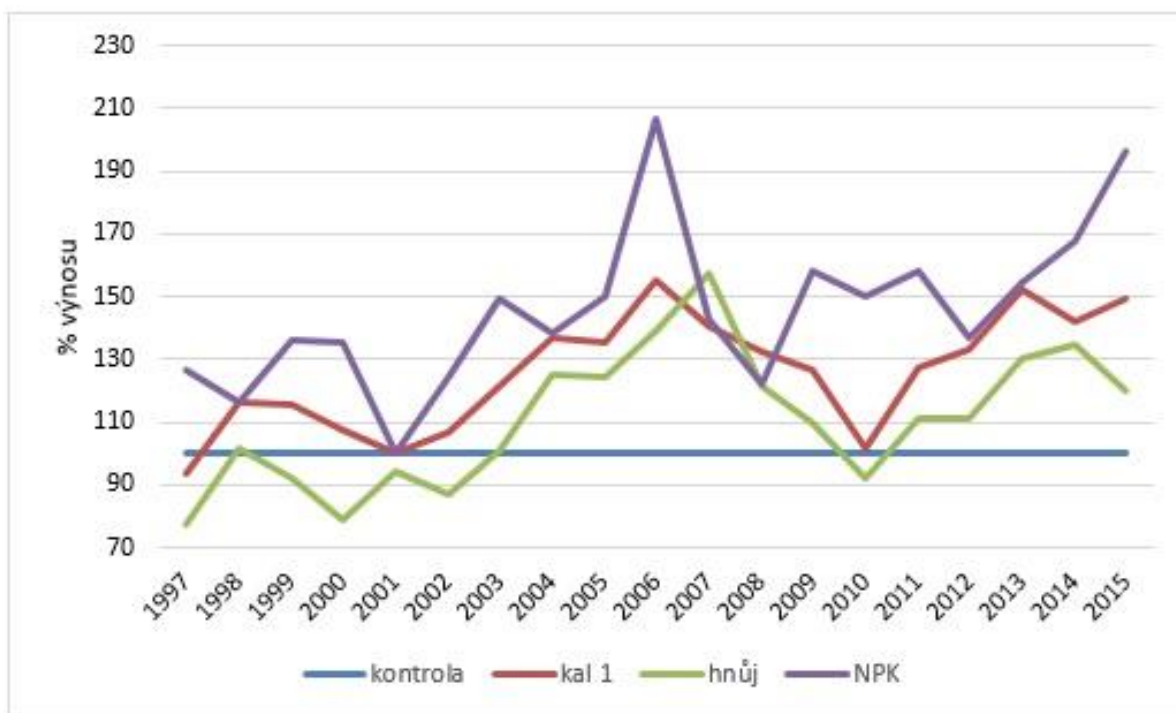
Graf č. 11: Množství reziduálního fosforu v půdě při různých systémech hnojení v letech 1996, 2005 a 2014 pro stanoviště Suchdol



Výnosy pšenice ozimé

Na grafu č. 12 jsou znázorněny výnosy pšenice ozimé od roku 1997 na stanovišti Suchdol. Kontrolní, nehnojená varianta znázorňuje 100 %. I na tomto stanovišti je zřejmé, že nejvyššího nárůstu výnosů bylo dosaženo po aplikaci NPK, následně po použití kalů a nejhůře se z hlediska výnosů pšenice projevila varianta hnojená hnojem. Výnosy u varianty hnojené hnojem byly dokonce do roku 2002 nižší než u nehnojené varianty. Nejvyššího nárůstu na 207 % bylo dosaženo v roce 2007 na variantě hnojení NPK.

Graf č. 12: Výnosy ozimé pšenice po aplikaci variant hnojení v letech 1996- 2015 pro stanoviště Suchdol



6.2 Porovnání forem fosforu a výnosů pšenice ozimé na všech pokusných stanovištích

Množství vodorozpustného fosforu v roce 1996 pohybovalo na stanovišti Suchdol v rozmezí 2,5 – 6,4 mg P/kg, na stanovišti Humpolec mezi 2,7 – 8,7 mg P/kg. Nejvyšší hodnoty byly naměřeny na stanovišti Hněvčeves, kdy se množství pohybovalo mezi 6,1 – 11,1 mg P/kg. Na stanovišti Humpolec byly během dlouhodobého pokusu naměřeny nejvyrovnanější průměrné hodnoty vodorozpustného fosforu, u všech variant cca 7,5 mg P/kg. Nejvyšší množství fosforu bylo zaznamenáno u varianty hnojené hnojem v roce 2008, jehož množství 11,2 mg P/kg. V letech 2005 – 2014 se zde jako zpravidla nejvýhodnější hnojení projevilo použití kalů. Na stanovišti Hněvčeves byly varianty hnojení rovněž poměrně vyrovnané, během pokusu bylo nejvyšších průměrných hodnot vodorozpustného fosforu dosaženo při variantě hnojení kaly. Nejvyšší množství P bylo zaznamenáno v roce 2014, po aplikaci čistírenských kalů – 14,8 mg P/kg. Rovněž na stanovišti Suchdol nebyly zaznamenány výrazné rozdíly mezi variantami. Nejvyšší průměrné množství během pokusu vykazovala zpravidla opět varianta hnojená kaly při nejvyšší hodnotě 7,8 mg P/kg v roce 2014. Mezi roky 1999 až 2008 bylo naměřeno v Suchdole vysoké a vyrovnané množství i u nehnojené

varianty. Na ostatních stanovištích byl u nehnojených variant zaznamenán postupný pokles množství vodorozpustného P. Z výsledků je patrné, že v případě vodorozpustného fosforu nelze jednoznačně vyhodnotit nejstabilnější variantu hnojení z hlediska obsahu okamžitě přístupného fosforu, avšak nejvyšších hodnot bylo průměrně dosahováno u varianty hnojení čistírenskými kaly.

Množství přístupného fosforu se v době založení pokusu pohybovalo na stanovišti Humpolec mezi 59 – 89 mg P/kg, v Hněvčevsi v rozmezí 70 -105 mg P/kg, na stanovišti Suchdol v hodnotách od 66 do 91 mg P/kg. Pro stanoviště Humpolec se prokazatelně nejvýhodnějším hnojením z hlediska obsahu mobilního P stala varianta hnojená kaly, nejvyšší hodnoty bylo dosaženo v roce 2008 - 184 mg P/kg. Dle kritéria hodnocení obsahu fosforu metodou Mehlich 3 se na stanovišti Humpolec obsah fosforu díky aplikaci čistírenských kalů zvýšil z vyhovujícího na vysoký (Smatanová et Sušil, 2015). V porovnání hnojení NPK či hnojem, se prokázala vyšším průměrným množstvím P varianta aplikace NPK. Též na stanovišti Suchdol hnojení čistírenskými kaly dosahovalo vždy nejvyšších obsahů přístupného fosforu. Nejvyšší hodnota byla naměřena v roce 2008 -157 mg P/kg, po aplikaci kalů. Z kritéria hodnocení obsahu fosforu metodou Mehlich 3 vyplývá, že se na stanovišti Suchdol obsah fosforu díky aplikaci čistírenských kalů zvýšil z vyhovujícího na vysoký (Smatanová et Sušil, 2015). V porovnání hnojení NPK a použití hnoje, se prokazatelně lepších výsledků docílilo po aplikaci organického hnojení. Varianta NPK dosovala srovnatelných výsledků jako nehnojená varianta, obě varianty dosahovaly během celého pokusu vyrovnaných výsledků množství přístupného fosforu, neprojevovaly se značné sezónní výkyvy. I na stanovišti Hněvčevsi lze potvrdit, že se kaly prokázaly jako nejlepší varianta hnojení, a je tak významným zdrojem P. Na tomto stanovišti obsah mobilního P v roce 2014 vzrostl až na 191 mg P/kg. Což je 2,5 krát více než při měření v roce 1996. Dle kritéria hodnocení obsahu fosforu Mehlichem 3 se na stanovišti Hněvčevsi obsah fosforu díky aplikaci čistírenských kalů zvýšil z dobrého na velmi vysoký (Smatanová et Sušil, 2015). Mezi množstvím P po aplikaci kalů v jednotlivých letech byly zaznamenány větší sezónní výkyvy než na předchozích stanovištích. V případě porovnání výsledků variant NPK a Hnůj, bylo naměřeno prokazatelně vyšší množství u varianty hnojené hnojem. S výjimkou Suchdola se u nehnojených variant projevil klesající trend.

Množství reziduálního fosforu se na stanovišti Humpolec v roce 1996 pohybovalo mezi 570 – 651 mg P/kg, na stanovišti Hněvčevsi v rozmezí 462 - 633mg P/kg, a na stanovišti Suchdol dokonce mezi hodnotami 578 – 769 mg P/kg. V Humpolci se jako nejlepší

varianta pro zvýšení reziduálního fosforu projevila varianta hnojená kaly, v případě stanoviště Hněvčeves to byla varianta hnojení NPK, při které množství reziduálního P vzrostlo na hodnotu 612 mg P/kg. Pro stanoviště Suchdol bylo prokazatelně nejvyšších hodnot naměřeno po aplikaci čistírenských kalů, kde byla v roce 2014 naměřena hodnota 1016 mg P/kg. Na stanovišti Suchdol se nachází úrodná půda, černozem, která je bohatá na obsah celkového fosforu. Díky vysokému obsahu reziduálního P v suchdolské půdě lze tedy vysvětlit, že po celou dobu pokusu jeho množství výrazně nepokleslo ani na kontrolní variantě.

Z výsledků a grafů je zřejmé, že čistírenské kaly jsou významným zdrojem přístupného fosforu v půdě. Od založení pokusu v roce 1996 byl podíl fosforu navýšen díky čistírenským kalům více než dvojnásobně. Dlouholetý pokus je založen na jednotné dávce dusíku, která činí 330 kg N/ha. Při této dávce dusíku byly kaly ve srovnání s dalšími formami hnojení mnohem významnějším zdrojem P. Formou hnoje bylo během 3 let dodáno do půdy 70 kg P/ha, hnojením NPK 90 kg P/ha. Formou kalů bylo naproti tomu dodáno výrazně vyšší množství - 240 kg P/ha. Všechna tři stanoviště leží v rozdílných půdně-klimatických oblastech, i přesto je z grafů zřejmé, že na všech stanovištích se při stejné dávce dusíku aplikace čistírenských kalů osvědčila jako nejlepší způsob hnojení pro zvýšení obsahu mobilního fosforu v půdě. Z dlouhodobého pokusů vyplývá, že kaly aplikované na půdu zaručují dostatečnou zásobu P v půdě.

I přesto, že se kaly projevily jako nejlepší zdroje z hlediska sledovaných frakcí fosforu, u varianty hnojené NPK byly na všech třech stanovištích zjištěny nejvyšší výnosy pšenice ozimé. Varianta hnojená kaly se projevila pro výnos jako druhý nejlepší způsob hnojení a jako třetí následovala varianta hnojená hnojem. Je tedy zřejmé, že fosfor nebyl limitující živinou pro výnos pšenice na sledovaných pokusných stanovištích.

6.3 Hodnocení analytických metod pro stanovení forem fosforu

Metody použité v pokusu byly vzájemně srovnány pomocí korelační a regresní analýzy. Pro hodnocení korelací byl použit Pearsonův korelační koeficient. K vyhodnocení regresního vztahu byla použita lineární funkce. Porovnání jednotlivých metod je znázorněno v grafech č. 13 až 15.

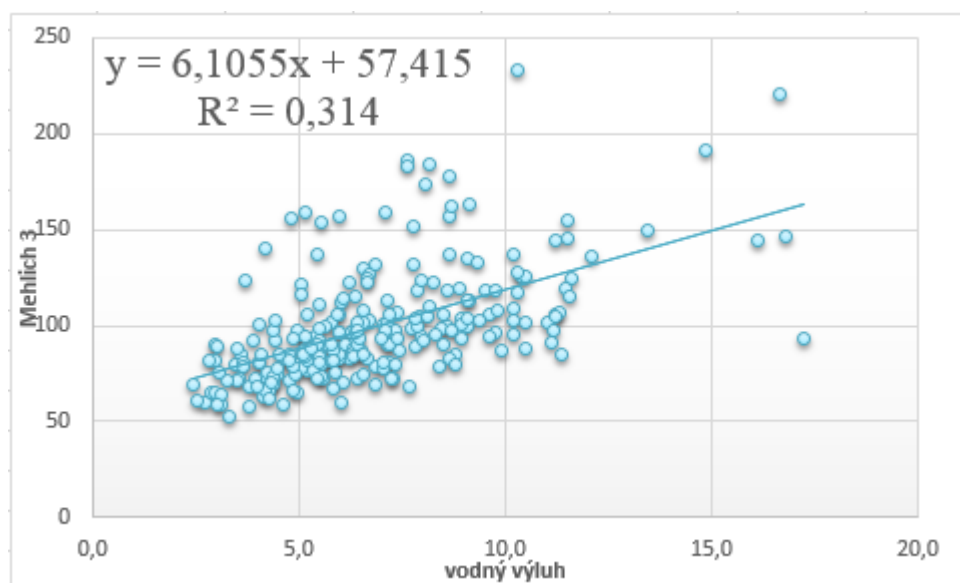
V porovnání závislosti jednotlivých metod vykazovalo nejtěsnější závislost porovnání výsledků vodného výluhu s metodou Mehlich 3, jejichž korelační koeficient byl 0,56, tedy

středně silnou závislost. Regresní koeficient pro vztah vodného výluhu s metodou Mehlich 3 činil však pouze 0,31. To znamená, že změny hodnot dosažených metodou Mehlich 3 lze pouze ze 31 % vyjádřit změnami hodnot dosaženými vodným výluhem, a jedná se tedy o slabou závislost. Slabá závislost proto ukazuje na fakt, že oběma uvedenými metodami jsou pravděpodobně stanoveny vzájemně vzdáleně související frakce fosforu.

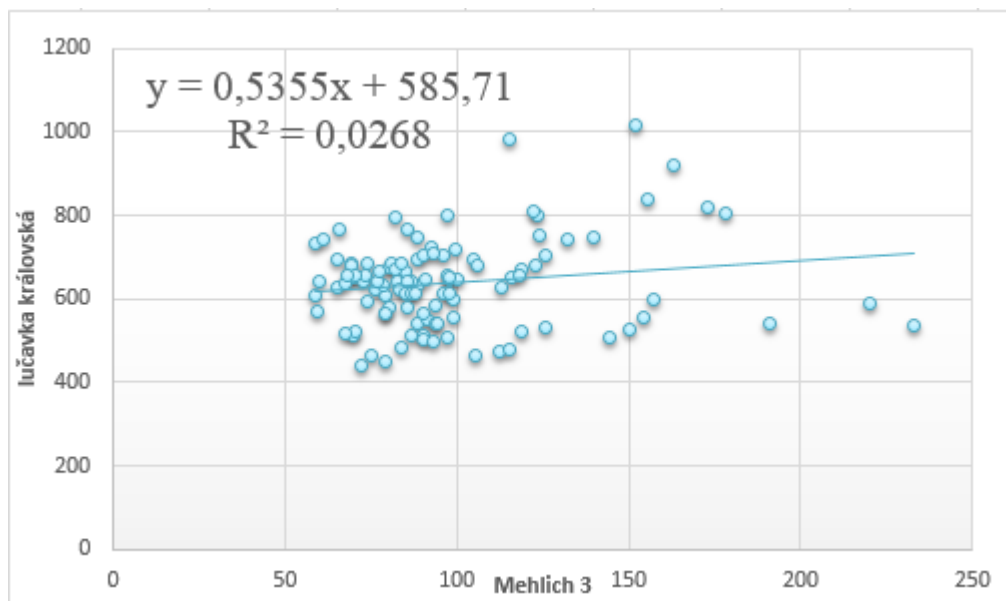
Dále byly porovnány i vztahy metody Mehlich 3 s lučavkou královskou. Korelační koeficient zde byl pouze 0,16, a jedná se tedy o slabou závislost. To potvrzuje i hodnota regresního koeficientu, která činila pouze 0,03. Změny hodnot dosažených metodou Mehlich 3 lze tedy pouze ze 3 % vyjádřit změnami hodnot dosaženými lučavkou královskou, tím pádem se jedná o velmi slabou závislost.

Nejhorších výsledků bylo dosaženo při srovnání vodného výluhu a lučavky královské, jejichž korelační koeficient dosahoval záporné hodnoty -0,31, to znamená, že oběma metodami jsou stanoveny jen velmi vzdáleně související frakce půdního P. Regresní koeficient mezi vodným výluhem a lučavkou královskou byl 0,11. Změny hodnot dosažených metodou vodného výluhu lze pouze z 11 % vyjádřit změnami hodnot dosaženými lučavkou královskou, tím pádem se jedná o velmi slabou závislost. Výsledky porovnání regresního vztahu mezi vodným výluhem a lučavkou královskou mohou být ovlivněny menším počtem dat hodnocených pro lučavku, jelikož měření reziduálního fosforu probíhalo pouze v roce 1996, 2005 a 2014.

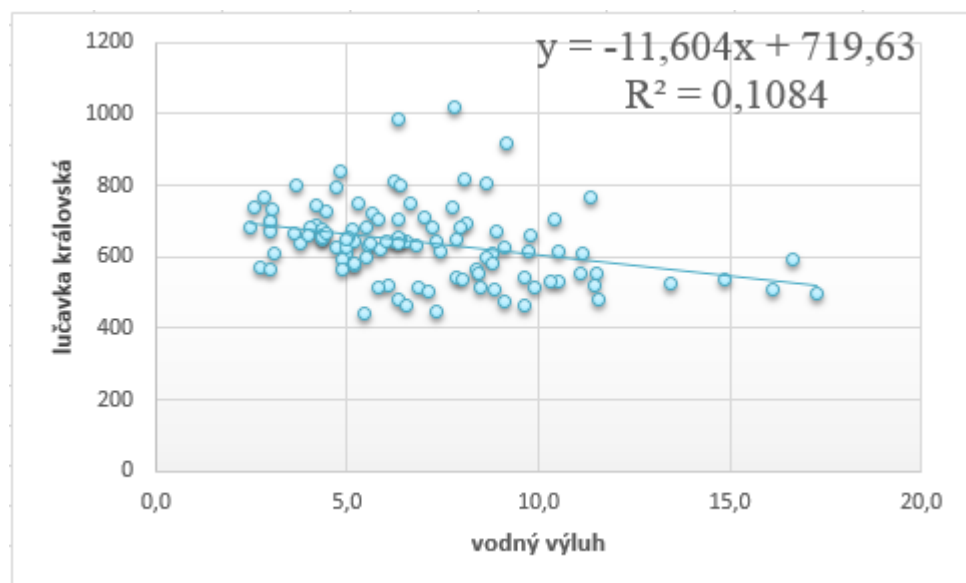
Graf č. 13: Regresní analýza pro metodu Vodný výluh a Mehlicha 3



Graf č. 14: Regresní analýza pro metodu Mehlich 3 s lučavkou královskou



Graf č. 15: Regresní analýza pro metodu vodný výluh s lučavkou královskou



7 Diskuze

Jeden z nejdůležitějších faktorů intenzifikačních rostlinné produkce je výživa rostlin a hnojení. Tento faktor má významný dopad na výnos a kvalitu sklizených plodin. Obiloviny patří mezi nejvýznamnější plodiny. Poměr ozimé pšenice na zemědělské půdě představuje důležitou roli, jelikož se jedná o intenzivně pěstovanou plodinu s vysokými nároky, a její výnos zaleží na příslušném agrotechnickém vybavení, místě pěstování a především na výživě (Černý *et al.*, 2010). Je tedy důležité si uvědomit, že fosfor je nepostradatelný pro růst a vývin rostlin (Kulhánek *et al.*, 2004).

V roce 1996 byl založen dlouholetý pokus na třech stanovištích. Před založením pokusu bylo změřeno na všech stanovištích množství vodorozpustného, přístupného a reziduálního fosforu. V roce 1996 se hodnoty vodorozpustného P na stanovišti Suchdol pohybovaly v rozmezí 2,5 – 6,4 mg P/kg, na stanovišti Humpolec v roce 1996 byl zaznamenán obsah fosforu v rozmezí 2,7 – 8,8 mg P/kg. Nejvyšší hodnoty byly naměřeny na stanovišti Hněvčeves. Množství se pohybovalo mezi hodnotami 6,1 – 11,1 mg P/kg. Dle Richtera et Hluška (1999) a Sharpley *et al.* (2003) je v půdním roztoku zastoupení fosforu v rozmezí od 0,8 do 8,0 mg P/kg na vzduchu vyschlé půdy. To znamená, že pouze hodnoty na stanovišti Hněvčeves přesahují toto rozmezí v průměru o 0,5 mg P/kg, avšak odchylka ani zde není výrazná. U nehnojené varianty se během let obsah vodorozpustného fosforu na všech stanovištích dále snižoval.

Fosfor lze do půdy doplňovat pomocí různých druhů hnojiv. V této diplomové práci se jednalo o aplikování čistírenských kalů, chlévského hnoje, minerálních hnojiv (v našem případě byl fosfor dodáván ve formě superfosfátů). Catroux *et al.* (1981) uvádí, že aplikace čistírenských kalů do půdy má značný vliv na růst a výnos rostlin. Warman et Termeer, (2005) doplňují toto tvrzení o fakt, že kaly z čistíren odpadních vod jsou významným zdrojem na organické hmoty, základních živin, stopových prvků, dále pozitivně působí na fyzikálně-chemické i biologické vlastnosti půdy. Tato diplomová práce byla zaměřena na hodnocení vlivu čistírenských kalů na obsah různých forem fosforu v půdě. Bylo prokázáno, že toto hnojivo je zejména významným zdrojem mobilního P.

Přirozený obsah mobilních fosforečnanů v nehnojených půdách se velmi liší, pohybuje se běžně v rozmezí od 10 do 100 mg P/kg. Většina fosforu je však vázána na méně rozpustné látky v půdě (Kulhánek *et al.*, 2007). Průměrná zásoba přístupného fosforu v zemědělské

půdě České republiky činí podle Smatanové et Sušila (2015) 87 mg P/kg. Podobné výsledky uvádí i Vaněk *et al.* (2012) a to rozmezí 40 – 80 mg P/kg. Průměrné množství fosforu na všech stanovištích se po aplikaci jednotlivých systému hnojení, pohybovalo ve vyšších hodnotách. V případě čistírenských kalů byla průměrná hodnota mobilního fosforu na všech stanovištích 138 mg P/kg. Hodnoty pod průměrem byly zaznamenány u nehnojené varianty na stanovišti Hněvčeves. Dle publikace Smatanové et Sušila (2015) lze vyvodit, že se na stanovištích Humpolec a Suchdol obsah fosforu v půdě díky aplikaci čistírenských kalů zvýšil během pokusu z vyhovujícího na vysoký. Na stanovišti Hněvčeves se pak obsah fosforu navýšil z dobrého na velmi vysoký. Hodnocení fosforu vyplývá z kritérií pro hodnocení obsahu fosforu v půdě za pomoci metody Mehlich 3. V letech 1999 – 2004 bylo množství fosforu v půdě v České republice naměřeno v hodnotách cca 95 mg P/kg půdy (Čermák et Budňaková, 2005). Z našich výsledků pokusů je tedy zřejmé, že u všech variant hnojení byl zaznamenán obsah P výrazně vyšší, a to právě díky většímu množství dodaného P.

Z výsledků vyplývá, že čistírenské kaly se při stejné dávce dodávaného dusíku prokázaly jako nejlepší varianta pro zvýšení obsahu vodorozpustného i mobilního P v půdě. Výsledky prokazatelně ukazují pozvolný nárůst a stabilitu obsahů zejména u přístupného fosforu u varianty hnojené čistírenskými kaly. Stejných závěrů po dlouhodobé aplikaci kalů dosáhli i Cameron *et al.* (1997) a Raclavská (2007). Kaly jsou význačnější zásobárnou fosforu v porovnání s hnojem (Hanč *et al.*, 2004).

Zjišťování obsahu reziduálního fosforu bylo prováděno v roce 1996, 2005 a 2014. Během měření byl zjištěn nejvýznamnější nárůst obsahu P na stanovišti Suchdol a Humpolec díky aplikaci čistírenských kalů, na stanovišti Hněvčeves došlo k nejvýraznějšímu zvýšení u varianty hnojené minerálními hnojivy. Nejvyšší hodnota byla zaznamenána na stanovišti Suchdol - 1016 mg P/kg. Balík *et al.* (2007) ve své práci naměřili na variantě hnojené kaly obdobné množství (1046 mg P/kg). Tyto výsledky byly měřeny na stanovišti Humpolec, kde se nachází kambizem s pH 5. V našem případě bylo na tomto stanovišti po aplikaci kalů naměřeno pouze 818 mg P/kg reziduálního P. I u výsledků získaných na variantě hnůj bylo dosaženo nižších výsledků. Zatímco v publikaci Balík *et al.* (2007) je uvedeno množství P po aplikaci hnoje 907 mg P/kg, v této diplomové práci bylo na stanovišti Humpolec naměřeno maximální množství reziduálního fosforu 658 mg P/kg.

Aplikace hnoje na půdu se podle McGechan et Lewise (2002) projevuje zlepšením vlastností půdy, pozitivně působí zejména na zvýšení schopnosti zadržovat vodu v půdě, tím pádem selepší i následné využití fosforu. Pozitivní vliv hnoje při dlouhodobé aplikaci

potvrzují i výsledky Balík *et al.* (2007). Z dlouhodobých pokusů prováděných pro účel diplomové práce vyplývá, že varianta hnůj se projevila po čistírenských kalech jako druhý nejlepší zdroj fosforu v půdě. Hnojení statkovými hnojivy má velmi pozitivní vliv a podporuje půdní úrodnost. Po pravidelné aplikaci hnoje se v půdě projeví její lepší fyzikální vlastnosti, dále hnojení hnojem vede ke zlepšení retence vody, půda lépe udržuje živiny, a není tak náchylná na změny pH (Vaněk *et al.*, 2007). Stejně tak i výsledky na všech pozorovaných stanovištích potvrzují toto tvrzení z pohledu obsahu různých frakcí fosforu v půdě. Varianty hnojené hnojem vykazovaly zvýšený obsah jak vodorozpustného, přístupného, tak i reziduálního fosforu v půdě. Rovněž dle Ivanov *et al.* (2012) se přidáním hnoje zvýšily obsahy přístupných fosforečnanů, které byly zjišťovány za pomoci metody Mehlich 3. Aplikace hnoje se i v tomto případě projevila jako pozitivní z hlediska zvýšení obsahu mobilního fosforu v půdě.

Jako třetím nejlepším zdrojem fosforu v půdě se projevila varianta hnojená minerálními hnojivy. Varianta NPK se lépe než hnůj projevila pouze na stanovišti Humpolec. Richter et Hlušek (1999) uvádějí, že po správné aplikaci minerálních hnojiv se projeví mnoho pozitivních vlivů nejen u výnosů a výživy právě pěstovaných rostlin, ale jsou pozorovány i pozitivní vlivy u výnosů a výživy následně pěstovaných rostlin. Toto tvrzení bylo možné v případě hodnoceného dlouhodobého pokusu prokázat pouze z části.

Z publikace Kulhánek *et al.* (2005) vyplývá, že dlouholeté pokusy na třinácti lokalitách v České republice obsahují prokazatelně nižší obsahy fosforečnanů na nehnojených variantách v porovnání s variantami po aplikaci organických i minerálních hnojiv. Toto tvrzení uvádí i Hlušek et Trávník (2002), kteří porovnávali zásobenost půdy mobilním fosforem od roku 1972. Stejných výsledků bylo dosaženo i dlouhodobém pokusu hodnoceném v této diplomové práci.

Černý *et al.* (2010) hodnotili stejné pokusy do roku 2008 a na základě výsledků uvádějí, že v dlouhodobém pokusu se minerální hnojení projevilo jako nejlepší varianta pro dosažení nejvyšších výnosů. Lze tedy předpokládat, že docházelo i k nejvyššímu odběru fosforu. Z tohoto důvodu pravděpodobně na stanovištích Hněvčeves a Suchdol docházelo po aplikaci NPK pouze k pozvolnému nárůstu mobilního fosforu v půdě. Na stanovišti Humpolec byly po hnojení minerálními hnojivy v období 1999 – 2002 zaznamenány dokonce nižší hodnoty obsahu přístupného fosforu v půdě než u nehnojené varianty. I Jiang *et al.* (2005) se ve své práci přiklání k lepším výnosům po použití minerálních hnojiv, nežli po aplikaci hnojiv organických. Naopak Cameron *et al.* (1997) a Gondek (2014) ve svých

studiích uvádí, že nejvyšších výnosů pšenice ozimé bylo dosaženo po aplikaci čistírenských kalů.

V České a Slovenské republice, a některých státech USA se z hlediska agrochemického zkoušení půd stanovuje množství mobilního fosforu metodou Mehlich 3, především díky její universalitě (Macháček, 2000). Mehlich (1984) vymyslel univerzální roztok, pomocí něhož lze z jednoho výluhu stanovit přijatelné frakce P, K a mobilní frakce Mg a Ca, dále také některé mikroelementy např. Cu, Zn, S, Fe, Al, Mn. V diplomové práci byly použity metody Mehlich 3, vodný výluh a výluh lučavky královské.

Tyto metody byly vzájemně srovnány pomocí korelační a regresní analýzy. Pro hodnocení korelací byl použit Pearsonův korelační koeficient. Mezi variantami vodného výluhu s Mehlichem 3, byl vypočítán korelační koeficient 0,56, tedy mezi metodami je středně silná závislost. Mezi metodami Mehlich 3 s lučavkou královskou byl korelační koeficient 0,16, neprojevila se mezi nimi prakticky žádná závislost. V porovnání metod lučavky královské a vodného výluhu bylo dosaženo záporného korelačního koeficientu -0,31. Zbíral (2001) ve své publikaci uvádí, že korelační vztah mezi metodami Mehlich 3 a extraktem lučavky královské je průkazný. Dále uvádí, že i přes tuto průkaznost, je pro stanovení lučavkou královskou vztah k ostatním metodám značně volný. V našem experimentu lze změny hodnot dosažených metodou Mehlich 3 vyjádřit pouze ze 3 % změnami hodnot dosaženými lučavkou královskou. V publikaci Zbíral (2001) je lineární regresní hodnotou vysvětleno cca 10 % v porovnání stejných metod. Což je v souladu s očekáváním, jelikož způsob uvolnění fosforu lučavkou královskou je zcela odlišný od ostatních extrakčních postupů.

8 Závěr

Množství vodorozpustného fosforu bylo na všech stanovištích poměrně vyrovnané a nelze z nich jednoznačně vyvodit nejlepší variantu hnojení. Nejvyšších obsahů bylo ve většině případů dosaženo po aplikaci čistírenských kalů. Na všech pokusných stanovištích bylo prokazatelně nejvyššího množství přijatelného fosforu stanoveného metodou Mehlich 3 dosaženo po použití kalů. Z výsledků diplomové práce je zřejmé, že se čistírenské kaly projeví jako velmi stabilní dlouhodobý zdroj mobilního fosforu. Na stanovištích Humpolec a Suchdol bylo dosaženo nejvyšších obsahů reziduálního fosforu po aplikaci čistírenských kalů. Na stanovišti Hněvčevy byl nejvyšší obsah zaznamenán na variantě hnojené minerálními hnojivy. Byla tak potvrzena hypotéza, že na hnojených variantách je očekáván vzestupný trend obsahu všech frakcí P v půdě. Ta se potvrdila zejména u varianty hnojené čistírenskými kaly.

Čistírenské kaly se ukázaly jako nejlepší zdroj sledovaných frakcí fosforu v půdě, kdežto varianta NPK vykazovala zpravidla nižší hodnoty obsahů, občas srovnatelné s nehnojenými variantami. Naopak pro výnos pšenice ozimé se právě varianta hnojená minerálními hnojivy projeví jako nejvhodnější hnojení, a dosahovala v průměru dvojnásobných výnosů než varianta nehnojená. Nejvyšších výnosů bylo dosaženo v roce 2015, kdy tato varianta na stanovišti Humpolec dosáhla dokonce šestinásobného výnosu oproti kontrolní variantě. Varianta hnojená kaly se projeví pro výnos jako druhý nejlepší způsob hnojení a jako třetí způsob poté hnojení hnojem. Byla tak tedy potvrzena hypotéza, že na stanovištích s nižší zásobou P v půdě bude se stoupající dávkou fosforu v hnojivech dosaženo pravděpodobně i vyšších výnosů pšenice. Předpoklad, že stoupající dávka fosforu do půdy povede ke zvýšeným odběrům fosforu pšenicí ozimou, a s tím spojených vyšších výnosů, byl v dlouhodobém pokusu potvrzen jen částečně.

Naopak z výsledků práce nebylo jednoznačně možné potvrdit předpoklad, že na kontrolní, nehnojené variantě bude v dlouhodobém pokusu zejména vlivem odběrů rostlinami klesat obsah fosforu v půdě. Nehnojená varianta sice vykazovala prakticky vždy nejnižší hodnoty, avšak množství přijatelného fosforu během pokusu zůstávalo obdobné jako obsah v roce 1996, nebo byl zaznamenán pouze mírný pokles.

9 Použitá literatura

Agbenin, J.O., Igbokwe, S.O., 2006. Effect of soil-dung manure incubation on the solubility and retention of applied phosphate by a weathered tropical semi-arid soil. *Geoderma*. 133 (3). 191–203.

Appels, L., Baeyens, J., Degreève, J., Dewil R. 2008. Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge. *Progress in Energy and Combustion Science*. 34 (6). 755–781.

Balík, J., Pavlíková, D., Vaněk, V., Kulhánek, M., Kotková, B. 2007: The influence of long-term sewage sludge application on the activity of phosphatases in the rhizosphere of plants. *Plant Soil Environment*. 53 (9). 375 – 381.

Barzegar A. R., Yousefi A., Daryashenas A. 2002. The effect of addition of different amounts and types of organic materials on soil physical properties and yield of wheat. *Plant and Soil*. 247 (2). 295 – 301.

Baier, J., Smetánková, M., Baierová, V. 1988. Diagnostika výživy rostlin. MZVŽ Praha. 284 s.

Cameron, K. C., Di, H. J., McLaren, R. G. 1997. Is soil an appropriate dumping ground for our wastes? *Australian Journal of Soil Research*. 35 (5). 995 -1036.

Catroux, G., L_Hermite, P., Suess, E. (Eds.), 1981. The influence of sewage sludge application on physical and biological properties of soils. D. Reidel Publishing Company. Boston, MA. 253s. ISBN 90-277-1501-7

Čermák, P., Budňáková, M. 2005. Spotřeba vápenatých hmot a vývoj pH půd v České republice. Sborník z konference „Racionální použití hnojiv zaměřené na problematiku vápnění“. Praha. KAVR. 42 – 46. ISBN: 802131401X.

Černý, J., Balík, J., Kulhánek, M., Časová, K., Nedvěd, V. 2010. Mineral and organic fertilization efficiency in long-term stationary experiments. *Plant Soil and Environment*, 56 (1). 28-36.

Černý, J., Balík, J., Švehla, P., Kulhánek, M. 2009. Využití odpadů z ČOV jako zdroje organických látek a živin. Sborník přednášek z 15. mezinárodní konference Racionální použití hnojiv. Praha. ČZU. 36-41.

Dohányos, M., Zábranská, J. 2002. Může být ČOV energeticky soběstačná?. Odpadové Fórum. 1. 19-22.

Gondek, K. 2014. Yield and selected indices of grain quality in spring wheat (*Triticum aestivum*) Depending on fertilization. *Journal of Elementology*. 19 (1). 81-94.

Hanč, A., Tlustoš, P., Balík, J. 2004. Vliv aplikace čistírenských kalů na výnosy senážního ovsa pěstovaného na třech různých zeminách. „Racionální použití hnojiv zaměřené na problematiku rizikových látek v rostlinné výrobě.“ Praha. KAVR. 138 – 141. ISBN: 8021312327.

Helena, K., Hrazdira, J., Růžek, P., 1998. Využití kalů z čistíren odpadních vod. *Odpady*. 5 (3). 10 – 11.

Hlušek, J., Trávník, K. 2002. Výsledky dlouhodobých hnojařských pokusů. „Racionální použití hnojiv zaměřené na problematiku fosforu v rostlinné výrobě.“ Praha. KAVR. 61 – 65. ISBN: 8021309571.

Ivanov, K., Zaprianov, P., Petkova, M., Stefanova, V., Kmetov, V., Georgieva, D., Angelova, V., 2012. Comparison of inductively coupled plasma mass spectrometry and colorimetric determination of total and extractable phosphorus in soil. *Spectrochim. Acta B* 71–72. 117–122.

Jaskulska, I., Jaskulski, D., Piekarczyk, M., Kotwica, K., Galezewski, L., Wasilewski, P. 2015. Magnesium content in the leaves of winter wheat in a long-term fertilization experiment. *Plant Soil Environment*. 61 (5). 208-212.

Jiang, D., Hengsdijk, H., Dai, T.B. de Boer, W., Jing, Q., Cao, W. X., 2006. Long term effects of manure and inorganic fertilizers on yield and soil fertility for a winter wheat-maize system in Jiangsu, China. *Pedosphere*. 16 (1). 25-32.

Kalinová, J., Moudrý, J., Konvalina, P., Moudrý, J. 2007. Půdní úrodnost, výživa a hnojení rostlin v ekologickém zemědělství. ZF JU, České Budějovice, 41 s., ISBN 978-80-7394-029-4.

Knapowski, T., Szczepanek, M., Wilczewski, E., Poberezny, J. 2015. Response of wheat to seed dressing with humus and foliar potassium fertilization. *Journal of Agricultural Science and Technology*. 17 (6). 1559-1569.

Kolář, L., Kužel, S. 2000. Odpadové hospodářství. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích. 183s. ISBN 80-7040-449-3.

Kulhánek, M., Balík, J., Sýkora, K., Černý, J., Bazalová, M. 2004. Vliv různých systémů hnojení brambor na obsah mobilního a labilního fosforu v půdě. Sborník z konference. „Racionální použití hnojiv zaměřené na problematiku rizikových látek v rostlinné výrobě“. Praha. KAVR. 151 – 154. ISBN: 8021312327.

Kulhánek, M., Balík, J., Černý, J., Habásková, B. 2005. Srovnání tří různých metod pro stanovení mobilních forem fosforu v půdě. „Racionální použití hnojiv zaměřené na problematiku vápnění“. Praha. KAVR. 42 – 46. ISBN: 802131401X.

Kulhánek, M., Balík, J., Černý, J., Časová, K., Habásková, B. 2006. Podíl minerálního a organického fosforu v půdě po aplikaci organických hnojiv. In: Sborník Agroregion 2006: Zvyšování konkurenceschopnosti v zemědělství. Sekce II. Půda – základ konkurenceschopnosti zemědělství: sborník referátů z VI. ročníku mezinárodní vědecké konference. ZF JCU, České Budějovice, s. 70-73, ISBN 80-7040-870-7

Kulhánek, M., Balík, J., Černý, J., Nedvěd, V., Kotková, B. 2007. The influence of different intensities of phosphorus fertilizing on available phosphorus contents in soils and uptake by plants. *Plant Soil Environment*. 55 (9). 382 – 387.

Kulhánek, M., Balík, J., Černý, J., Vaněk, V. 2009b. Evaluation of phosphorus mobility in soil using different extraction methods. *Plant, Soil and Environment*. 55 (7). 267 – 272.

Kulhánek, M., Balík, J., Černý, J., Vašák, F., Shejbalová, Š. 2014. Influence of long-term fertilizer application on changes of the content of Mehlich-3 estimated soil macronutrients. *Plant, Soil and Environment*. 60(4). 151 – 157.

Kunzová, E. 2009. Výživa rostlin a hnojení fosforem. Metodika pro praxi. Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i. 24 s. ISBN: 978-80-7427-015-4

Kyncl, M. 2007. Technologie zpracování a využití vodárenských kalů. Montanex. Ostrava, 127 s. ISBN 978-80-248-1604-3.

Luscombe, P. C., Syers, J. K., Gregg, P. E. H. 1997. Water extraction as a soil testing procedure for phosphate. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 10. 1361 – 1369.

Mackey, K. R. M., Paytan, P., 2009. Phosphorus cycle. *Encyclopedia of Microbiology*. Academic Press. 322-334.

Macháček, V. 2000. Určení podmínek pro použití Olsenovy metody pro stanovení přístupného fosforu na karbonátových půdách. *Agrochémia*, 40 (4). 20 – 22.

Matějů, L., Zimová M. 2002. Nakládání s kaly z čistíren odpadních vod. *Odpadové Fórum*. 1. 17-18.

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

Mehlich, A. 1984. Mehlich 3 soil test extractant: A modification of Mehlich 2 extractant. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 15. 1409-1416.

Nest, T.V. (ed.) 2015. The long term use of farmyard manure and compost: Effects on P availability, orthophosphate sorption strength and P leaching. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 216. 23-33.

Pavlíková, D., Pavlík, M., Balík, J. 2008. Úloha fosforu v rostlinách. Sborník z konference „Racionální použití hnojiv zaměřené na problematiku výživy a hnojení fosforem“. Praha. KAVR. 31 – 35. ISBN: 9788021318564

Richter., R. 1999. Výživa a hnojení rostlin: praktická cvičení. Mendelova zemědělská a lesnická univerzita V Brně. 187 s., ISBN 8071573469.

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

Richter, R., Římovský, K. 1996. Organická hnojiva, jejich výroba a použití. Institut výchovy a vzdělávání ministerstva zemědělství ČR v Praze. 40 s. ISBN 80-7105-117-9.

Sharpley A. N. (ed). 2003. Agricultural phosphorus and eutrophication, 2nd edn, U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service. 38 s.

Sharpley, A. N., Menzel, E. G.. 1987. The impact of soil and fertilizer phosphorus to the environment. *Advances in Agronomy*. 41. 297-324.

Scherer, H. W. 2001. Sulphur in crop production – invited paper. *European Journal of Agronomy*. 14 (2). 81-111.

Smatanová, M., Sušil, A. 2015. Výsledky agrochemického zkoušení zemědělských půd za období 2009 – 2014. *ÚKZUZ*. 106 s. ISBN: 978-80-7401-114-6.

Směrnice 86/278/EHS o ochraně životního prostředí a zejména půdy při používání kalů z čistíren odpadních vod v zemědělství. 1986. Rada evropských společenství.

Směrnice 91/271/EHS, o čištění městských odpadních vod. 2010. Vláda ČR.

Šimek, M. 2003. Základy nauky o půdě – biologické procesy a cykly prvků. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích. 131 s. ISBN 80-7040-630-5.

Torma, S. 2007. Príjem a využitie živín rastlinami v jarnom období. Agromanuál. 2 (2). 42-43.

Vaněk, V., Balík J., Pavlíková D., Tlustoš P. 2007. Výživa polních a zahradních plodin. Profi Press, Praha. 167 s. ISBN 976-80-86726-25-0.

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

VÚRV Praha Ruzyně, Komise výživy rostlin. 2000. Možnosti využití kalů z ČOV v zemědělství. Sborník přednášek z odborného semináře. VÚRV, Praha. 69 s.

Vyhláška č. 382 ze dne 17. 10. 2001 o podmínkách použití upravených kalů na zemědělské půdě. 2001. MŽP. částka 145.

Vyhláška č. 383 ze dne 17. 10. 2001 o podrobnostech nakládání s odpady. 2001. MŽP. částka 145.

Warman, P. R., Termeer, W. C., 2005. Evaluation of sewage sludge, septic waste and sludge compost applications to corn and forage: Yields and N, P and K content of crops and soils. Bio-resource Technology. 96. 955–961.

Withers, P. J. A., Bradley, R. S., Jones, D. L., Healey, J. R., Talboys, P. J. 2014. Feed the crop not the soil: rethinking phosphorus management in the food Chain. Environmental Science Technology. 48 (12). 6523 - 6530.

Zákon č. 185 ze dne 15. 5. 2001 o odpadech. In: Sbírka zákonů České republiky. 2001. částka 71.

Zbírál, J. 2001. Porovnání extrakčních postupů pro stanovení základních živin v půdách ČR. Ústřední kontrolní a zkušební ústav zemědělský v Brně. 205 s. ISBN: 80-86051-69-2.

Zimolka, J., (Ed.). 2006. Ječmen – formy a užitkové směry v ČR, Profi Press. Praha, 200 s., ISBN 80-86-72-6-18-5.

Internetové zdroje:

ČSÚ. Vodovody, kanalizace a vodní toky. 2014. [online] [cit. 2016.2.22] Dostupné z <<http://www.czso.cz/csu/2013edicniplan.nsf/p/2003-13>>.

Dohányos, M. 2006. Efektivní využití a likvidace čistírenských kalů. Biom.cz [online]. [cit. 2016-2-10], Dostupné z WWW: <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/efektivni-vyuziti-a-likvidace-cistirenskych-kalu>>.

Dohányos, M., Kutil, J. 2005. Efektivní využití a likvidace čistírenských kalů. Biom.cz [online]. [cit. 2016-02-22]. Dostupné z <<http://biom.cz/cz/odborneclanky/efektivni-vyuziti-a-likvidace-cistirenskych-kalu-2>>.

EXCEL. Microsoft Office Excel 2007. Microsoft office Enterprise 2007. USA. Release SP2

Vyhláška 382/2001 Sb., 2001. Dostupné z: <<http://www.zakonyprolidi.cz>>

Seznam obrázků

Obrázek č. 1: Cyklus P v půdě: komponenty a měřitelné frakce.....	10
Obrázek č. 2: Základní schéma čistírny odpadních vod s kalovým hospodářstvím	17

Seznam grafů

Graf č. 1: Množství vodorozpustného fosforu v půdě při různých systémech hnojení v letech 1996 - 2014 na stanovišti Humpolec	31
Graf č. 2: Množství přístupného fosforu v půdě při různých systémech hnojení v letech 1996 - 2014 na stanovišti Humpolec	32
Graf č. 3: Množství reziduálního fosforu v půdě při různých systémech hnojení v letech 1996, 2005 a 2014 na stanovišti Humpolec	33
Graf č. 4: Výnosy ozimé pšenice po aplikaci variant hnojení v letech 1996- 2015 pro stanoviště Humpolec	34
Graf č. 5: Množství vodorozpustného fosforu v půdě při různých systémech hnojení v letech 1996 - 2014 na stanovišti Hněvčeves	35
Graf č. 6: Množství přístupného fosforu v půdě při různých systémech hnojení v letech 1996 - 2014 na stanovišti Hněvčeves	36
Graf č. 7: Množství reziduálního fosforu v půdě při různých systémech hnojení v letech 1996, 2005 a 2014 na stanovišti Hněvčeves	37
Graf č. 8: Výnosy ozimé pšenice po aplikaci variant hnojení v letech 1996- 2015 na stanovišti Hněvčeves.....	38
Graf č. 9: Množství vodorozpustného fosforu v půdě při různých systémech hnojení v letech 1996 - 2014 pro stanoviště Suchdol	39
Graf č. 10: Množství přístupného fosforu v půdě při různých systémech hnojení v letech 1996 - 2014 pro stanoviště Suchdol	40
Graf č. 11: Množství reziduálního fosforu v půdě při různých systémech hnojení v letech 1996, 2005 a 2014 pro stanoviště Suchdol.....	41

Graf č. 12: Výnosy ozimé pšenice po aplikaci variant hnojení v letech 1996- 2015 pro stanoviště Suchdol	42
Graf č. 13: Regresní analýza pro metodu Vodný výluh a Mehliča 3	45
Graf č. 14: Regresní analýza pro metodu Mehlich 3 s lučavkou královskou	46
Graf č. 15: Regresní analýza pro metodu vodný výluh s lučavkou královskou.....	46

Seznam tabulek

Tabulka č. 1: Mezní hodnoty koncentrací vybraných rizikových prvků a látek v kalech určených pro aplikaci na zemědělskou půdu dle vyhlášky č. 382/2001 Sb., o podmínkách použití upravených kalů na zemědělské půdě.....	19
Tabulka č. 2: Mikrobiologická kritéria pro použití kalů na zemědělské půdě.....	19
Tabulka č. 3: Základní charakteristika pokusných stanovišť	25
Tabulka č. 4: Přehled odrůd pěstovaných v dlouhodobých pokusech	26
Tabulka č. 5: Systém hnojení polního pokusu ČZU (množství dodaných živin na 1 ha)	27
Tabulka č. 6: Množství jednotlivých forem fosforu na jednotlivých stanovištích v roce 1996	30