

**Česká zemědělská univerzita v Praze**

**Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů**

**Katedra agroenvironmentální chemie a výživy rostlin**



**Změny obsahu přístupných forem fosforu po dlouhodobé aplikaci čistírenských kalů**

**Diplomová práce**

**Autor práce:** Bc. Hedvika Smetanová

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

© 2015 ČZU v Praze

### **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že svou diplomovou práci „Změny obsahu přístupných forem fosforu po dlouhodobé aplikaci čistírenských kalů“ jsem vypracovala samostatně pod vedením Ing. Martina Kulhánka, Ph.D. 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 10.4.2015

---

### **Poděkování**

Ráda bych touto cestou poděkovala Ing. Martinu Kulhánkovi, Ph.D. za odborné vedení, trpělivost, čas, věcné připomínky a cenné rady během zpracování diplomové práce. Dále děkuji rodině a příteli za psychickou a materiální podporu, nejen při zpracování této práce, ale i v průběhu celého mého studia.

## SOUHRN

Mnoho studií ukazuje, že se fosfor stává limitujícím prvkem ve výživě rostlin. Jedno z řešení, jak dodat fosfor do půdy, je aplikace čistírenských kalů. Toto řešení není nadměrně finančně nákladné a je přijatelné pro životní prostředí. Při dlouhodobé aplikaci čistírenských kalů lze očekávat zvýšení obsahu celkového fosforu, ale i jeho přístupných forem v půdě.

Hlavním cílem diplomové práce je vyhodnocení a kvantifikace efektivity dlouhodobé aplikace čistírenských kalů z hlediska různých frakcí přístupného fosforu v půdě v rozdílných půdně-klimatických podmínkách.

Teoretická část práce se zabývá fosforem v půdě a v rostlině, dále organickými hnojivy se zaměřením na čistírenské kaly a chlévský hnůj a rovněž minerálními hnojivy obsahujícími fosfor.

V experimentální části práce byly sledovány obsahy přístupných forem P v archivních vzorcích půdy z dlouhodobého přesného polního pokusu založeného v roce 1996 na stanovištích Humpolec, Hněvčeves a Suchdol. V osevním postupu jsou zde zařazeny brambory, pšenice a ječmen a pokus je založen na jednotné dávce dusíku 330 kg/ha na celý osevní postup. Jsou zde hodnoceny tři hnojené varianty (čistírenské kaly, hnůj a NPK) ve srovnání s kontrolní nehnojenou variantou. V odebraných půdních vzorcích byl na podzim po sklizni sledovaných plodin (rok 1999, 2002, 2005, 2008 a 2011) analyzován obsah vodorozpustného (vodný výluh) a mobilního fosforu (Mehlich 3).

Mobilní fosfor byl tvořen vodorozpustným na stanovišti Humpolec z 6,9 %, na stanovišti Hněvčeves z 8,7 % a na stanovišti Suchdol z 5,2 %. Bylo zjištěno, že nejlepším zdrojem vodorozpustného i mobilního fosforu je varianta hnojená čistírenskými kaly. Varianta hnojená hnojem byla druhým nejlepším zdrojem vodorozpustného i mobilního fosforu. Rovněž varianta hnojená minerálními hnojivy ve většině případů zvýšila obsah vodorozpustného i mobilního fosforu, ale v porovnání s předešlými dvěma variantami méně. Nejnižší hodnoty u všech stanovišť zpravidla vykazovala kontrolní nehnojená varianta. U kontrolních nehnojených variant obsah vodorozpustného fosforu v průběhu pokusu zpravidla postupně klesal nebo zůstal srovnatelný s obsahem v době založení pokusu. Potvrzeno bylo dlouhodobé působení čistírenských kalů a hnoje.

### **Klíčová slova:**

fosfor, půda, čistírenské kaly, hnůj, minerální hnojiva

## SUMMARY

Many studies have indicated phosphorus becoming limiting element in plant nutrition. One of the solutions how to supply phosphorus into the soil is application of sewage sludge. This solution isn't excessively expensive and it is acceptable for our environment. During long-term use of sewage sludge increasing of content of total phosphorus but also its accessible forms in soil can be expected.

The main aim of diploma thesis is evaluation and quantification of the efficiency of long-term application of sewage sludge in terms of different fractions of available phosphorus in soil in different soil-climatic conditions.

The theoretical part deals with the phosphorus in the soil and in the plant, with organic fertilizers (especially sewage sludge and manure) as well as with mineral fertilizers containing phosphorus.

In the experimental part of the study the available forms P in archive soil samples have been observed from the long-term field experiment. It was established in Humpolec, Hněvčeves and Suchdol sites in the year 1996. Potatoes, wheat and barley are included in crop rotation. The whole experiment is based on the same dose of 330 kg N/ha for the entire crop rotation. There are three fertilized treatments evaluated (sewage sludge, manure and NPK) in comparison with the non-fertilized control variant. In soil samples there was analyzed water-soluble content (aqueous extract) and mobile phosphorus (Mehlich 3). It was collected in autumn after harvest of studied crops (1999, 2002, 2005, 2008 and 2011).

The mobile phosphorus was created by water-soluble one by 6.9 % in Humpolec site, 8.7 % in Hněvčeves and 5.2 % in Suchdol. Sewage sludge treatment was evaluated as the best source of water-soluble and mobile phosphorus in our experiment. The next best was variant fertilized with farmyard manure. The way of fertilization with mineral fertilizers increased the soil P content as well but less. The lowest value in all sites has been shown in unfertilized control variant. The content of both P fractions on the control treatment usually declined or stayed at the same level during the whole run of the experiment (1996-2011). The long term effect of the sewage sludge and farmyard manure has been confirmed.

### **Key words:**

bioavailable phosphorus, soil, sewage sludge, farmyard manure, mineral fertilizers

## OBSAH

1	ÚVOD	1
2	CÍL PRÁCE	2
3	VĚDECKÁ HYPOTÉZA	3
4	LITERÁRNÍ REŠERŠE	4
4.1	Fosfor	4
4.2	Fosfor v půdě	5
4.2.1	Minerální fosfor v půdě	5
4.2.2	Organický fosfor v půdě	6
4.3	Fosfor v rostlině	7
4.4	Čistírenské kaly	12
4.5	Další organická hnojiva	19
4.5.1	Chlévský hnůj	19
4.6	Minerální hnojiva	23
4.6.1	Fosforečná hnojiva	23
4.6.2	Vícesložková hnojiva	26
5	MATERIÁL A METODY	28
5.1	Analytická stanovení	30
5.1.1	Extrakce demineralizovanou vodou	30
5.1.2	Obsah fosforu stanovený metodou Mehlich 3	30
5.1.3	Měření obsahu fosforu ve výluhu	31
6	VÝSLEDKY	32
6.1	Změny obsahu vodorozpustného a mobilního fosforu na nehnojených variantách	32
6.1.1	Stanoviště Humpolec	32
6.1.1.1	Vodorozpustný fosfor	32
6.1.1.2	Mobilní fosfor	33
6.1.2	Stanoviště Hněvčeves	34
6.1.2.1	Vodorozpustný fosfor	34
6.1.2.2	Mobilní fosfor	34
6.1.3	Stanoviště Suchdol	35
6.1.3.1	Vodorozpustný fosfor	35
6.1.3.2	Mobilní fosfor	36
6.2	Změny obsahu vodorozpustného a mobilního fosforu podle variant hnojení	37
6.2.1	Stanoviště Humpolec	37
6.2.1.1	Vodorozpustný fosfor	37
6.2.1.2	Mobilní fosfor	38
6.2.2	Stanoviště Hněvčeves	39

6.2.2.1	Vodorozpustný fosfor	39
6.2.2.2	Mobilní fosfor	40
6.2.3	Stanoviště Suchdol	41
6.2.3.1	Vodorozpustný fosfor	41
6.2.3.2	Mobilní fosfor	41
6.3	Změny obsahu vodorozpustného a mobilního fosforu podle plodin	42
6.4	Vztah mezi vodorozpustným a mobilním fosforem na stanovištích	43
7	DISKUZE	44
8	ZÁVĚR	50
9	SEZNAM LITERATURY	52

# 1 ÚVOD

Fosfor patří do skupiny nekovů, v periodické tabulce se nachází pod značkou P, hojně se vyskytuje v zemské kůře a je velmi diskutovaným prvkem ve výživě rostlin. Je obsažen ve všech živých organismech. V půdě se vyskytuje v mnoha sloučeninách s různými vlastnostmi. Pro půdu a rostliny je důležitým makroelementem. Nedostatek přístupného P v půdě má negativní vliv na růst a vývin, tedy i na výnosy pěstovaných plodin. Je potřeba, aby byl fosfor odebraný pěstovanými rostlinami opět vrácen do půdy, ale v přiměřeném množství. V současné době je z půdy čerpáno více fosforu než vráceno.

Fosfor se do půdy dodává ve formě statkových hnojiv, což jsou chlévský hnůj, kejda, komposty, posklizňové zbytky a zelené hnojení. V současné době je organických hnojiv nedostatek. Dalším řešením, jak dodat fosfor do půdy, jsou minerální hnojiva, což jsou látky mající vliv na půdní reakci a zvyšující výnosy hlavního i vedlejšího produktu. Konkrétně u fosforu se jedná o fosforečná a vícetložková hnojiva, kterých je na trhu řada. Pokud to okolnosti dovolují, tak je nejlepší kombinace organických hnojiv s minerálními.

Minerální hnojiva jsou vyráběna z fosfátových hornin, jejichž výskyt je ve formě fosforitů nebo apatitů a předpokládá se, že jejich zásoby budou vyčerpány za 90 až 130 let. Je tedy potřeba najít další zdroje, které budou přístupné na všech částech našeho kontinentu, přijatelné pro životní prostředí, ekonomicky únosné a nebudou ohrožovat zdraví lidí ani živočichů. Jedním z řešení jsou čistírenské kaly.

Čistírenské kaly jsou složitou heterogenní suspenzí anorganických a organických látek vylučovaných z odpadních vod nebo vznikají při technologických procesech čištění odpadních vod. Jsou zpravidla bohaté na organickou hmotu, základní živiny (především dusík a fosfor) i stopové prvky, mají příznivý vliv na fyzikálně – chemické i biologické vlastnosti půdy, příznivě ovlivňují růst a výnos pěstovaných rostlin. Jejich reakce bývá neutrální až alkalická. Kromě kladných vlastností mají však kaly i záporné vlastnosti, což je obsah patogenních organismů, rizikových látek a prvků. Jedním ze způsobů jejich využití je aplikace na zemědělskou půdu, což se při dodržení zákonem daných pravidel jeví jako nejrozumnější způsob využití.



## **2 CÍL PRÁCE**

Cílem práce je vyhodnocení a kvantifikace efektivity dlouhodobé aplikace čistírenských kalů z hlediska různých frakcí fosforu v půdě v rozdílných půdně-klimatických podmínkách.

### **3 VĚDECKÁ HYPOTÉZA**

Fosfor se podle četných studií stane v nejbližší budoucnosti limitujícím prvkem ve výživě rostlin. Jednou z alternativních možností doplnění P je aplikace čistírenských kalů. V diplomové práci by mělo být prokázáno, že dlouhodobá aplikace čistírenských kalů povede ke zvýšení obsahu nejen celkového, ale i přístupných forem fosforu v půdě.

## 4 LITERÁRNÍ REŠERŠE

### 4.1 Fosfor

Fosfor se řadí do skupiny nekovů (Vaněk et al., 2012). Má atomovou hmotnost 30,98 a dodnes bylo zjištěno 6 izotopů fosforu (Balík et al., 2008). V přírodě se vždy vyskytuje jako pětimocný (Ivanič et al., 1984). Jeho obsah v litosféře je cca 0,1 %, v biosféře 0,1 – 1 % a člověk denně přijme s potravou 1 – 2 g a to také většinou vyloučí (Balík et al., 2002). Odhaduje se, že v rozvinutých zemích každý člověk ročně vypustí do kanalizace 1 kg fosforu (Haan, 1980). Je nejčastěji diskutovaným prvkem ve výživě rostlin (Pavlíková et al., 2008).

Fosfor je řazen mezi živiny, což jsou běžné chemické prvky, které mají specifickou a nezastupitelnou úlohu v organismu a nejdou nahradit jinými prvky, nazývají se nezbytné neboli biogenní (Kořenek, 1993). O živinách se dá také říci, že jsou to látky, které přijímá živý organismus, který je potřebuje k projevu všech svých životních funkcí (Vostal, 1994). Funkce živin je stavební a funkční (Neuberg, 1998). V případě zelených rostlin se jedná o látky anorganické a tyto látky jsou živinami převážně až v iontové formě (Vaněk et al., 2012).

Vaněk et al. (2007) zařazuje rostlinné živiny do několika skupin. První makroelementy jsou v rostlinách v rozmezí několik desetin až desítek %, do této skupiny patří fosfor a dále uhlík, kyslík, vodík, dusík, draslík, vápník, hořčík, síra. Druhé mikroelementy jsou většinou s obsahem menším než 0,05 % a patří sem železo, mangan, zinek, měď, bor, molybden, chlor, nikl. Třetí skupinu tvoří prvky užitečné například sodík, křemík, hliník apod., tyto prvky potřebují jen některé rostlinné druhy. Vaněk et al. (2012) dělí živiny také podle pohyblivosti v rostlinách na dobře pohyblivé, kam patří fosfor, na středně pohyblivé a na špatně pohyblivé.

Fosfor ze zemědělských půd může mít významný vliv na životní prostředí, především v případě úniku znečišťuje vodní toky a hluboké podzemní vody (Lewis and MgGechan, 2002). V současnosti je z půdy čerpáno více fosforu než vraceno ve formě hnojiv a posklizňových zbytků, a tak dochází ke snížení půdní úrodnosti a kolísání výnosů. Jednou z příčin poklesu fosforu v půdě je nižší aplikace statkových hnojiv do půdy. Pokles přijatelného fosforu v půdách činí 3 kg P/ha/rok (Vaněk et al., 2008). Ročně je z 1 ha odebráno 10 až 25 kg fosforu různými druhy zemědělských plodin (Balík, 1993).

## 4.2 Fosfor v půdě

Fosfor v půdě se vyskytuje v anorganických i organických sloučeninách (Sharpley, 1995). Nátr (2002) uvádí, že obsah fosforu v půdě tvoří fosfor v půdním roztoku ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  a  $\text{HPO}_4^{2-}$ ), fosfor adsorbovaný (na povrchy anorganických půdních složek), fosfor ve formě amorfních nebo krystalických minerálů a fosfor jako součást půdní organické hmoty. Balík et al. (2002) uvádí, že fosfor je v půdě ve třech formách a to ve formě anorganických sloučenin fosforu, organicky vázaný fosfor a výměně sorbovaný fosfor.

### 4.2.1 Minerální fosfor v půdě

V půdě se fosfor nachází ve formě sloučenin odvozených od kyseliny trihydrogenfosforečné ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ ) (Vostal, 1994). V menší míře jsou to také vazby kyseliny difosforečné ( $\text{H}_4\text{P}_2\text{O}_7$ ) (Vaněk et al., 2012). Jedná se o anorganické fosfátové ionty (anionty)  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  a  $\text{HPO}_4^{2-}$  (Mengel and Kirbky, 1982).  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  převažuje v kyselých půdách a  $\text{HPO}_4^{2-}$  převládá v alkalických půdách (Kulhánek et al., 2009a). Balík et al. (2008) uvádí, že atomy fosforu jsou vždy v oxidovatelné formě a nedochází u nich v půdě k oxidaci ani redukci.

Pro zemědělství je potřeba vědět, kolik se přístupného fosforu nachází v půdě, aby bylo možno určit dávku fosforečných hnojiv (Kara et al., 1997). Obsah veškerého fosforu v půdě je 0,03 – 0,13 % (Macháček et Čermák, 2004). Obsah fosforu v půdním roztoku je od 0,8 do 8 mg  $\text{P.kg}^{-1}$  (Marschner, 1995). V půdním roztoku je obvykle koncentrace fosforu nejnižší (Kulhánek et al., 2009b).

Fosfor přijatelný pro rostliny v půdách vzniká jako důsledek přirozených půdních procesů a jeho původ může být také z dodaných organických a průmyslových hnojiv (Ivanič et al., 1984). Fosfor je do půdního roztoku uvolňován v důsledku rozpouštění stabilnějších fosforečnanových solí nebo v důsledku desorpce (Balík et al., 2008). Pokud je v půdě větší množství fosforu, tak dochází k nižším energetickým ztrátám (Ivanič et al., 1984). Při rovnováze sorpčních procesů je nejvýhodnější pH od 6,2 do 6,5. Po aplikaci organické hmoty do půdy může docházet ke zvyšování pohybu fosforu v půdě (Balík et al., 2008).

Zdrojem fosforu pro rostliny a půdní mikroorganismy jsou primární fosforečné minerály (apatity – nejvýznamnější přirozené zdroje fosforu v půdě), sekundární vysrážené a adsorbované fosfáty, organické sloučeniny fosforu a fosforečná hnojiva. Apatity jsou primární fosforečné minerály, nacházejí se ve všech magmatických horninách, jedná

se o vápenaté sloučeniny tvořené třemi molekulami  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$  a jednou molekulou chloridu, fluoridu nebo hydroxidu vápenatého a podle uvedené molekuly mají příslušný název například chlorapatit (Ivanič et al., 1984).

V půdách slabě kyselých až alkalických převažují dihydrogenfosforečnany vápenaté ( $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ ), hydrogenfosforečnany vápenaté ( $\text{CaHPO}_4$ ) a fosforečnany vápenaté ( $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ ) (Vaněk et al., 2012). V neutrálních půdách jsou to oktakalciumfosfáty ( $\text{Ca}_4\text{H}(\text{PO}_4)_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ), v alkalických půdách hydroxylapatit ( $3\text{Ca}(\text{PO}_4)_2 + \text{Ca}(\text{OH})_2$ ) a v kyselém prostředí variscit ( $\text{Al}(\text{OH})_2\text{H}_2\text{PO}_4$ ) a strengit ( $\text{Fe}(\text{OH})_2\text{H}_2\text{PO}_4$ ) (Vaněk et al., 2007).

Rozpustnost fosforečnanů vápenatých i při stejné hodnotě pH klesá v pořadí: dikalciumfosfát > oktakalciumfosfát > hydroxylapatit > fluorapatit (Balík et al., 2008). Variscit a strengit mají malou rozpustnost z důvodu obsahu hliníku, železa a většina rostlin není schopna přijímat sloučeniny železa (Vaněk et al., 2007). Obecně platí, že čím je vyšší pH půdy a koncentrace vápníku v půdním roztoku, tím snadněji se z dodaných vodorozpustných forem fosforu minerálních hnojiv stávají stabilnější formy (Balík et al., 2008). Je potřeba si uvědomit, že pH půdy ovlivňuje tvorbu solí kyseliny fosforečné, chování fosforu v půdě a dostupnost fosforu rostlinám (Vaněk et al., 2007). V silně kyselých půdách je fosfor poután dvakrát až třikrát víc než v půdách neutrálních nebo alkalických (Ivanič et al., 1984). Starší sloučeniny fosforu jsou méně rozpustné a méně přijatelné pro rostliny (Vaněk et al., 2012).

#### **4.2.2 Organický fosfor v půdě**

Organický fosfor je součástí celkové organické hmoty (Vaněk et al., 2007). Původ organického fosforu je z minerálního podílu fosforu. Ten byl do organických vazeb imobilizován biologickou sorpcí rostlinami a půdními mikroorganismy. Jedná se tedy o fosfor vázaný na humus, zbytky rostlinných a živočišných organismů a půdními mikroby (Ivanič et al., 1984). Na půdách mírného pásu se množství mikrobiálního fosforu pohybuje v rozmezí 5,3 až 72,3  $\mu\text{g}$  fosforu na gram biomasy (Morel et al., 1996). Podíl organického fosforu může být v půdě od 10 do 80 % z celkového obsahu fosforu (Macháček et Čermák, 2004). Na našem území obsahují půdy 11,5 až 55,0 % organického fosforu z celkového obsahu (Ivanič et al., 1984). Půdní organická hmota má obvykle 100 – 300krát vyšší obsah uhlíku než je obsah fosforu. Půdy pod trvalými travními porosty mají vyšší obsah organického fosforu než v orných půdách (Balík et al., 2008).

Největší část z organicky vázaného fosforu představují soli kyseliny inositolhexafosforečné – fytiny a ukazuje se, že jejich původ je mikrobiální (Balík et al., 2008). Předpokládá se, že fytin je potenciálním zdrojem využitelného fosforu pro rostliny (Macháček et Čermák, 2004). Fytin tvoří až 50 % organického fosforu (Vaněk et al., 2007). Z chemického hlediska je málo reaktivní a v půdě se nepohybuje (Ivanič et al., 1984). Kromě fytinu tvoří organickou část fosforu fosfolipidy, nukleové kyseliny, nukleoproteidy, fosforylované lipidy a fulvokyseliny (Tunney et al., 1997). Nacházejí se v kořenové hmotě a do půdy se dostávají posklizňovými zbytky, tedy opadem listů, strništěm, vedlejšími produkty jako sláma, chrást, nať, apod. (Vaněk et al., 2007). Fosforylované lipidy, především trióza a hexóza, jsou v půdě biochemicky nejvýznamnější a nejreaktivnější organické fosforečné sloučeniny nosící mnoho biochemicky využitelné energie, bez které by mnohé reakce v půdě nemohly proběhnout (Ivanič et al., 1984).

Mineralizace organického fosforu, jinak také jednoduchá hydrolyza, je katalyzována fosfatázou. Ta se rozděluje do dvou skupin na fosfatázy kyselé (pH 4 – 6) a fosfatázy alkalické (pH 9 – 11) (Balík et al., 2008). Velkou část organického fosforu imobilizují mikroorganismy do svých těl, po odumření mikroorganismu může být fosfor v procesech mineralizace uvolněn a zpřístupněn pro rostliny a z toho plyne, že má velký význam ve výživě rostlin (Vaněk et al., 2012). Fosfor obsažený v mikrobiální biomase představuje 2 až 5 % z obsahu organického fosforu v půdě. Fosfor obsažený v buňkách mikrobů bývá většinou vyšší v porovnání s obsahem rostlinných pletiv (Balík et al., 2008).

### 4.3 Fosfor v rostlině

Fosfor má pro rostliny nepostradatelný význam při růstu a vývinu (Zapata and Roy, 2004). Patří spolu s draslíkem, vápníkem, hořčíkem mezi prvky, které jsou v rostlinách zastoupeny více než železo a další prvky (Vostal, 1994). Rostliny fosfor přijímají ve formě aniontů kyseliny trihydrogenfosforečné, převážně ve formě  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  a  $\text{HPO}_4^{2-}$  a obsahují v organické i anorganické formě (Pavlíková et al., 2008). Tyto ionty jsou rostlinami přijímány především z minerálních fosfátů (Ivanič et al., 1984).

Většinu celkového fosforu obsaženého v půdách nejsou rostliny schopny přijímat (Vaněk et al., 2007). Z celkového obsahu fosforu v půdě rostliny přijímají 1 až 8 % (Ivanič et al., 1984). Rostliny fosfor přijímají okamžitě pouze z vodorozpustných forem (Neuberg, 1998). I velmi malé koncentrace fosforu obsažené v půdním roztoku jsou rostliny schopny

přijímat (Vaněk et al., 2007). Koncentrace fosforu v půdním roztoku se pohybují v rozmezí  $10^{-4}$  mol/l (velmi vysoké) –  $10^{-6}$  mol/l (deficitní) až na  $10^{-8}$  mol/l u velmi málo úrodných tropických půd (například koncentrace  $10^{-5}$  mol/l to odpovídá 0,31 mg fosforu na litr v půdním roztoku) (Syers et al., 2008). Maximální rychlost, kterou mohou rostliny přijímat fosfor, je mezi 5 až 50 nmol/m/s (Nátr, 2002). Příjem fosforu rostlinami je rovnoměrný během celé vegetace (Vaněk et al., 2012). Více fosforu mají mladá dělivá pletiva oproti pletivům vyvinutým a zestárlým (Ivanič et al., 1984). Sloučeniny fosforu jsou součástí řady reakcí, a to jako donory energie nebo jako strukturní části složitých sloučenin (Pavlíková et al., 2008).

Dostupnost fosforu v půdě pro rostliny ovlivňuje druh půdy, zejména jejich pH a obsah jílu (Coker and Carlton-Smith, 1986). Vaněk et al. (2012) uvádí, že ideálními podmínkami pro příjem fosforu jsou dostatečná vlhkost půdy, příznivá hodnota pH půdy (5,5 – 7), dostatek organických látek v půdě s dobrou biologickou činností a přiměřený obsah přijatelného fosforu v půdě (40 – 80 mg/kg P). O příjmu fosforu rozhodují stavba a hmotnost kořenového systému, mykorhizní asociace a tempo růstu (Tiesen and Moir, 1993). Rostliny obsahují anorganický fosfát, který je v rostlině velmi pohyblivý a ve vyšších koncentracích se nachází v buňkách vykazující vysokou metabolickou aktivitu (Ivanič et al., 1984).

Rostliny neumí přijímat organicky vázaný fosfor (Balík et al., 2008). Organicky vázaný fosfor je rostlinami využit většinou až po jejich mineralizaci. Organické sloučeniny fosforu jsou pestré a jedná se buď o estery kyseliny fosforečné, nebo o fosforylované sloučeniny tedy glycidy a pyrimidinové sloučeniny (Ivanič et al., 1984).

V živých systémech dochází k reakci kyseliny fosforečné s organickými látkami, kdy vznikají organofosfáty (Vaněk et al., 2012). K přeměně organofosfátů na minerální formy v půdě dochází např. u fosforylovaných cukrů velmi rychle a u např. hexalfosfátu mesoinositolu, fytinu velmi pomalu (Kolář et Kužel, 2002). Mezi organofosfáty s esterickou vazbou kyseliny fosforečné patří fosfolipidy, fytin, nukleoproteiny a nukleové kyseliny (Ivanič et al., 1984).

Fosfolipidy jsou deriváty kyseliny glycerofosforečné. Řadí se mezi ně například lecitin a kefalin, které jsou významnou složkou buněčných membrán, jejich molekuly mají hydrofilní i hydrofobní místa, a tak mohou spojovat buněčné struktury. Fytin je ester kyseliny hexafosforečné a inositolu (Ivanič et al., 1984). Nejčastěji je v rostlinách v semenech ve formě soli vápníku a hořčíku a rostliny ho začínají využívat při klíčení (Zelený, 1993). Nukleoproteiny a nukleové kyseliny jsou významné ve výstavbě buněčného jádra, při přenosu dědičných vlastností a rozmnožování rostlin (Ivanič et al., 1984).

Vaněk et al. (2007) uvádí, že stavebními kameny nukleových kyselin jsou nukleotidy plnící řadu funkcí:

- 1) Tvoří molekulovou podstatu genetického kódu, účastní se molekulových mechanismů při přenosu a zpracování genetické informace, jsou to základní stavební kameny nukleových kyselin DNA a RNA, které jsou nositelky dědičnosti.
- 2) Aktivují meziprodukty v řadě biosyntéz např. glukózu v procesu polyglukóz apod.
- 3) Adenosinové nukleotidy jsou součástí důležitých kofaktorů enzymů.
- 4) Neukleosidpolyfosfáty jsou přenašeči energie v biologických systémech – nejvýznamnější a neznámější je adenosintrifosfát (ATP).

Fosforylované glycidy a fosforylované purinové a pyridinové nukleotidy jsou fyziologicky nejvýznamnější a biochemicky nejreaktivnější organofosfáty, které hrají základní úlohu při přenosu energie v buňkách (Ivanič et al., 1984). V organické formě fosforu se na přenosu energie při metabolických reakcích podílejí ATP, NADP (nikotinamidnukleotid fosfát), fosforylované sacharidy Calvinova cyklu a kyseliny fosfoglycerové (Pavlíková et al., 2008).

Pro příjem fosforu je potřeba, aby rostliny měly dostatek energie, jejich zásobárnou jsou makroergické vazby v ATP (adenozintrifosfát) a uvolňuje se pomocí enzymu ATPázy (Vaněk et al., 2012). ATP akumuluje, přenáší a odevzdává metabolickou energii v rostlinném organismu (Ivanič et al., 1984). Pokud rostliny obsahují málo fosforu, tak aktivují v membránách kořenů fosfatázy a přenašeče s vysokou afinitou k fosforečnanům, a tím se zlepší příjem fosforu, dále se zvětší růst kořenů (prostor) na úkor nadzemní biomasy a roste kořenová sekrece, která umožňuje zvýšení přijatelnosti fosforu v rhizosféře (Vaněk et al., 2007). Nezastupitelnou a velmi důležitou úlohu má fosfor v rostlinách v procesu fotosyntézy, dýchání, metabolismu cukrů, tuků i bílkovin a mnoha dalších přeměnách (Ivanič et al., 1984). Podle Neuberga (1998) sušina v rostlině obsahuje 0,1 – 0,5 % fosforu. Ve dvou následujících tabulkách je uvedeno průměrné množství fosforu ve sklizených produktech, na které je tato práce zaměřena (tabulka č. 1) a střední obsah živin v některých zahradních plodinách (tabulka č. 2).



**Tabulka č. 1:** Průměrné množství fosforu ve sklizených produktech (Kunzová, 2009)

Plodina	Produkt	Odběr fosforu kg/t
Brambory	Hlízy	0,5
	Nať	0,2
	Celkem	0,5
Pšenice ozimá	Zrno	3,3
	Sláma	0,9
	Celkem	4,0
Ječmen jarní	Zrno	3,5
	Sláma	1,0
	Celkem	4,1

**Tabulka č. 2:** Střední obsah živin v některých zahradních plodinách (Neuberg, 1998)

Plodina	Část rostliny a doba vegetace	Obsah v sušině (%)		
		N	P	K
Zelí	hlávky – sklizeň	2,90	0,46	3,26
Jahodník	listy – v květu	2,40	0,30	0,70
	plody – sklizeň	1,40	0,69	2,72
Růže	listy	3,35	0,30	2,20
Jabloň	listy – zač. srpna	2,00	0,18	1,40

Fosfor má vliv na výnosy plodin (Schmidt et al., 1997). Rostlina potřebuje nejvíce fosforu na počátku vegetace, v případě nedostatku dochází ke snížení výnosu plodin (Pavlíková et al., 2008). Pro dosažení vysokého výnosu a kvalitní produkce je potřeba, aby rostliny obsahovaly více než 0,4 % fosforu v sušině. Poté co rostlina fosfor přijme, transportuje ho do mladých listů, vegetačních vrcholů, následně květů a poté ho nahromadí v semenech, kde je vázán ve formě fytinu (Vaněk et al., 2007). Plodiny většinou odeberou 20 – 30 kg P/ha. Z půdy si nejméně fosforu vezme ječmen a nejvíce jehličnany, vojtěška, hrách, bob, jeteloviny, hořčice, pohanka a žito (Pavlíková et al., 2008). Podle Hluška (1996) patří mezi plodiny náročné na fosfor květák, fazol, okurka, mrkev, zelí a kapusta, mezi středně náročné patří hrách, kedlubny, salát, petržel, celer, rajčata, cibule, špenát a málo náročné jsou ředkvičky.

Na tvorbu 1 tuny sušiny rostliny připadá 4 – 13 kg fosforu (Balík et al, 2002). Obsah fosforu v kořenech obilovin po odebrání celkového fosforu rostlinou je 15 – 20 %. Příjem fosforu rostlinami se u jednotlivých rostlin liší, např. pšenice ozimá přijme do začátku sloupkování 25 % fosforu, ječmen jarní 46 % fosforu a brambory přijmou do konce června 31 % fosforu (Vostal, 1994). Rostlina obsahuje nejvíce fosforu v generativních orgánech (Ivanič et al., 1984). Mykorrhizní asociace (ektotrofní a endotrofní) pomáhají rostlinám získávat fosfor z velmi těžko dostupných míst v půdě (Pavlíková et al., 2008).

Mezi základní funkce fosforu patří urychlení vývoje, plodnosti a dozrávání rostlin, zvyšuje se u nich odolnost proti nízkým teplotám a zlepšuje se biologická hodnota osiv a sadby (Hlušek et al., 2002) a vývin kořenového systému (Hlušek, 2004). Rostliny mají větší květenství, více kvítků a květů a více semen (Vostal, 1994). Fosfor má příznivý vliv na kvalitu píce a podporuje zastoupení jetelovin v porostu (Královec et al., 1989). Nebezpečným obdobím pro rostliny, kdy mohou mít především nedostatek fosforu, je na počátku vegetace, za chladného a suchého počasí (Vaněk et al., 2007).

Nedostatek fosforu se nejprve projeví na starších částech rostliny a pak teprve na mladších částech (Kováčik, 2007). Rostliny mají díky nedostatku fosforu opožděný růst (Zapata and Roy, 2004), což se může projevit malým a zakrslým vzrůstem (Mengel and Kirbky, 1982). Stonky bývají slabé s malým počtem postranních výhonků (Neuberg, 1998). Kořeny mají pomalý vývoj a tvorba drobných kořínků je malá (Kalina, 2005). Rostliny mají úzké, menší a vzpřímené listy, listy a stébla jsou načervenalá (Pavlíková et al., 2008). Zvýšený obsah glycidů v listech způsobuje vyšší koncentraci antokyanů, které jsou na první pohled vidět červeným a fialovým zbarvením bazálních částí stonků i listů (Vostal, 1994). Toto zbarvení je lépe vidět na spodní straně (Neuberg, 1998). Na starších listech se nedostatek P projeví šedozeleným nebo modrozeleným, zčásti i načervenalým zbarvením (Kalina, 2005). Listy předčasně opadávají (Bizík et al., 1998). Kromě toho mohou být především na okrajích listů žlutohnědé až hnědočervené skvrny ve tvaru půlměsíce (Neuberg, 1998). Generativní vývoj je zpomalen (Vostal, 1994), opylování květů má pomalý průběh (Kalina, 2005) a jejich tvorba je omezena (Sulzberger, 2007). Tyto květy jsou malé, špatně vybarvené, většinou předčasně zasychají a opadávají (Neuberg, 1998). Kvalita plodů a semen je snížena (Sulzberger, 2007). Plody jsou kyselé (Neuberg, 1998) a jejich dozrávání je zpomalené (Kalina, 2005). Obsah chlorofylu v rostlině je nízký (Vostal, 1994). Rostliny jsou více náchylné k infekčním chorobám (Neuberg, 1998). Je snížena odolnost proti mrazu (Vaněk et al., 2007). U obilnin se nedostatek projevuje slabým odnožováním, tvorba květů je omezená a výnosy jsou nízké (Kováčik, 2007).

Rostliny také mohou mít nadbytek fosforu, který může mít škodlivý účinek, ale to se stává zřídka (Neuberg, 1998). U nás se s tímto problémem nesetkáváme. V minulosti k němu docházelo z důvodu vysokého tzv. zásobního nebo melioračního hnojení, například aplikace fosforečných hnojiv na celé období sadu, předzásobní hnojení kukuřice fosforem (Vaněk et al., 2007). Projev nadbytku fosforu spočívá v zabránění příjmu některých kovů tak, že se rozpustné fosforečnany naváží na tyto kovy, dochází ke vzniku nerozpustných sloučenin a na rostlině se projeví nedostatek železa či zinku (Neuberg, 1998). Rostliny předčasně

dozrávají a mají nižší výnosy. Přehnojení fosforem je známé u plodů rajčat, které jsou méně šťavnaté, mají vyšší obsah sušiny a jsou méně chutné (Hlušek et al., 2002).

#### 4.4 Čistírenské kaly

Čistírenské kaly se dají používat jako alternativní zdroje minerálních a organických látek z důvodu poklesu používání průmyslových a statkových hnojiv (Růžek et al., 2000). Čistírenský kal je nevyhnutelný odpad, který vzniká na čistírnách odpadních vod (Nerudová, 1978). Gergelová (2008) uvádí, že čistírenský kal je vedlejší produkt procesu čištění odpadních vod, který je na čistírně přímo upravován.

Také se dá říci, že je to směs látek těžších než voda, které jsou vylučovány při úpravě vody převážně na čistírnách odpadních vod (Rudolf, 2004). Raclavská (2007) publikuje, že čistírenský kal je vodná suspenze tuhých a koloidních částic organických a anorganických látek. Sirotková (2004) uvádí, že kal je biologicky rozložitelný odpad, což je jakýkoliv odpad, který je schopen anaerobního nebo aerobního rozkladu.

Kaly představují pro čistírny odpadních vod problémy, které musí řešit ve směru jejich dalšího zpracování a likvidace (Kusá et Růžek, 2001). Kaly tvoří pro čistírny odpadních vod 40 – 50 % z celkových nákladů (Dohányos, 2004b). Tvoří asi čtvrtinu objemu čištěné odpadní vody a jejich produkce vzrůstá (Raclavská, 2007). Čím je vyčištěná voda kvalitnější, tím více kalu vzniká (Nerudová, 1978). Nerudová (1984) kaly rozděluje na tekuté a odvodněné. Nerudová (1978) uvádí, že tekuté kaly obsahují více NPK živin.

Nestabilizovaný kal se nazývá surový. Ten se dále dělí, podle toho odkud je při čištění odebírán, na primární, sekundární a terciární (z chemického srážení). Primární kal se získává z usazovacích nádrží nebo jiných separačních zařízení, jeho obsah je závislý na složení přitékající odpadní vody a poměrech ve stokové síti a je povahy biologické. Sekundární kal, který bývá označován také jako přebytečný aktivovaný kal nebo přebytečný biologický kal, se získává z dosazovacích nádrží, které patří mezi biologický stupeň čištění (Raclavská, 2007). Jeho obsah ovlivňuje složení surové odpadní vody a technologie čištění a obsahuje mikroorganismy, tedy bakterie, houby, plísňe, kvasinky, prvoky, rozkládající ve vodách organické látky za silného provzdušňování (Rudolf, 2004). Nalézají se v něm nerozložené zbytky organických látek a přebytečná biomasa (Raclavská, 2007).

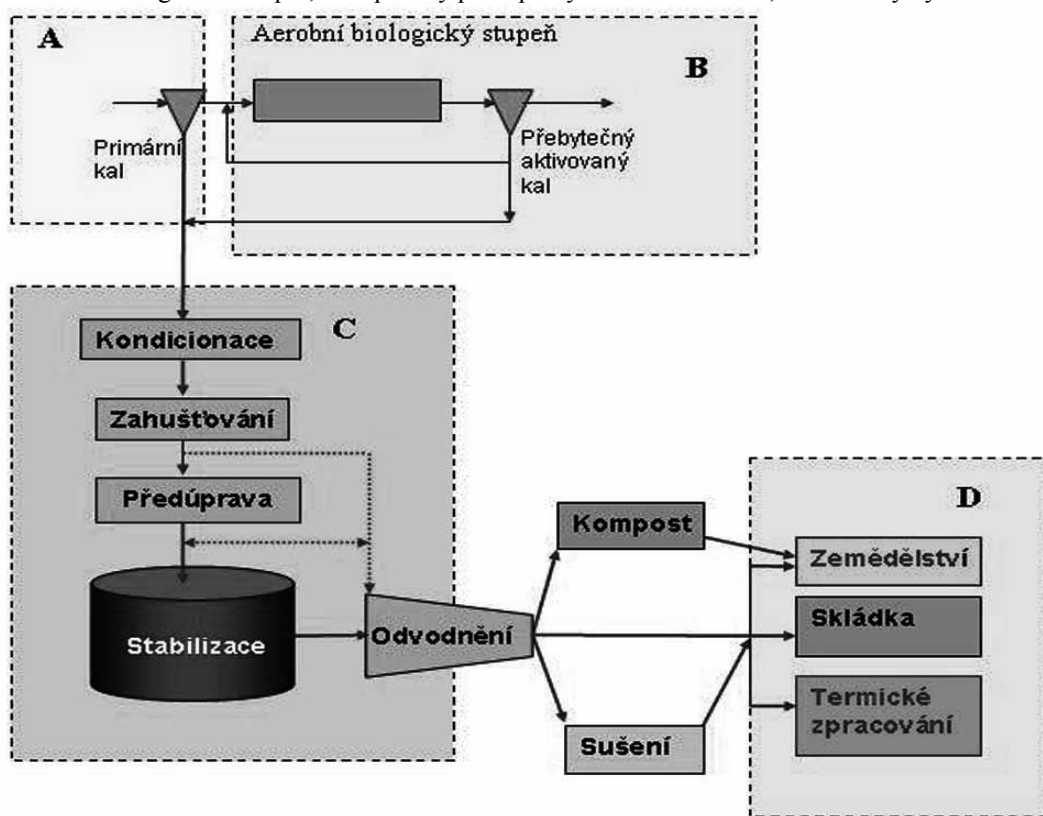
Stabilizovaný kal, nazývaný též jako vyhnílý, je anaerobně zmineralizovaný a po delší době skladování nepodléhá mikrobiálnímu rozkladu (Rudolf, 2004). Cílem je, aby kaly měly

příznivý vliv na životní prostředí, lidské zdraví a jejich využití nebo zpracování bylo udržitelné a ekonomicky únosné (Raclavská, 2007). Z hlediska legislativy se u kalů z čistíren odpadních vod hodnotí biologická rizika, tedy určují se indikátorové organismy, používají se metody na stanovení indikátorových organismů, určují se limity pro hodnocení, stanovují se metody a technologické podmínky pro hygienizaci kalů a stanovuje se způsob jejich využití, likvidace či jiné naložení (Matějů et al., 2004).

O způsobech nakládání s kaly rozhodují místní podmínky dané lokality, fyzikální, chemické a biologické vlastnosti kalů a možnosti konečného řešení problému jejich umístění (Dohányos, 2004a). Kaly by se měly využívat na prvním místě v zemědělství, pokud to není možné tak pro rekultivace nebo by se měly kompostovat nebo spalovat a až jako poslední varianta přichází skládkování (Sirotková, 2004). Než se začnou používat je potřeba snížit množství vody v kalu (zahušťování a odvodňování) (Raclavská, 2007). Spalování kalů probíhá ve spalovnách tuhých komunálních odpadů, teplárnách a elektrárnách, cementárnách a speciálních spalovnách odvodněného kalu (Sponar, 2004). Na obrázku č. 1 je obecné schéma zpracování čistírenského kalu.

**Obrázek č. 1:** Obecné schéma zpracování čistírenského kalu (Dohányos, 2004a)

A - Primární (mechanické) čištění - odstraňování suspendovaných látek, B - snižování produkce biomasy v aerobním biologickém stupni, C - způsoby předúpravy a stabilizace kalů, D - metody využití a likvidace kalů



Raclavská (2007) uvádí, že při zpracování kalů musí být splněny tyto podmínky:

- Musí vyhovovat platné domácí (i mezinárodní) legislativě v oblasti ochrany životního prostředí.
- Musí být akceptovány veřejností.
- Energie a cenné látky z kalů musí být maximálně využity za současné minimalizace nákladů a celkové potřeby energie.
- Po technické stránce musí být spolehlivé a ekonomicky dostupné.
- S ohledem na ochranu životního prostředí musí být přijatelné (emise, využití energie potenciální riziko kalových reziduí pro lidské zdraví apod.).
- Musí být přijatelná infrastruktura a logistické aspekty a také způsob pro zavedení dané technologie.

Kaly je možno použít ke hnojení zemědělsky obhospodařované půdy, protože obsahují živiny vhodné pro rostlinnou výrobu (Petersen, 2003). Dále se v nich nacházejí biologicky aktivní a organické látky (Grécová et al., 1996). Používání čistírenských kalů zlepšuje půdní fyzikální vlastnosti a zvyšuje obsah organické hmoty v půdě (Bouriou et al., 2014). Aplikace kalů do půdy ovlivňuje růst a výnos rostlin (Catroux et al., 1983). Kaly jsou levným zdrojem živin (Petersen et al., 2003).

Tímto způsobem však lze využívat jen takové kaly, které nemají fytotoxický vliv na rostliny, nedochází ke zvýšení obsahu těžkých kovů v rostlinách v množství škodlivém pro konzumenty a po opakované dávce nedochází k nahromadění těžkých kovů v půdě (Nerudová, 1978). Obsah těžkých kovů je potřeba neustále sledovat z důvodů toxicity, karcinogenních, teratogenních a mutagenních účinků, nejnebezpečnější z nich jsou arsen, kadmium, chrom, rtuť a olovo (Sponar, 2004). Kaly se v zemědělství využívají z důvodu vyššího obsahu fosforu a dusíku (Huang et al., 2012). Ve srovnání s chlévským hnojem a NPK se kaly zdají být lepším zdrojem biologicky dostupného půdního fosforu (Kulhánek et al., 2014). Pokud se používají v zemědělství, musí přinášet užitek a nesmí mít negativní vliv na ekosystémy (Raclavská, 2007).

Používání čistírenských kalů na zemědělskou půdu je regulováno (Petersen, 2003). V České republice se jím zabývá vyhláška č. 382/2001 Sb. „o podmínkách použití upravených kalů na zemědělské půdě“. Je potřeba, pokud se kaly aplikují přímo na zemědělskou půdu, provést jejich analýzy v předepsané četnosti (agrochemická hodnota, obsah rizikových látek, mikrobiologie), udělat analýzy vzorků zemin na obsah rizikových prvků ze zemědělské půdy hnojené kaly v intervalu minimálně jednou za 10 let (1. analýza

před aplikací), dodržet vyhlášku č. 382/2001 Sb. včetně opatření na ochranu zdraví při práci s kaly a vést evidenci o aplikaci kalů (Dostál et Kratochvíl, 2004). Veškerá rizika a přínosy spojená s aplikací čistírenských kalů na zemědělskou půdu mají být zdokumentována (Petersen et al., 2003).

Z vyhlášky č. 382/2001 Sb. plynou následující technické podmínky pro používání čistírenských kalů na zemědělské půdě:

*a) nejpozději do 48 hodin od umístění kalů na zemědělskou půdu musí být kaly zapraveny do půdy;*

*b) potřeba dodání živin do půdy na pozemku určeném k umístění kalů musí být doložena výsledky rozborů agrochemických vlastností půd uvedenými v evidenčním listu využití kalů v zemědělství podle přílohy č. 1;*

*c) nesmí se použít více než 5 tun sušiny kalů na jeden hektar v průběhu 3 po sobě následujících let. Toto množství může být zvýšeno až na 10 tun sušiny kalů v průběhu 5 po sobě následujících let, pokud použité kaly obsahují méně než polovinu limitního množství každé ze sledovaných rizikových látek a prvků. Přesné stanovení dávky sušiny se vypočte ze zjištěného obsahu dusíku. Dávka dusíku dodaného v kalech nesmí překročit 70 % celkového potřebného množství dusíku pro hnojenou plodinu. Dávka kalů (množství a doba užití) se řídí i požadavkem rostlin na živiny s přihlédnutím k přístupným živinám a organické složce v půdě, jakož i ke stanovištním podmínkám;*

*d) dávka kalu stanovená podle podmínek uvedených v odstavci c) je na pozemek aplikována v jedné agrotechnické operaci a v jednom souvislém časovém období za příznivých fyzikálních a vlhkostních podmínek;*

*e) minimální obsah sušiny kalu pro tlakové zapravení do půdy radlicovými aplikátory je 5 %, minimální obsah sušiny kalu pro aplikaci mechanickými rozmetadly organických hnojiv je 18 %.*

Pokud se čistírenskými kaly pravidelně hnojí, pak se do půdy zpětně dostávají uhlíkaté látky a půdy mají vyšší obsah okamžité půdní vlhkosti, maximální kapilární kapacitu, pórovitost a sorpční kapacitu (Nerudová, 1984). Pro kaly používané v zemědělství jsou důležité z hlediska dopravy a aplikace obsah sušiny, obsah organické složky (snížení problémů se zápachy), živiny, těžké kovy, organické mikropolutanty, patogeny a pH (Raclavská, 2007). Po aplikaci čistírenských kalů by se na daném pozemku měly pěstovat plodiny náročné na dusík, které ho odčerpají a zhodnotí, např. silážní kukuřice, směsky

na zelenou hmotu, dočasná louka (Nerudová, 1978). Je potřeba, aby byly kaly před použitím na zemědělskou půdu stabilizované a hygienicky nezávadné (Raclavská, 2007).

Hygienizace kalů znamená použití metod, při kterých dojde k usmrcování mikroorganismů (Kusá et Růžek, 2001). Dělí se na tři skupiny. První jsou chemické metody, tedy reakce s chemickými činidly například vápno, druhé jsou fyzikální metody jako například působení teploty, radiace a ultrazvuku a třetí jsou biotechnologické metody, což je souběžný proces stabilizace a hygienizace kalů (Zábranská, 2004). Nerudová (1978) doporučuje aplikaci kalů na zemědělský pozemek v podzimních měsících.

Stabilizovaný kal musí svým složením vyhovovat stanoveným limitům, technickým možnostem zemědělské aplikace a jeho zapracování do půdy, nesmí porušit ochranu zemědělského půdního fondu, chráněných území přírody a krajiny a zákon o vodách (Grécová et al., 1996). Také nesmí působit škody na zdraví lidí i živočichů (Michalová, 2004). Stabilizovaný kal se složením prvků blíží obsahu hnědého uhlí. Podle přílohy č. 2 vyhlášky č. 382/2001 Sb. nesmějí být v půdě, na které mohou být použity čistírenské kaly, překročeny mezní hodnoty koncentrace vybraných rizikových látek, které uvádí tabulka č. 3.

**Tabulka č. 3:** Mezní hodnota koncentrací vybraných rizikových prvků v půdě (ukazatele pro hodnocení půd) v extraktu lučavky královské (mg/kg sušiny) (Příloha č. 2 vyhlášky č. 382/2001 Sb.)

	<b>As</b>	<b>Cd</b>	<b>Cr</b>	<b>Cu</b>	<b>Hg</b>	<b>Ni</b>	<b>Pb</b>	<b>Zn</b>
Běžné půdy	20	0,5	90	60	0,3*	50	60	120
Písky, hlinité písky, štěrkopísky	15	0,4	55	45	0,3*	45	55	105

Podle vyhlášky č. 382/2001 Sb. se na zemědělskou půdu používají pouze kaly, které vyhovují mezním hodnotám koncentrací vybraných rizikových látek a prvků (tabulka č. 4) uvedeným v příloze č. 3 k této vyhlášce a mikrobiologickým kritériím (tabulka č. 5) uvedeným v příloze č. 4 k této vyhlášce.

**Tabulka č. 4:** Mezní hodnoty koncentrací vybraných rizikových látek a prvků v kalech pro jejich použití na zemědělské půdě (ukazatele pro hodnocení kalů) (Příloha č. 3 vyhlášky č. 382/2001 Sb.)

Riziková látka	Mezní (maximální) hodnoty koncentrací v kalech (mg/kg sušiny)
As	30
Cd	5
Cr	200
Cu	500
Hg	4
Ni	100
Pb	200
Zn	2500
PCB (suma 6 kongenerů - 28+52+101+138+153+180)	0,6

**Tabulka č. 5:** Mikrobiologická kritéria pro použití kalů na zemědělské půdě (Příloha č. 4 vyhlášky č. 382/2001 Sb.)

Přístupné množství mikroorganismů (KTJ) v 1 g sušiny aplikovaných kalů			
Kategorie kalů	termotolerantní koliformní bakterie	Enterokoky	<i>Salmonella sp.</i>
I.	< 103	< 103	negativní nález
II.	103 – 106	103 – 106	nestanovuje se

KTJ = kolonie tvořící jednotku

Kategorie I – kaly, které je možno obecně aplikovat na půdy využívané v zemědělství při dodržování ostatních ustanovení této vyhlášky.

Kategorie II – kaly, které je možno aplikovat na zemědělské půdy určené k pěstování technických plodin, a na půdy, na kterých se nejméně 3 roky po použití čistírenských kalů nebude pěstovat polní zelenina a intenzivně plodící ovocná výsadba, a při dodržení zásad ochrany zdraví při práci a ostatních ustanovení vyhlášky.

Kaly lze charakterizovat podle fyzikálních (základní informace o upravitelnosti kalů), chemických (přítomnost živin a toxických nebo nebezpečných složek), biologických (informace o mikrobiální aktivitě a organické složce kalu – přítomnost patogenů a virů) parametrů a ekotoxicity (požadavky vyhlášky č. 294/2005 Sb.). V čistírenských kalech jsou z hlediska biologického sledovány patogenní organismy (bakterie, viry, prvoci a helminti) (Raclavská, 2007). Tyto patogenní organismy jsou nebezpečné pro lidi, zvířata a pro ostatní složky životního prostředí (Matějů et al., 2004).

Složení kalů ovlivňuje řada okolností, například způsob čištění, množství a druh průmyslových odpadních vod napojených na kanalizační čistírnu, úroveň a životní styl obyvatelstva, disciplinovanost všech uživatelů stokové sítě (Nerudová, 1978).



Raclavská (2007) uvádí, že kaly jsou složeny:

- Z netoxických organických látek (cukry, tuky, bílkoviny, vosky, huminové látky).
- Ze sloučenin dusíku a fosforu.
- Z toxických látek, kam patří těžké kovy (zinek, olovo, měď, chrom, nikl, kadmium, rtuť, arsen), PCB, PAU, PCDD/F, EOX, uhlovodíky C<sub>10</sub>-C<sub>40</sub>, pesticidy, alkylsulfofenoly, polyfenoly.
- Z mikroorganismů z čistírenského procesu a jiných včetně patogenních.
- Z minerálů (křemen, živec, karbonáty, vivianit, Fe-oxidy).
- Z vody.

Čistírenské kaly jsou bohaté na fosfor (Li et al., 2014). Tento fosfor je méně rozpustný oproti dodávaným minerálním hnojivům (Raclavská, 2007). Fosfor z čistírenských kalů je dostupný pro většinu pěstovaných plodin v rozsahu 60 – 100 % (Bunting, 1963). V prvním roce rostliny využijí 50 – 80 % fosforu (Raclavská, 2007). Fosfor v čistírenských kalech je nejlépe dostupný pro špenát a pro jilek vytrvalý (Coker and Carlton-Smith, 1986). V tabulce č. 6 je uveden podíl živin v produkci kalů v ČR za rok 2000 a v tabulce č. 7 průměrné obsahy rizikových prvků v kalech z čistíren odpadních vod.

**Tabulka č. 6:** Podíl živin v produkci kalů v ČR (rok 2000 – 207 000 tun sušiny za rok) (Michalová, 2004)

Organické látky	Dusík celkový	Fosfor celkový	Draslík	Vápník	Hořčík	Ostatní
45 %	4,4 %	2,7 %	0,3 %	5,8 %	0,5 %	41,3 %

**Tabulka č. 7:** Průměrné obsahy rizikových prvků v kalech z ČOV (mg.kg<sup>-1</sup> sušiny) (Raclavská, 2007)

	Pb	Cd	Cr	Hg	Ni	Zn	Cu	As
ČR	103	3,2	161,8	3,8	44	1478	236	13

Prvky obsažené v kalech se do půdy uvolňují pozvolna a toto uvolňování může být ovlivněno intenzitou a způsobem hnojení některými průmyslovými hnojivy, dále půdními vlastnostmi, teplotami a srážkami, intenzitou obhospodařovaných pozemků, skladbou

pěstovaných plodin. V některých kalech se vyskytuje větší množství příměsí, které jsou pro použití kalů nežádoucí, mohou kontaminovat biotické prostředí, snižovat hnojivý efekt nebo ztěžovat obdělávání pozemku. Mohou obsahovat například minerální oleje, písek a semena plevelů (Nerudová, 1984).

## **4.5 Další organická hnojiva**

Organická hnojiva neboli statková jsou velice důležitá pro udržení a zlepšení půdní úrodnosti (Hlušek, 2004). Jejich výroba probíhá ve většině případů v daném zemědělském podniku (Vaněk et al., 2012). Jejich působení je pozvolné a dlouhodobé (Bartoš et al., 2000). Mají velký objem, vysoký obsah vody (hnůj cca 75 %), nízkou koncentraci živin a jsou významným zdrojem organických látek, energie a živin pro rostliny a půdní mikroflóru (Vostal, 1994). Dále v každém roce nahrazují v půdě cca 40 % mineralizovaných organických látek, mají pozitivní vliv na agrochemické, fyzikální a mikrobiální přeměny v půdě, v průměru se každým rokem dostane do 1 hektaru obhospodařované půdy cca 12 kg fosforu ( $P_2O_5$ ), v případě dodržování systému hnojení a celé agrotechniky se můžou stát i významným prostředkem ochrany životního prostředí (Bizík et al., 1998).

Tato hnojiva se nedají ničím nahradit (Neuberg, 1998). Jejich použitím se do půdy dostávají rostlinné živiny (makroelementy i mikroelementy), organické látky, mikroorganismy, stimulační, růstové a hormonální látky (Vaněk et al., 2007). Jsou významným zdrojem fosforu (Kulhánek et al., 2004). Statková hnojiva mají pozitivní vliv na zvýšení celkového obsahu dusíku v půdě (Nimje and Seth, 1986). Zvyšují výnos plodiny, zlepšují půdní vlastnosti a obsah makroprvků v půdě (Barzegar et al., 2002). V současné době je organických hnojiv nedostatek (Vaněk et al., 2012). Organická hnojiva se dělí na hnůj, močůvku, kejdu, komposty, posklizňové zbytky a zelené hnojení (Bizík et al., 1998). Pokud se hnojí slámou, jsou výnosy poměrně nízké (Thomsen and Jensen, 1994).

### **4.5.1 Chlévský hnůj**

Chlévský hnůj patří mezi organická hnojiva (statková) (Richter et Římovský, 1996). Toto hnojivo je jedno z nejdůležitějších, nejvyužívanějších, tradičních a nejdostupnějších, jehož účinek je zúrodňovací a hnojící (Neuberg, 1998). Vzniká zušlechtěním chlévské mrvy, která je složena ze steliva, tuhých a tekutých výkalů hospodářských zvířat se zbytky krmiva

(Richter et Římovský, 1996). Kalina (2005) chlévskou mrvku definuje jako směs pevných a zčásti tekutých výkalů domácích zvířat a steliva. Podle Vostala (1994) je zrání neboli přeměna chlévské mrvy v hnůj chemicko-biologický proces (kvašení, hnití), kdy vznikají látky jiného kvalitního složení.

Je zapotřebí, aby bylo uchováno největší množství organických látek a živin a aby byl udržen a zvýšen počet mikroorganismů (Richter et Římovský, 1996). Obecně lze říci, že aplikace hnoje zvyšuje kvalitu půdy (Shah, 2013). Organické látky v hnoji zlepšují fyzikální vlastnosti půdy tím, že tvoří drobnohrudkovité struktury, dále zlepšují chemické vlastnosti půdy, zvyšují sorpční kapacitu a pufrovitost, zlepšují vodní poměry půdy, podporují mikrobiální život v půdě a zvyšují využití živin z průmyslových hnojiv (Citak and Sonmez, 2011). Maeder et al. (2002) publikují, že chlévský hnůj hraje přímou roli v růstu rostlin jako zdroj všech potřebných makro a stopových prvků v dostupné formě během mineralizace, zlepšuje fyzikální a fyziologické vlastnosti půd.

Za aerobních podmínek jsou organické látky odbourávány rychleji než za anaerobních, a tak dochází k velkým ztrátám organických látek a živin (fosfor 10 %) (Vostal, 1994). V případě omezeného přístupu vzduchu, nedochází k úplnému odbourání organických látek a to znamená, že vzniká více metanu, který způsobuje rozklad organických látek na oxid uhličitý, vodu, čpavek a popeloviny (Richter et Římovský, 1996). Vzduch se z hnoje dá vytěsnit tak, že hnůj vrstvíme do výšky nejméně 3 metry (Vaněk et al., 2007). Chlévská mrva by při uložení měla být v hromadách krechovitěho tvaru (4 m) nebo v bloku podle bočních stěn hnojiště (4 nebo 6 m) a na výšku by měla mít 4 až 6 m (Škarda, 1989).

Bizík et al. (1998) publikuje, že rozklad hnoje má tři stupně:

- Čerstvý a slabě rozložený - sláma je v původní formě a má určitou pevnost.
- Polorozložený - barva slámy je tmavohnědá, není už tak pevná a lehce se trhá, hmotnost hnoje je o cca 50 % lehčí než původní.
- Vyzrálý - sypká, silná, jednotná hmota, která ztratila cca 75 % původní hmotnosti.

Hnojiště má různé umístění, druh a velikost, což je dáno počtem chovaných zvířat, konkrétní potřebou hnoje k hnojení a finančními prostředky na jeho vybudování (Richter et Římovský, 1996). Je potřeba se o hnůj starat, tedy vrstvením do bloků, omezit vliv povětrnosti malým povrchem skladovaného hnoje během zrání, z důvodů ztrát, které by při splnění těchto podmínek neměly překročit 30 % (Vaněk et al., 2007). Velký vliv

na množství a kvalitu hnoje má druh a stáří zvířat, složení krmiva a způsob hospodaření (Werner, 1994). Chlévská mrva by měla být uložena na hnojišti 6 měsíců, pokud se hnojí hnojem dvakrát do roka, nebo 10 měsíců v případě hnojení hnojem jednou do roka (Škarda, 1989).

Podestýlkou může být sláma ozimů (nejlépe řezná na 15 – 20 cm), rašelina, piliny, listí (Richter et Římovský, 1996). Z celkového množství krmiva se do hnoje dostává cca 80 % fosforu (Bizík et al., 1998). Výhody řezané slámy jsou, že oproti neřezané pojme více výkalů, dochází k menším ztrátám dusíku, lepší zrání na hnojišti, lepší klima ve stáji (Vaněk et al., 2007). Koňský hnůj je nejkvalitnější (Richter et Římovský, 1996). Kvalita hnoje se může zlepšit přidávkem fosforu při naskladňování mrvy na hnojišti (10 – 20 kg fosforečného hnojiva na 1 t mrvy) a přidávkem zeminy (10 %) (Vaněk et al., 2007). Drůbeží hnůj obsahuje po porovnání s jinými hnoji nejvíce fosforu a objevuje se jednou z možností, že by mohl být využit pro zásobování fosforu (Materechera and Morutse, 2009). Hlavním zdrojem hnoje ve světě je skot z důvodu velkého počtu a velkého objemu denního vylučování (Shah, 2013).

Chlévský hnůj, který je dobře vyzrálý, má tmavou barvu, jedná se o snadno rýpatelnou hmotu, která je v povrchových vrstvách hnědočerná a ve spodních nazelenalá a když přijde do styku se vzduchem, tak rychle černá. Je pro něj typický zápach slabého amoniaku. V hnoji jsou vidět zbytky steliva. Hnůj je složen kromě N, P, K, Ca a Mg i z ostatních makrobiogenních i mikrobiogenních prvků. V hnoji se nachází poměr uhlíku k dusíku 20 - 30 : 1, pokud je tento poměr užší (17 : 1 a méně) jedná se o kvalitní hnůj, pokud je 24 : 1 a více je hnůj méně kvalitní. V hnoji je obsaženo 70 % organického a 30 % amoniakálního dusíku. Dále obsahuje mikroorganismy (1 – 2 % ze sušiny), některé biologicky aktivní látky (auxiny, enzymy aj.) (Richter et Římovský, 1996). V tabulce č. 8 je uvedeno průměrné složení chlévského hnoje v %.

**Tabulka č. 8:** Průměrné složení chlévského hnoje v % (Richter et Římovský, 1996)

Ukazatel	Skot	Koně	Ovce	Drůbež
Sušina	24,0	25,0	25,0	31,0
Org. látky	17,0	20,0	20,0	25,0
N celkový	0,48	0,65	0,85	2,80
P	0,11	0,13	0,14	1,25
K	0,51	0,52	0,66	1,23
Ca	0,37	0,21	0,25	0,25 - 1,00
Mg	0,08	0,11	0,12	0,06 - 0,08

Hnojem je lépe hnojit okopaniny, jednoleté pícniny, některé druhy olejnin a zeleniny, vytrvalé kultury. Hnojení se provádí na podzim z důvodů slehnutí půdy a rozložení hnoje (část) (Neuberg, 1998). Na lehčích půdách je cyklus hnojení 2 - 3letý a na těžších 3 - 4letý (Balík, 1993). Nejvíce živin se uvolní v prvním roce hnojení (Bizík et al., 1998). Tabulka č. 9 obsahuje průměrné využití živin z hnoje (% celkového obsahu).

**Tabulka č. 9:** Průměrné využití živin z hnoje (% celkového obsahu) (Vaněk et al., 2007)

<b>Živina</b>	<b>1. rok</b>	<b>2. rok</b>	<b>3. rok</b>
<b>Dusík</b>	25	15	5
<b>Fosfor</b>	15	10	5
<b>Draslík</b>	40	15	10

Optimální dávka je 30 – 40 t hnoje skotu na 1 ha (Neuberg, 1998). Dávky hnoje se u obilovin pohybují okolo 20 t na hektar, okopanin 35 – 45 t na hektar a kukuřice 30 – 35 t na hektar (Balík, 1993). U zeleniny jsou dávky chlévského hnoje 35 – 45 t na hektar (Hlušek, 2004). Poté co je hnůj rovnoměrně rozmetán, je potřeba ho ihned zapravit orbou do půdy, jinak dochází ke ztrátám na hnojivých hodnotách a na dusíku (Bartoš et al., 2000). Předpisy uvádí, že je povinnost hnůj zapravit do 48 hodin, na půdy přesycené vodou, promrzlé hlouběji než 8 cm a pokryté vrstvou sněhu více než 5cm je zakázána aplikace hnojiv (Vaněk et al., 2007). V tabulce č. 10 jsou uvedeny ztráty hnoje v závislosti od doby jeho zapravení.

**Tabulka č. 10:** Ztráty hnoje v závislosti od doby jeho zapravení (Bizík et al., 1998)

<b>Doba zaorání</b>	<b>Ztráta účinku hnoje v %</b>
Ihned po rozhození	Stopy
Po 6 hodinách	16
Po 1 dni	21
Po 4 dnech	36

## 4.6 Minerální hnojiva

Minerální hnojiva, jinak také označovaná jako průmyslová a koncentrovaná, doplňují hnojiva organická (Richter et Hlušek, 1996). Tato hnojiva jsou vyráběna v chemickém průmyslu (Bizík et al., 1998). Kromě toho se na jejich výrobě podílí i další hospodářské úseky, tedy stavebnictví, hutnictví apod. (Vaněk et al., 2007). Jedná se o látky, které se dodávají do půdy a rostlinám poskytují látku nebo látky, které jsou nezbytné pro jejich vývin. Po chemické stránce se jedná o jednoduché sloučeniny nebo o směsi těchto sloučenin, složitější sloučeniny se používají minimálně (Richter et Hlušek, 1996).

Tato hnojiva jsou velice významná, protože oproti organickým hnojivům mají podstatně vyšší obsah jedné či více živin (Kalina, 2005). Látky, které obsahují, ovlivňují půdní reakci, rozhodují o možnostech jejich použití v praxi (sírany aj.), zvyšují výnosy plodin a také obsahují i některé mikrobiogenní prvky nezbytné pro výživu rostlin. Kromě vyššího výnosu u hlavního produktu, se zvyšuje výnos i u vedlejšího produktu. Tato hnojiva působí v půdě více let (Richter et Hlušek, 1996). Jejich výroba je z přírodních surovin (Vaněk et al., 2007). Kalina (2005) průmyslová hnojiva rozděluje na dusíkatá, fosforečná, draselná, hořečnatá, vápenatá, s obsahem síry a vícesložková (dvojitá, plná, speciální).

### 4.6.1 Fosforečná hnojiva

Fosforečná hnojiva patří mezi hnojiva jednosložková (Richter et Hlušek, 1996). Hlavní živinou je fosfor, který se v těchto hnojivech nachází ve formě dihydrofosforečnanů, hydrofosforečnanů a fosforečnanů vápenatých (Bizík et al., 1998). Fosforečná hnojiva se používají od druhé poloviny 18. století a jako prvním zdroje fosforu sloužil popel z kostí a mleté kosti (Ivanič et al., 1984). Na našem území byl superfosfát prvním průmyslově vyráběným hnojivem a jeho výroba probíhá od roku 1861 (Tlustoš et al., 2008).

Jako primární zdroj fosforu, který slouží k výrobě průmyslových hnojiv, se staly přírodní fosfáty (Ivanič et al., 1984). Vyrábějí se z fosfátových hornin, které se nacházejí na různých místech planety (Tlustoš et al., 2008). Předpokládá se, že fosfátové zásoby budou vyčerpány za 90 až 130 let (Li et al., 2014).

V přírodě je více než 200 nerostů, které obsahují fosfor, ale jen z některých se dá izolovat fosfor a jeho sloučeniny vhodné k výrobě hnojiv (Ivanič et al., 1984). Fosfáty se vyskytují buď jako fosfority (z 80 – 90 % se podílely na výrobě fosforečných hnojiv), nebo

apatity (na výrobě fosforečných hnojiv se podílely z 10 – 20 %) (Tlustoš et al., 2008). Naleziště apatitu jsou na poloostrově Kola, ve Švédsku, Finsku, Norsku, Kanadě, Vietnamu, Brazílii a jinde (Ivanič et al., 1984). Aplikování fosfátů je nejlépe do půdy s  $\text{pH} < 5,5$ , kde je nízká koncentrace přístupných vápenatých iontů, nízká zásoba přístupného fosforu, vysoký obsah organické hmoty a vyšší vlhkost (Tlustoš et al., 2008).

Pokud mají být fosfority účinné ve výživě rostlin, je potřeba, aby měly správnou strukturu, přiměřený obsah flóru a odpovídající  $\text{pH}$  půdy, do níž jsou aplikovány (kyselé nebo mírně kyselé půdy) (Ivanič et al., 1984). Tato hnojiva nejvíce vyhovují bobovitým rostlinám (leguminosam), víceletým travám, dřevinám a řepce. Fosforečná hnojiva mohou obsahovat těžké kovy a některé radionuklidy (uran a jeho rozkladné nuklidy) a záleží to na typu fosfátů, na nalezišti a na způsobu jejich zpracování. Obsah uranu se pohybuje v rozmezí  $3 - 400 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  (Tlustoš et al., 2008). Naleziště fosforitů se nachází v oblastech severoafrických (Maroko, Alžír, Tunis, Egypt), afrických (Jihoafrická republika, Západní Sahara, Senegal a Togo), severoamerických a středoamerických (USA, Mexiko, Antily), evropských (Rusko, Belgie, Francie, Polsko), asijských (Kazachstán, Čína, Indie, Severní Korea, Vietnam, Mongolsko), blízkého a středního východu (Izrael, Jordánsko, Sýrie), tichého a indického oceánu (Ivanič et al., 1984). Těžba fosfátů se v posledních deseti letech zvýšila o 16 %, což je okolo 22 milionu tun čistého fosforu (Tlustoš et al., 2008).

Fosfáty se chemicky zpracovávají třemi způsoby, první je rozklad fosfátů minerálními kyselinami, druhý je elektrotermická výroba elementárního fosforu a jeho další zpracování na kyselinu fosforečnou a třetí je termické zpracování fosfátů (Ivanič et al., 1984).

Bizík et al. (1998) dělí fosforečná hnojiva podle různé rozpustnosti fosforu na hnojiva:

- S fosforem rozpustným ve vodě (superfosfáty, dvojitésuperfosfáty, fosforečnany amonné a fosforečnan draselný).
- S fosforem rozpustným v citranu amonném (citrofosfáty, metafosfát vápenatý a draselný, termofosfáty).
- S fosforem rozpustným ve 2% kyselině citronové (Thomasova moučka).
- S fosforem rozpustným v silných minerálních kyselinách (mleté fosfáty a fosforitová moučka).

Fosforečná hnojiva používaná u nás jsou superfosfát jednoduchý, superfosfát trojitý, hyperfosfát, hyperkorn + magnesium (26 + 3), dopofos, dikalciumfosfát, Thomasova moučka.

V superfosfátu jednoduchém je obsažen fosfor (7,5 – 8,5 % fosforu) ve vodorozpustné formě  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ , jeho výroba probíhá rozkladem mletých fosfátů kyselinou sírovou, po vyzrání je sypký, nemazlavý, bez hrudek a ztvrdlých kusů a neměl by obsahovat více než 12 – 15 % vody (Richter et Hlušek, 1996). Superfosfát jednoduchý se dále rozděluje podle struktury vyrobeného hnojiva na superfosfát práškový a granulovaný (Balík, 1993). Patří sem také DC Superphosphat (Richter et Hlušek, 1996).

Superfosfát práškový je bělavě šedý až šedohnědý kyprý prášek (Neuberg, 1998). Má typicky nakyslý zápach, jeho vlhkost by měla být mírně vlhká (nemazlavý), neměl by se spěkat a tvořit hrudky (Ivanič et al., 1984). Jeho výroba je ve dvou druzích, jeden je superfosfát Kola (obsah 7,9 % fosforu, asi 20 % vápníku) a druhý je superfosfát Afrika (obsah 6,6 % fosforu, asi 20 % vápníku) (Richter et Hlušek, 1996).

Superfosfát granulovaný tvoří granule velikosti 1 – 4 mm (Macháček et Čermák, 2004). Tyto granule mají šedou až šedohnědou barvu (Neuberg, 1998). Je pro něj charakteristický nakyslý zápach a obsahuje sádro (vysoký obsah) (Vaněk et al., 2007). Vyrábí se z vyzrálého práškového superfosfátu (Richter et Hlušek, 1996). Toto hnojivo lze použít ke všem plodinám, hnojí se jím při předset'ové přípravě a zvýšení účinnosti je kombinace s organickým hnojením (Vostal, 1994). Výhodou tohoto hnojiva je lepší manipulace, práce je hygieničtější a agronomická účinnost je vyšší (Richter et Hlušek, 1996). Na pozemky s pH nižším než 5,5 se superfosfáty nedávají (Kalina, 2005). Superfosfát granulovaný má opět dva druhy a to superfosfát Kolu a superfosfát Afriku. Superfosfát Kola obsahuje 8,36 % fosforu, asi 20 % vápníku, 9,5 % síry a 2 % dusíku. Superfosfát Afrika obsahuje 7,9 % fosforu, asi 20 % vápníku, 9,5 % síry a 2 % dusíku. DC Superphosphat je granulovaný a používá se k základnímu hnojení rostlin (Vostal, 1994).

Superfosfát trojitý obsahuje 20,2 % fosforu (85 % fosforu je rozpustných ve vodě a 15 % ve 2% kyselině citrónové) (Vostal, 1994). Svými vlastnostmi se shoduje se superfosfáty jednoduchými (Neuberg, 1998). Všechn fosfor je ve vodorozpustné formě (Vaněk et al. 2007). Není vhodné používat na půdy, kde dochází k výrazně kyselé půdní reakci (Vostal, 1994). Na kyselé půdy se používají převážně superfosfáty granulované (Bizík et al., 1998).

Hyperfosfáty se získají z fosforitů jemným mletím, fosfor v nich obsažený je rozpustný ve 2% kyselině citrónové a obsahují přibližně 13 % fosforu, 0,5 % hořčíku a mikroelementy (měď, mangan, bór a zinek) (Richter et Hlušek, 1996). Vyskytuje se ve formě sypkého prášku nebo granulí (šedá až hnědá barva) a ve vodě je nerozpustný (Neuberg, 1998).



Hyperkorn + magnesium (26 + 3) obsahuje 26 %  $P_2O_5$ , 3 % MgO, drobné mikroelementy (mangan, zinek, molybden a bór) a minimálně 50 % CaO, získáme ho granulováním měkkých fosfátů (Richter et Hlušek, 1996; Vaněk et al., 2007). Nejvýhodnější je do vlhčích oblastí, kde jsou kyselé půdy (Vostal, 1994).

Dopofos je směs fosforečnanů sodných, vápenatých, železitých, hlinitých (práškové hnojivo), také obsahuje hydroxidy, fluoridy a sírany vápníku, železa a hliníku a vzniká jako vedlejší produkt při odvodňování kalů ve výrobě sodných fosforečných solí. Obsahuje 14,5 %  $P_2O_5$  a 7 % sodíku (Richter et Hlušek, 1996).

Dikalciumpfosfát obsahuje 15,4 – 16,7 % fosforu, okolo 30 % oxidu vápenatého. Jedná se o velmi jemný prášek (Richter et Hlušek, 1996).

Podle Ivaniče et al. (1984) je Thomasova moučka nápadně těžký tmavošedý prášek, který obsahuje 6 – 7,5 % fosforu, 32 – 36 % vápníku, 1,2 – 2,4 % hořčíku, 3 – 4 % křemíku, 4,5 – 6 % manganu, 3,9 – 4,7 % železa a může obsahovat stopy dalších prvků. Vzniká při výrobě oceli získané z rud obsahujících fosfor. Vaněk et al. (2007) uvádí, že její výroba začala v sedmdesátých letech 19. století.

O tom, které fosforečné hnojivo použít a efektivně využít fosfor, rozhoduje konkrétní fosforečné hnojivo, tedy dávka, forma fosforu (rozpuštěnost ve vodě apod.), forma hnojiva (prášková, granulovaná), chemické vlastnosti. Kromě konkrétního hnojiva jsou to půdní vlastnosti, způsob zapravování hnojiva, vlastnosti hnojené plodiny. Půdní vlastnosti se týkají půdní reakce (pH), teploty a vlhkosti půdního prostředí (Richter et Hlušek, 1996). Je potřeba zapravovat fosforečná hnojiva do celého orničního profilu (Ivanič et al., 1984). Zapravování hnojiva je vhodné provádět společně s organickými hnojivy a ihned po aplikaci pomocí kultivačního nářadí nebo orbou (Richter et Hlušek, 1996).

#### **4.6.2 Vícesložková hnojiva**

Tato hnojiva obsahují dvě a více hlavních živin (Neuberg, 1998). Obsah jednotlivých živin se pohybuje v širokém rozmezí (Bizík et al., 1998). Jejich výroba je především v pevné formě (granulované) a v této formě by měla být zapravena do půdy z důvodu lepšího využití rostlinami (Vostal, 1994). Výhoda těchto hnojiv se nalézá v rovnoměrném zastoupení živin v granulích umožňující stejnou aplikaci, fyzikální vlastnosti jsou příznivé, jednoduchá hnojiva se nemíchají. Nevýhoda u těchto hnojiv se nalézá v konstantním poměru živin a z toho vyplývá, že na trhu se nachází celá škála různých výrobků (Richter et Hlušek, 1996).

Fosfor v hnojivech se nachází ve formě vodorozpustné, někdy citrátově rozpustné (Vostal, 1994).

Podle pěstované plodiny, plánované úrody a zásoby živin v půdě se určuje, jaké hnojivo bude použito a jeho dávka (Bizík et al., 1998). Nejvhodnější aplikace hnojiv na pozemek je konec léta a podzim a je potřeba, aby byly aplikovány před organickými hnojivy nebo společně s nimi (Vaněk et al., 2012).

Richter et Hlušek (1996) tato hnojiva rozdělují na:

- Podle počtu živin na dvousložková, třísložková, vícesložková a speciální.
- Podle způsobu výroby na smíšená a kombinovaná.
- Podle skupenství tuhá a kapalná.

## 5 MATERIÁL A METODY

Diplomová práce se zabývá experimentem, který 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 Praha – Suchdol, dále jen Suchdol). Půdně-klimatické charakteristiky jsou patrné z tabulky č. 11. Na parcelkách byly pěstovány v tříhonném osevním sledu tyto plodiny: brambory, ozimá pšenice a jarní ječmen (odrůdy jsou uvedeny v tabulce č. 12).

**Tabulka č. 11:** 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)	7,0	9,1	8,2
Průměrný roční úhrn srážek (mm)	665	495	573
Půdní typ	kambizem	černozem	hnědozem
Půdní druh	hlinitopísčitá	hlinitá	jílovitohlinitá
pH <sup>1)</sup>	5,1	7,5	5,9
P (mg/kg) <sup>2)</sup>	77 (±10)	74 (±9)	87 (±11)
K (mg/kg) <sup>2)</sup>	238 (±47)	209 (±18)	214 (±29)
Ca (mg/kg) <sup>2)</sup>	1625 (±187)	7803 (±1760)	2156 (±251)
Mg (mg/kg) <sup>2)</sup>	112 (±14)	209 (±16)	240 (±24)

<sup>1)</sup> Stanoveno 0.01 mol/l CaCl<sub>2</sub>, 1:10 w/v

<sup>2)</sup> Průměrné základní hodnoty stanovené metodou Mehlich 3 (rok 1996)

**Tabulka č. 12: 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	Ditta	Alana	Calgary	Ditta	Alana	Jersey
2007	Ditta	Alana	Calgary	Ditta	Alana	Jersey
2008	Ditta	Alana	Calgary	Ditta	Alana	Jersey
2009	Ditta	Alana	Calgary	Ditta	Alana	Calgary
2010	Ditta	Alana	Calgary	Ditta	Alana	Calgary
2011	Ditta	Alana	Calgary	Ditta	Alana	Calgary
2012	Ditta	Alana	Xanadu	Ditta	Alana	Xanadu
2013	Ditta	Alana	Xanadu	Ditta	Alana	Xanadu
2014	Ditta	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. 13. 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. 13:** 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 <sup>1)</sup>	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 z každého ukončení cyklu osevního postupu, tj. z let 1999, 2002, 2005, 2008 a 2011. Po provedení analytických stanovení byly výsledky vyhodnoceny statisticky v programu Microsoft Office Excel 2007 a Statistica 12.1.

## 5.1 Analytická stanovení

### 5.1.1 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.

### 5.1.2 Obsah fosforu stanovený metodou Mehlich 3

Ke stanovení obsahu přístupného fosforu byl použit extrakční roztok Mehlich 3 (Mehlich, 1984) složený z  $\text{CH}_3\text{COOH}$  (0,2 mol/l),  $\text{NH}_4\text{F}$  ( $c=0,015$  mol/l),  $\text{HNO}_3$  ( $c=0,013$  mol/l),  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  ( $c=0,25$  mol/l) a EDTA ( $c=0,001$  mol/l). Poměr zeminy

a vyluhovadla činil 1:10 (10 g 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. Extrakty byly analyzovány na obsah fosforečnanů na přístroji SKALAR SAN<sup>PLUS</sup> SYSTEM<sup>®</sup>.

### **5.1.3 Měření obsahu fosforu ve výluhu**

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

## 6 VÝSLEDKY

Tato část diplomové práce se zabývá výsledky, ke kterým se analytickými stanoveními z jednotlivých stanovišť (Humpolec, Hněvčeves, Suchdol) dospělo. Hodnotí se zde vodorozpustný (vodný výluh) a mobilní fosfor (Mehlich 3), tyto dvě frakce fosforu jsou hodnoceny zvlášť. Změny obsahu fosforu jsou zde uvedeny v období 15 let, tj. 5 osevních cyklů. Veškeré hodnoty fosforu jsou uváděny v mg/kg. Výsledky jsou prezentovány formou grafů. Z důvodu uvedení frakce fosforu v nadpise příslušných kapitol se v následném textu uvádí pouze slovo fosfor.

### 6.1 Změny obsahu vodorozpustného a mobilního fosforu na nehojených variantách

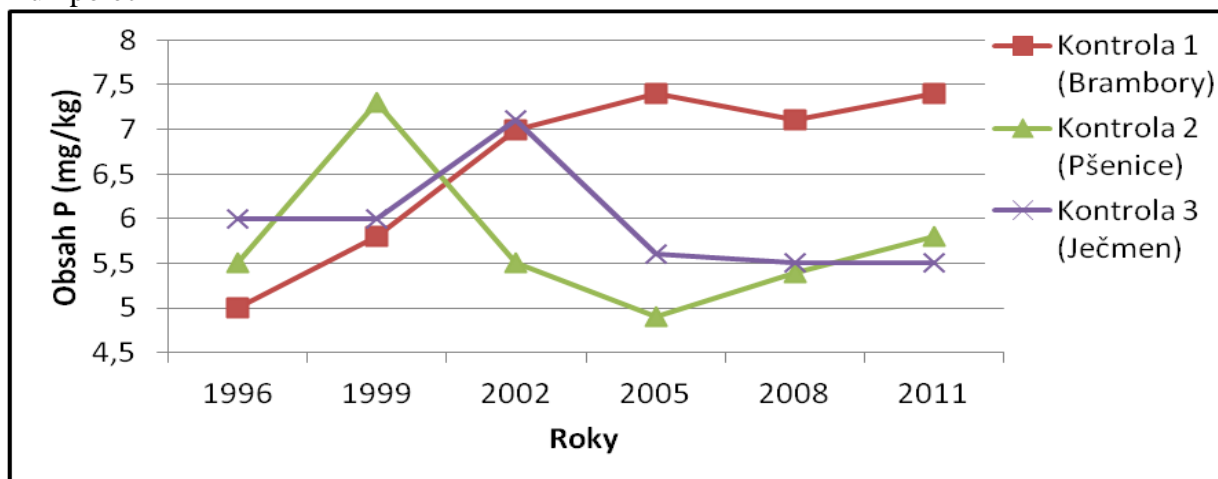
Grafy č. 1, 3 a 5 srovnávají obsahy vodorozpustného fosforu a grafy č. 2, 4 a 6 srovnávají obsahy mobilního fosforu na jednotlivých stanovištích, v obou případech u kontrolních nehojených variant. V těchto grafech se porovnávají půdní vzorky vždy po ukončení tříletého cyklu brambory, pšenice a ječmen. Tyto vzorky jsou označeny kontrola 1 pro brambory, kontrola 2 pro pšenici a kontrola 3 pro ječmen.

#### 6.1.1 Stanoviště Humpolec

##### 6.1.1.1 Vodorozpustný fosfor

V grafu č. 1 je znázorněn obsah vodorozpustného fosforu mezi lety 1996 - 2011 na stanovišti Humpolec. Kontrola 1 obsahovala na počátku měření 5,0 mg P/kg (rok 1996) a na konci měření 7,4 mg P/kg (rok 2011). Z grafu č. 1 je vidět, že obsah fosforu u kontroly 1 od roku 1996 do roku 2011 neustále rostl až na výjimku v roce 2008, kdy jeho hodnota byla 7,1 mg P/kg. Kontrola 2 obsahovala na počátku měření 5,5 mg P/kg a na konci 5,8 mg P/kg, což bylo o 0,3 mg P/kg více než na počátku. Nejvyšší množství fosforu obsahovala kontrola 2 v roce 1999, tedy 7,3 mg P/kg a nejméně v roce 2005, tedy 4,9 mg P/kg. Kontrola 3 obsahovala na počátku 6,0 mg P/kg a na konci 5,5 mg P/kg. Podle grafu č. 1 se dá říci, že množství fosforu u kontroly 3 postupně klesalo až na výjimku v roce 2002, kde hodnota fosforu dosáhla 7,1 mg P/kg.

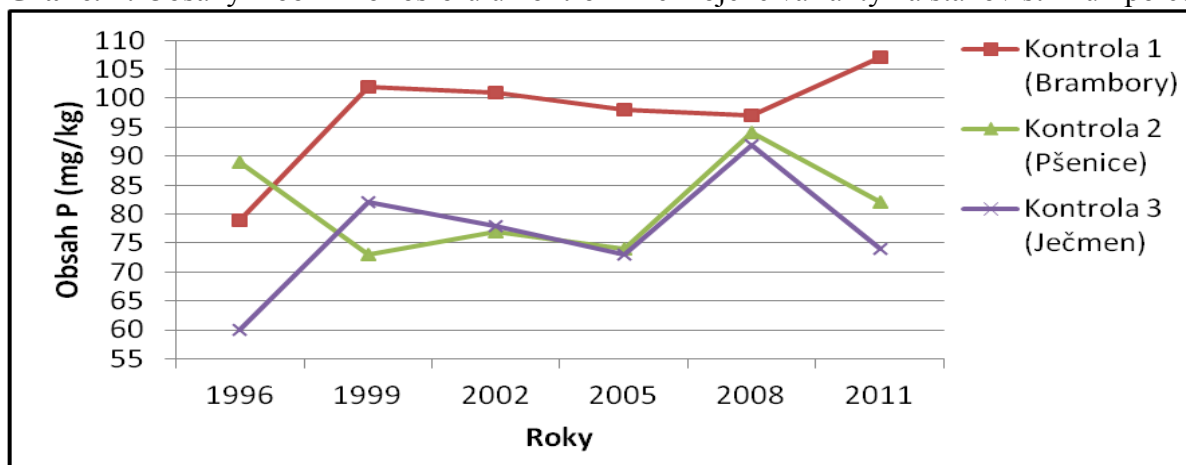
**Graf č. 1:** Obsahy vodorozpustného fosforu u kontrolní nehnojené varianty na stanovišti Humpolec



### 6.1.1.2 Mobilní fosfor

V grafu č. 2 je znázorněn obsah mobilního fosforu mezi lety 1996 - 2011 na stanovišti Humpolec. Kontrola 1 obsahovala na počátku 79 mg P/kg (1996) a na konci 107 mg P/kg (2011). Z grafu č. 2 je vidět, že mezi roky 1996 až 1999 došlo u kontroly 1 k nárůstu obsahu fosforu o 23 mg P/kg. Následně obsah fosforu klesal až do roku 2008 na hodnotu 97 mg P/kg a pak opět rostl. Kontrola 2 vykazovala hodnotu 89 mg P/kg (rok 1996) a 82 mg P/kg (rok 2011), na počátku bylo tedy více fosforu než na konci. Graf č. 2 ukazuje, že kromě roku 2008 (94 mg P/kg) byly hodnoty u kontroly 2 nižší než v roce 1996. Kontrola 3 obsahovala na počátku 60 mg P/kg a na konci 74 mg P/kg. Jak je vidět z grafu č. 2, tak v roce 2008 byl obsah fosforu u kontroly 3 nejvyšší (92 mg P/kg) a hodnoty obsahu fosforu byly u všech kontrol v tomto roce velmi blízké (97, 94, 92 mg P/kg).

**Graf č. 2:** Obsahy mobilního fosforu u kontrolní nehnojené varianty na stanovišti Humpolec



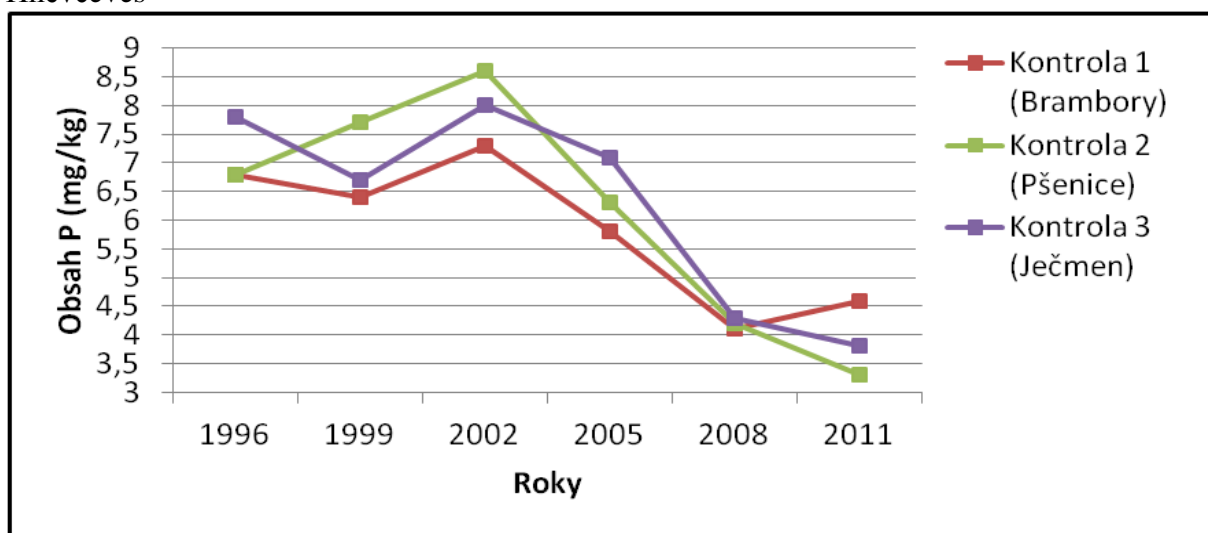


## 6.1.2 Stanoviště Hněvčeves

### 6.1.2.1 Vodorozpustný fosfor

V grafu č. 3 je znázorněn obsah vodorozpustného fosforu mezi lety 1996 - 2011 na stanovišti Hněvčeves a je patrné, že u všech kontrol byl na počátku polních pokusů vyšší obsah fosforu než v roce 2011. Kontrola 1 obsahovala 6,8 mg P/kg (rok 1996) a 4,6 mg P/kg (rok 2011), kontrola 2 6,8 mg P/kg (rok 1996) a 3,3 mg P/kg (rok 2011) a kontrola 3 7,8 mg P/kg (rok 1996) a 3,8 mg P/kg (rok 2011). Kontrola 1 od roku 1996 pouze klesala, s výjimkou v roce 2002, kdy byl obsah fosforu nejvyšší (7,3 mg P/kg). U kontroly 2 a 3 byl obsah fosforu v roce 2002 také nejvyšší. U kontroly 2 to bylo 8,6 mg P/kg a u kontroly 3 8,0 mg P/kg. Tendence změn obsahů fosforu byly u všech tří nehnojených variant podobné.

**Graf č. 3:** Obsahy vodorozpustného fosforu u kontrolní nehnojené varianty na stanovišti Hněvčeves

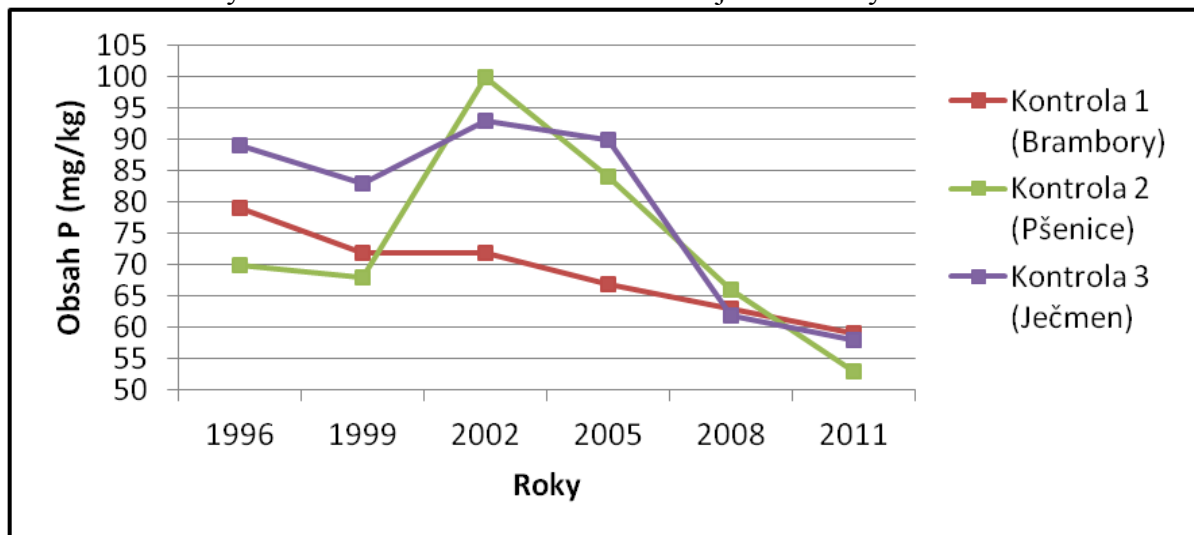


### 6.1.2.2 Mobilní fosfor

V grafu č. 4 je znázorněn obsah mobilního fosforu mezi lety 1996 - 2011 na stanovišti Hněvčeves. Obsahy fosforu v půdě u jednotlivých kontrol byly v roce 2011 ve srovnání s rokem 1996 vždy nižší. U kontroly 1 bylo 79 mg P/kg (rok 1996) a 59 mg P/kg (rok 2011), u kontroly 2 70 mg P/kg (rok 1996) a 53 mg P/kg (rok 2011) a u kontroly 3 89 mg P/kg (rok 1996) a 58 mg P/kg (rok 2011). Obsah fosforu zjištěný u kontroly 1 od roku 1996 jen klesal. U kontroly 2 obsah fosforu také klesal kromě roku 2002, kdy jeho obsah vzrostl na hodnotu 100 mg P/kg. U kontroly 3 došlo rovněž k nárůstu v roce 2002 (93 mg P/kg), tento

nárůst byl však ojedinělý. Z grafu č. 4 je patrné, že v letech 2008 a 2011 byly obsahy fosforu u všech nehnojených variant téměř shodné.

**Graf č. 4:** Obsahy mobilního fosforu u kontrolní nehnojené varianty na stanovišti Hněvčeves

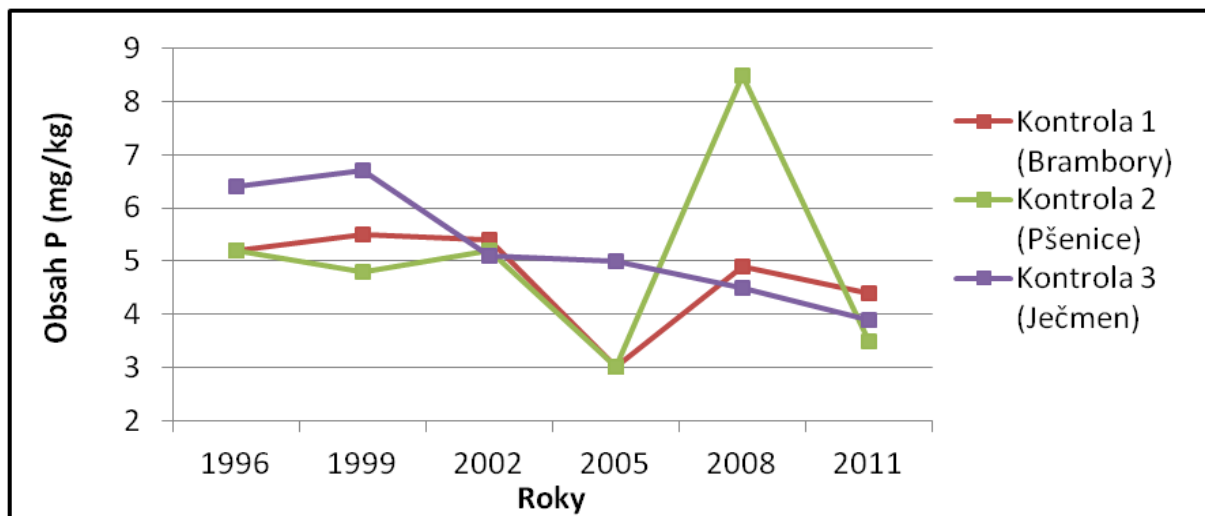


### 6.1.3 Stanoviště Suchdol

#### 6.1.3.1 Vodorozpuštěný fosfor

V grafu č. 5 je znázorněn obsah vodorozpuštěného fosforu mezi lety 1996 - 2011 na stanovišti Suchdol. Z tohoto grafu vyplývá, že obsah fosforu byl u všech kontrol na počátku pokusu vyšší než na konci. U kontroly 1 byl obsah fosforu 5,2 mg P/kg (rok 1996) a 4,4 mg P/kg (rok 2011), u kontroly 2 5,2 mg P/kg (rok 1996) a 3,5 mg P/kg (rok 2011) a u kontroly 3 6,4 mg P/kg (rok 1996) a 3,9 mg P/kg (rok 2011). U kontrol 1 a 2 bylo dosaženo celkově nejnižších obsahů fosforu, a to v roce 2005 (3,0 mg/kg). Nejvyšší hodnoty 8,5 mg P/kg bylo naopak dosaženo u varianty kontrola 2 v roce 2008. U kontroly 3 byl zaznamenán pouze nepatrný nárůst na 6,7 mg P/kg v roce 1999, jinak obsah fosforu postupně klesal.

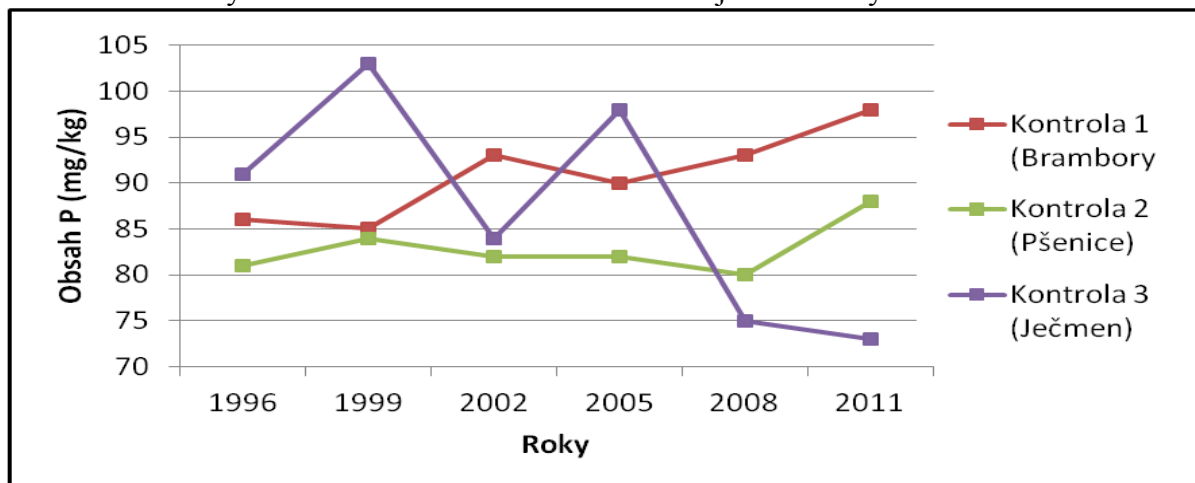
**Graf č. 5:** Obsahy vodorozpuštěného fosforu u kontrolní nehnojené varianty na stanovišti Suchdol



### 6.1.3.2 Mobilní fosfor

V grafu č. 6 je znázorněn obsah mobilního fosforu mezi lety 1996 - 2011 na stanovišti Suchdol. Tento graf zobrazuje, že obsah fosforu u kontrol 1 a 2 byl v roce 2011 vyšší ve srovnání s rokem 1996. Konkrétně u kontroly 1 byl obsah fosforu 86 mg P/kg (rok 1996) a 98 mg P/kg (rok 2011), u kontroly 2 81 mg P/kg (rok 1996) a 88 mg P/kg (rok 2011) a u kontroly 3 91 mg P/kg (rok 1996) a 73 mg P/kg (rok 2011). Nejvyšší výkyvy obsahu fosforu byly u kontroly 3, kde byl v roce 1999 zaznamenán nárůst (103 mg P/kg), v roce 2002 pokles (84 mg P/kg), v roce 2005 opět nárůst na 98 mg P/kg a v roce 2008 opět pokles (75 mg P/kg).

**Graf č. 6:** Obsahy mobilního fosforu u kontrolní nehnojené varianty na stanovišti Suchdol



## **6.2 Změny obsahu vodorozpustného a mobilního fosforu podle variant hnojení**

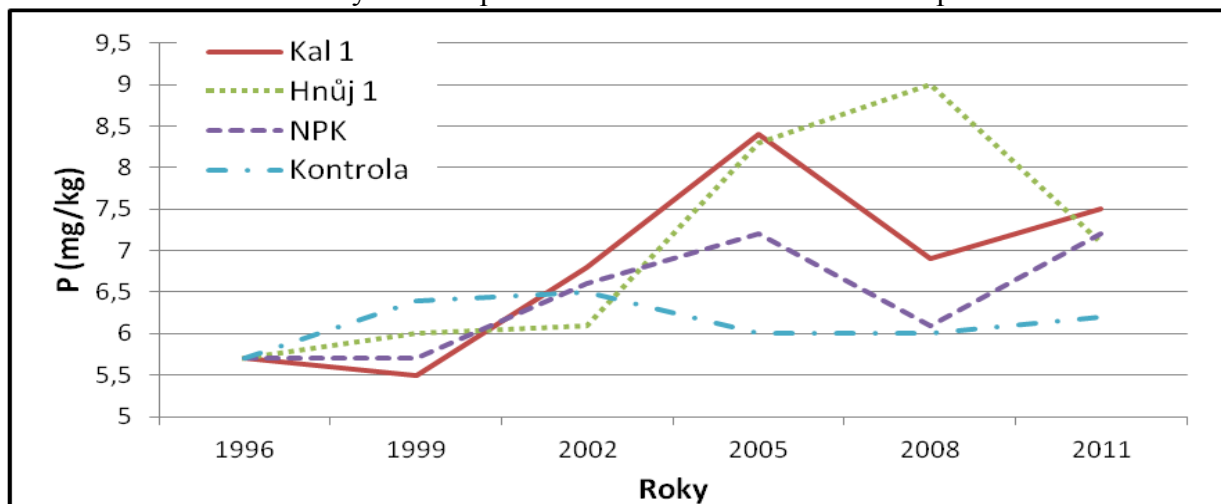
Tato kapitola hodnotí vliv jednotlivých variant hnojení na změny obsahu fosforu v půdních vzorcích. Jedná se o varianty hnojené čistírenskými kaly, hnojem, minerálními hnojivy ve srovnání s variantou nehnojenou (kontrolní). Každý sledovaný rok od 1996 následoval po uzavření jednoho osevního cyklu brambory, pšenice a ječmen. Hodnoty obsahu fosforu použité v této kapitole jsou průměrem výsledků extraktů půdních vzorků odebraných po sklizni těchto tří plodin.

### **6.2.1 Stanoviště Humpolec**

#### **6.2.1.1 Vodorozpustný fosfor**

V grafu č. 7 jsou vyhodnoceny obsahy fosforu v půdě u jednotlivých variant. Je zřejmé, že u všech variant došlo k nárůstu obsahu fosforu v půdě. Na počátku pokusu činil průměrný obsah P v půdě 5,7 mg P/kg. Varianta hnojená čistírenskými kaly ukazuje, že toto hnojení má vliv na obsah fosforu v půdě. Nejvyšší hodnotu obsahu fosforu sice v roce 2008 dosáhla varianta hnojená hnojem, a to 9,0 mg P/kg, ale jinak se dá říci, že čistírenské kaly byly celkově lepším zdrojem fosforu v půdě. Z grafu č. 7 je vidět, že až na pokles u této varianty v roce 2008, obsah fosforu neustále rostl. Nejvyšší hodnotu fosforu dosahovala varianta čistírenské kaly v roce 2005, a to 8,4 mg P/kg, a průměr obsahu fosforu byl 6,8 mg P/kg. Varianta hnojená hnojem je také velmi dobrým zdrojem fosforu. Graf č. 7 znázorňuje, že kromě poklesu v roce 2011, obsah fosforu u této varianty neustále rostl a průměrný obsah fosforu byl 7 mg P/kg. Při hodnocení varianty hnojené minerálními hnojivy je zřejmé, že obsah fosforu rostl, ale ve srovnání s aplikací kalů a hnoje pomaleji. U této varianty došlo v roce 2008 rovněž k poklesu. Nejvyšší hodnoty byly 7,2 mg P/kg v roce 2005 a 2011 a průměrná hodnota fosforu byla 6,4 mg P/kg. U kontrolní varianty došlo ke zvýšení obsahu fosforu v půdě, ale v porovnání s ostatními variantami byla nejchudší na obsah P. Nejvyšší hodnoty dosahovala v roce 2002 a to 6,5 mg P/kg a průměrný obsah fosforu byl 6,1 mg P/kg.

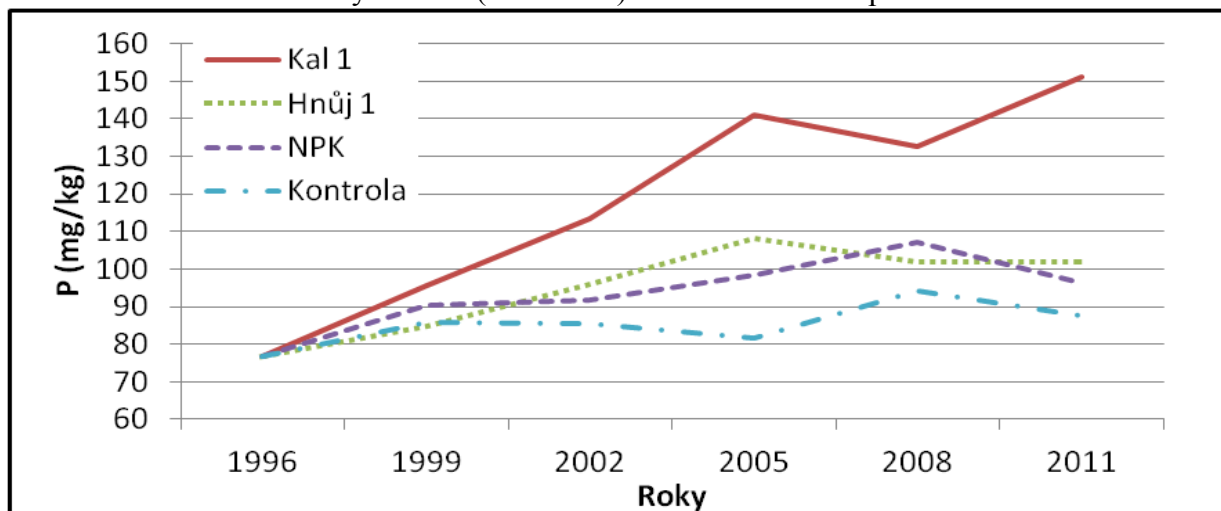
**Graf č. 7:** Průměrné obsahy vodorozpustného fosforu na stanovišti Humpolec



### 6.2.1.2 Mobilní fosfor

Graf č. 8 vyhodnocuje obsahy fosforu u jednotlivých variant. Po porovnání jednotlivých variant bylo zjištěno, že u všech došlo k nárůstu obsahu fosforu. Na počátku pokusu byl vypočten průměrný obsah fosforu u všech variant, tedy 76,9 mg P/kg. Nejvíce fosforu obsahovala varianta hnojená čistírenskými kaly, kdy po celou dobu pokusu, mimo rok 2008, obsah fosforu rostl. Nejvíce fosforu obsahovala tato varianta v roce 2011 a to 151 mg P/kg a průměrný obsah fosforu byl 118 mg P/kg. Jednoznačně se dá říci, že hnojení čistírenskými kaly má pozitivní vliv na obsah fosforu v půdě. U varianty hnojené hnojem nebyl nárůst obsahu fosforu takový jako u čistírenských kalů. Z grafu č. 8 je vidět, že do roku 2005 obsah fosforu u varianty hnůj rostl a dosáhl nejvyšší hodnoty 108 mg P/kg a poté došlo k mírnému poklesu na hodnotu 102 mg P/kg (rok 2011). Průměrný obsah fosforu byl 94,3 mg P/kg. Varianta hnojená minerálními hnojivy je podobná variantě hnoje. Tato varianta vykazovala do roku 2008 nárůst obsahu fosforu a tam také dosáhla nejvyšší hodnoty 107,0 mg P/kg, ale v roce 2011 došlo k poklesu obsahu fosforu na 96,3 mg P/kg. Průměrná hodnota fosforu byla 93,4 mg P/kg. U kontrolní varianty také došlo ke zvýšení obsahu fosforu v půdě. Oproti ostatním variantám je nárůst obsahu fosforu opět nejnižší. Nejvyšších hodnot dosahovala kontrola v roce 2008, a to 94,3 mg P/kg a průměrný obsah fosforu byl 85,3 mg P/kg.

**Graf č. 8:** Průměrné obsahy fosforu (Mehlich 3) na stanovišti Humpolec

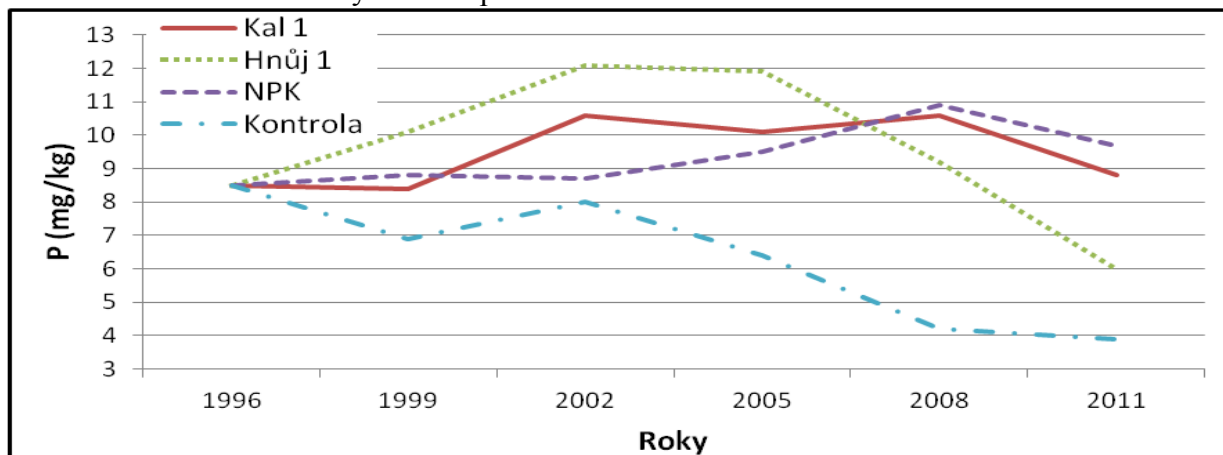


## 6.2.2 Stanoviště Hněvčeves

### 6.2.2.1 Vodorozpustný fosfor

V grafu č. 9 je vidět obsah fosforu na stanici Hněvčeves u jednotlivých variant. U výsledků z roku 1996 byla vypočtena průměrná hodnota, tedy 8,5 mg P/kg. Hnojení čistírenskými kaly ukazuje, že došlo k nárůstu obsahu fosforu, ale jak je vidět z grafu č. 9, tak nárůst se střídal s poklesem. Nejvyšší obsah fosforu byl 10,6 mg P/kg v letech 2002 a 2008. Průměrný obsah fosforu byl 9,5 mg P/kg. I přes nízký nárůst obsahu fosforu je zřejmé, že čistírenské kaly mají vliv na obsah fosforu v půdě. U varianty hnojené hnojem došlo v roce 2002 k nárůstu obsahu fosforu, kdy nejvyšší hodnota byla 12,1 mg P/kg a od té doby obsah fosforu neustále klesal, v roce 2011 dosáhl hodnoty 6,0 mg P/kg, což je méně než na počátku. Průměrný obsah fosforu byl 9,6 mg P/kg. U varianty hnojené minerálními hnojivy obsah fosforu rostl až do roku 2008, kde dosáhl nejvyšší hodnoty 10,9 mg P/kg, pak klesl na hodnotu 9,7 mg P/kg v roce 2011 a průměrný obsah fosforu byl 9,4 mg P/kg. U kontrolní varianty obsah fosforu od roku 1996 klesal. Průměrná hodnota fosforu byla 6,3 mg P/kg.

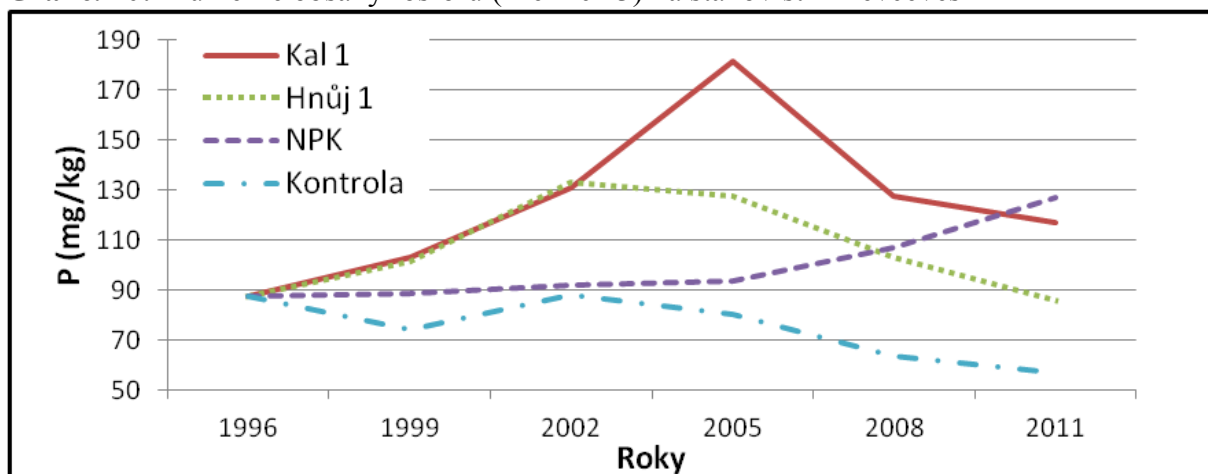
**Graf č. 9:** Průměrné obsahy vodorozpustného fosforu na stanovišti Hněvčeves



### 6.2.2.2 Mobilní fosfor

Graf č. 10 ukazuje obsahy fosforu v půdě u jednotlivých variant. Na počátku pokusu byl průměrný obsah fosforu 87,3 mg P/kg. U varianty hnojené čistírenskými kaly vzrostl do roku 2005 na hodnotu 181 mg P/kg a pak nastal výrazný pokles až do roku 2011 na hodnotu 117 mg P/kg. Průměrný obsah fosforu byl 125 mg P/kg. Varianta hnojená hnojem vykazovala do roku 2002 také nárůst obsahu fosforu, a to na hodnotu 133 mg P/kg, pak začal obsah fosforu klesat až do roku 2011, a to na hodnotu 85,7 mg P/kg. Průměrný obsah fosforu byl 106,3 mg P/kg. Jediná varianta hnojená minerálními hnojivy zaznamenala po celou dobu pokusu mírný nárůst obsahu fosforu, který vzrostl z 87 mg/kg v roce 1996 na 127 mg P/kg (2011). Průměrný obsah fosforu byl 99,3 mg P/kg. Obsah P v kontrolní variantě po celou dobu pokusu klesal, mimo roku 2002, kdy dosáhl nejvyšší hodnoty 88,3 mg P/kg. Průměrný obsah fosforu u této varianty byl 75,1 mg P/kg.

**Graf č. 10:** Průměrné obsahy fosforu (Mehlich 3) na stanovišti Hněvčeves

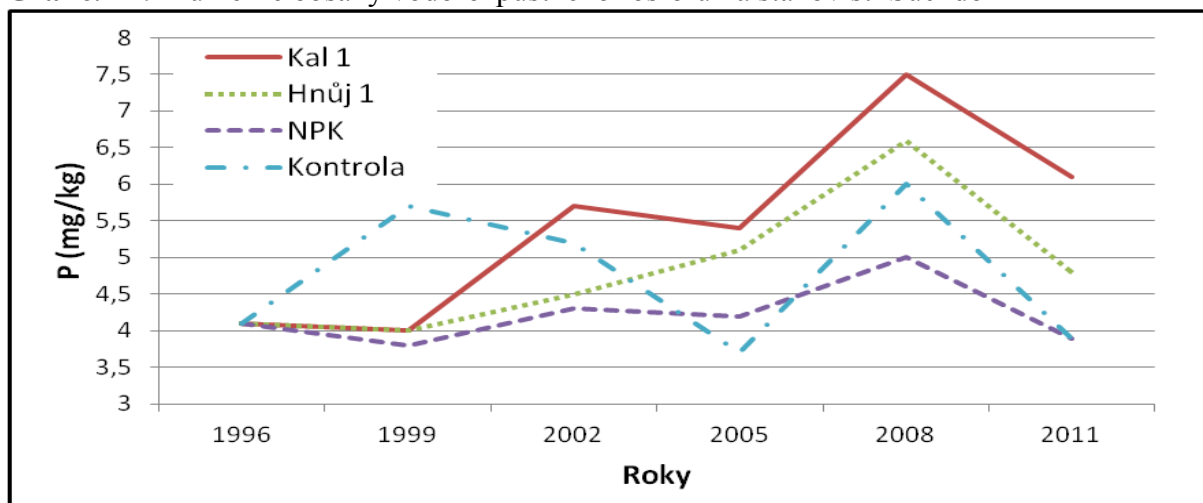


## 6.2.3 Stanoviště Suchdol

### 6.2.3.1 Vodorozpustný fosfor

Graf č. 11 ukazuje, jak se měnil obsah fosforu v půdě u jednotlivých variant. Je zřejmé, že v roce 2011 došlo u všech variant k poklesu obsahu fosforu. Na počátku pokusu byl průměrný obsah fosforu 4,1 mg P/kg. Největší vliv na obsah fosforu v půdě měla varianta hnojená čistírenskými kaly. V roce 2008 dosáhla nevyšší hodnoty 7,5 mg P/kg a průměrná hodnota byla 5,5 mg P/kg. U této varianty se dá říci, že se pravidelně střídal pokles s nárůstem obsahu fosforu, což je patrné z grafu č. 11. Varianta hnojená hnojem dosáhla nejvyšší hodnoty v roce 2008, a to 6,6 mg P/kg, a průměrný obsah fosforu byl 4,9 mg P/kg. Od počátku do roku 2008 obsah fosforu rostl a poté došlo k poklesu na hodnotu 4,8 mg P/kg (2011). U této varianty také platí, že má vliv na obsah fosforu v půdě. U varianty hnojené minerálními hnojivy byly obsahy fosforu po celou dobu pokusu poměrně vyrovnané a pohybovaly se okolo hodnoty 4,5 mg P/kg, průměrná hodnota byla 4,8 mg P/kg. U kontrolní varianty bylo zpravidla naměřeno více fosforu než u varianty NPK. Nejvyšší obsah fosforu byl naměřen v roce 2008, a to 6,0 mg P/kg, a průměrný obsah fosforu byl 4,8 mg P/kg jako u varianty minerální hnojiva. V roce 2005 a 2011 byl obsah fosforu nižší než u NPK.

**Graf č. 11:** Průměrné obsahy vodorozpustného fosforu na stanovišti Suchdol



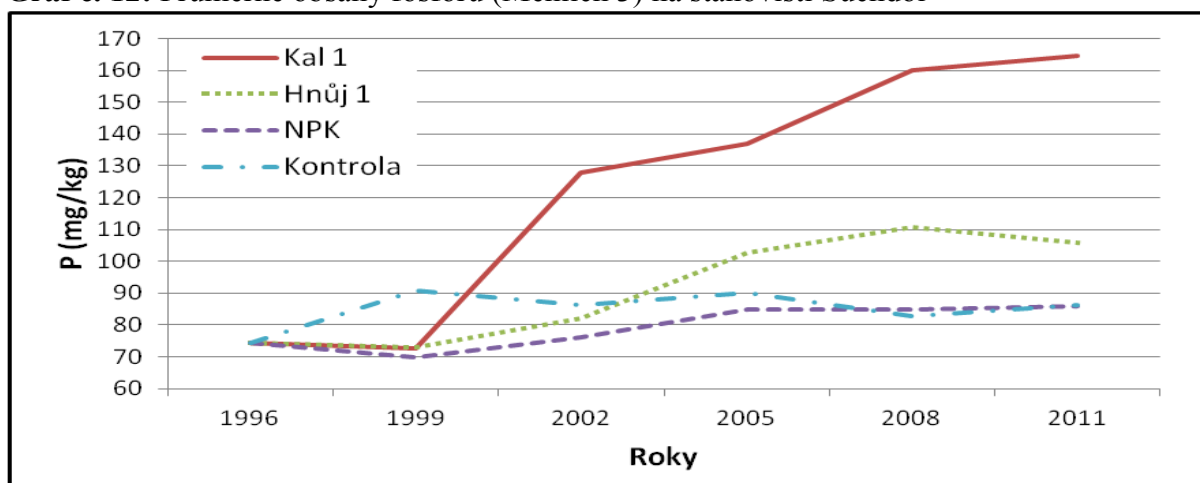
### 6.2.3.2 Mobilní fosfor

Graf č. 12 ukazuje obsahy fosforu v půdě u jednotlivých variant. Podle tohoto grafu byly čistírenské kaly největším zdrojem fosforu v půdě. U této varianty obsah fosforu v půdě



od roku 1999 neustále rostl. Nejvíce fosforu obsahovala tato varianta v roce 2011 a to 165 mg P/kg. Průměrný obsah fosforu byl 123 mg P/kg. Na počátku pokusu byla vypočtena průměrná hodnota fosforu 74,3 mg P/kg. Po čistírenských kalech bylo dosaženo nejvyššího obsahu fosforu v půdě po aplikaci hnoje. V letech 1999 až 2008 obsah fosforu v půdě u této varianty rostl a v roce 2008 dosáhl nevyšší hodnoty 111 mg P/kg. V roce 2011 došlo k menšímu poklesu na 106 mg P/kg. Průměrný obsah fosforu v půdě byl u této varianty 91,5 mg P/kg. Obsah fosforu u varianty NPK od roku 1999 rovněž neustále rostl a v roce 2011 dosáhla nejvyšší hodnoty 86,0 mg P/kg. Průměrný obsah fosforu zde byl 79,3 mg P/kg. U kontrolní varianty obsah fosforu zůstal po celou dobu pokusu téměř neměnný. Průměrný obsah fosforu byl 85,1 mg P/kg, což je více oproti variantě hnojené minerálními hnojivy.

**Graf č. 12:** Průměrné obsahy fosforu (Mehlich 3) na stanovišti Suchdol



### 6.3 Změny obsahu vodorozpustného a mobilního fosforu podle plodin

Jelikož se kal a hnůj aplikují pouze k bramborám, dá se předpokládat, že se množství fosforu bude v osevním postupu snižovat, tedy nejvíce ho bude v půdě u brambor a nejméně u ječmene. V případě pšenice a ječmene je tedy sledováno až následné působení organických hnojiv v osevním postupu.

Při porovnání obsahu vodorozpustného i mobilního fosforu v půdě v jednotlivých letech bylo u čistírenského kalu zjištěno, že vývoj na stanovištích Humpolec a Suchdol neodpovídal předpokladům. Na stanovišti Hněvčeves odpovídal vývoj předpokladům jen ve třech případech z deseti. Bylo to v roce 2008 a to jak u vodorozpustného, tak i u mobilního fosforu a v roce 2011 u vodorozpustného fosforu.

V případě hnoje byl předpokládaný trend dosažen na stanovištích Humpolec a Suchdol v jednom případě z deseti. U obou stanovišť to bylo v roce 2002 u mobilního fosforu. Na stanovišti Hněvčeves byl předpokládaný trend dosažen pouze v polovině případů. Bylo to v roce 1999 a 2002 u mobilního fosforu, v roce 2008 a to jak u vodorozpustného, tak i u mobilního fosforu a v roce 2011 u vodorozpustného fosforu.

Ze zjištěných výsledků vyplývá, že i přesto, že se čistírenské kaly a hnůj tři roky neaplikují, fosfor se z nich pravděpodobně stále uvolňuje a obsahy přístupného P v půdě se tedy dále zvyšují. To dokazuje dlouhodobé uvolňování fosforu nejen z hnoje, ale i z čistírenských kalů.

#### **6.4 Vztah mezi vodorozpustným a mobilním fosforem na stanovištích**

Na stanovišti Humpolec bylo zjištěno, že mobilní fosfor byl tvořen vodorozpustným fosforem z 6,9 %. Spearmanův korelační koeficient činil 0,53, jednalo se tedy o těsnou sílu závislosti. Koeficient determinace byl 29 %. Na stanovišti Hněvčeves tvořil vodorozpustný fosfor z mobilního 8,7 %, s vysokou silou závislosti 0,69 a determinačním koeficientem 48 %. Na stanovišti Suchdol tvořil vodorozpustný fosfor z mobilního 5,2 %, síla závislosti byla 0,59 a koeficient determinace byl 35 %. Pokud se berou veškeré výsledky bez ohledu na stanoviště, tak mobilní fosfor byl tvořen vodorozpustným z 6,9 %, síla závislosti byla 0,53 a koeficient determinace byl 29 % stejně jako na stanovišti Humpolec.

## 7 DISKUZE

Tato práce se zaměřuje na obsah vodorozpustného a mobilního fosforu na stanovištích Humpolec, Hněvčeves a Suchdol a vyhodnocení jeho změn po aplikaci čistírenského kalu, hnoje, minerálních hnojiv (NPK) ve srovnání s kontrolní, nehnojenou variantou.

V roce založení pokusu, tedy 1996, byl na všech stanovištích změřen obsah vodorozpustného i mobilního fosforu. Na stanovišti Humpolec se obsah vodorozpustného fosforu pohyboval v rozmezí 5,0 – 6,0 mg P/kg, na stanovišti Hněvčeves 6,8 – 7,8 mg P/kg a na stanovišti Suchdol 5,2 – 6,4 mg P/kg. Ivanič et al. (1984) a Marschner (1995) uvádí, že se v půdním roztoku obsah fosforu pohybuje mezi 0,8 až 8,0 mg P/kg na vzduchu vyschlé půdy. Obsah fosforu naměřený před založením pokusu na všech stanovištích tomu odpovídal. Po celou dobu pokusu se obsah vodorozpustného fosforu u nehnojené varianty pohyboval na stanovišti Humpolec v rozmezí 5,0 – 7,4 mg P/kg, na stanovišti Hněvčeves 3,8 – 8,6 mg P/kg a na stanovišti Suchdol 3,0 - 8,5 mg P/kg. Během pokusu bylo tedy rozmezí obsahu fosforu v půdním roztoku uváděné Ivanič et al. (1984) a Marschner (1995), mírně překročeno u stanoviště Hněvčeves (o 0,6 mg P/kg) a u stanoviště Suchdol (o 0,5 mg P/kg).

V době založení pokusu se obsah mobilního fosforu na stanovišti Humpolec pohyboval od 60 do 89 mg P/kg, na stanovišti Hněvčeves od 70 do 89 mg P/kg a na stanovišti Suchdol od 81 do 91 mg P/kg. Marschner (1995) uvádí, že podíl mobilních forem přístupného fosforu v půdách značně kolísá a pohybuje se od 10 až do 100 mg P/kg zeminy. Hodnoty naměřené na tomto stanovišti opět toto rozmezí splňují. V průběhu pokusu se obsah mobilního fosforu u nehnojené varianty pohyboval na stanovišti Humpolec od 60 do 107 mg P/kg, na stanovišti Hněvčeves od 53 do 100 mg P/kg a na stanovišti Suchdol od 73 do 103 mg P/kg. Během pokusu byly hodnoty mobilních forem v půdě, které uvádí Marschner (1995), překročeny u stanoviště Humpolec o 7 mg P/kg a u stanoviště Suchdol o 3 mg P/kg. Vyšší hodnoty a překročené rozmezí udávané Marschnerem (1995) lze přičíst skutečnosti, že Mehlich 3 je jedním z nejsilnějších extraktantů pro stanovení přístupného fosforu v půdě (Kulhánek et al., 2009b). Čermák et Budňaková (2005) uvádí, že se v letech 1999 – 2004 obsah fosforu v půdě v České republice pohyboval okolo 95 mg P/kg půdy. Toto množství sledované půdy splňují. Vaněk et al. (2012) uvádí, že průměrný obsah přijatelného fosforu v půdě je 40 – 80 mg P/kg, což je menší rozmezí, než uvádí Marschner (1995), ale dá se říci, že i toto rozmezí sledované půdy splňují a převyšují.

Je důležité si uvědomit, že fosfor je pro rostliny nepostradatelný při růstu a vývinu (Kulhánek et al., 2004). Je totiž makrobiogenním prvkem, který má v rostlině mnoho funkcí (Pavlíková et al., 2008). Vaněk et al. (2007) uvádí, že v ozimé pšenici je obsaženo u zrna 0,37 % a u slámy 0,09 %. Podle Zimolky et al. (2006) je koncentrace fosforu v sušině sladovnického ječmene 0,4 až 0,85 % fosforu. Rybáček et al. (1988) uvádí, že u pozdních brambor je obsah fosforu v sušině nati 0,14 %, v sušině kořenu 0,18 % a v sušině hlízy 0,22 %. Podle Vaňka et al. (2007) bez tohoto prvku rostlina nemůže dokončit životní cyklus, a proto je potřeba tento prvek vracet do půdy, ale s ohledem na ekonomiku a ekologii, tedy aby byly použity jen takové dávky, při kterých bude zajištěna požadovaná produkce a udržena potřebná úrodnost půdy. S tím souhlasí mnoho autorů. Například Nátr (2002) uvádí, že ročně spolu se sklizní zmizí různými druhy zemědělských plodin z jednoho hektaru 10 až 40 kg fosforu, podle Balíka (1993) 10 až 25 kg fosforu.

Pokud fosfor nebude do půdy vracen, tak lze očekávat jeho pokles v půdě, což je zřejmé z první části výsledků, kde se po celou dobu pokusu nehnojilo. Předpokládalo se, že se obsah vodorozpustného i mobilního fosforu bude snižovat, což se také potvrdilo v případě vodorozpustného fosforu u stanovišť Hněvčeves, Suchdol a Humpolec u kontroly 3 a v případě mobilního fosforu u stanovišť Hněvčeves a Suchdol u kontroly 3. U zbývajících se obsah fosforu stagnoval, nebo se mírně zvyšoval. U stanoviště Humpolec to bylo pravděpodobně způsobené mladší půdou, která na tomto stanovišti je a obsah fosforu se zde tedy neustále uvolňuje. Na stanovišti Suchdol je úrodná půda černozem, která obsahuje vysoké množství celkového fosforu a ten byl pravděpodobně mobilizován z hůře přístupných forem v půdě. Dále k tomu mohly přispět povětrnostní podmínky, odumření mikroorganismů a rostlinné zbytky.

Kulhánek et al. (2005) uvádí, že dlouhodobé pokusy na 13 lokalitách v České republice vykazují výrazně nižší obsahy fosforečnanů na nehnojených variantách ve srovnání s variantami hnojenými organickými i minerálními hnojivy. S ním souhlasí i Hlušek et Trávník (2002), kteří zkoumali zásobenost půd přístupným fosforem od roku 1972. Stejný fakt potvrzují i naše výsledky.

Jak již bylo výše uvedeno, podle Ivanič et al. (1984) a Marschner (1995) se přirozený obsah fosforu v půdním roztoku pohybuje v rozmezí 0,8 až 8 mg P/kg. Z výsledků této diplomové práce je zřejmé, že při aplikaci hnojiv dochází většinou ke zvýšení obsahu přístupných forem P v půdě nad toto rozmezí. Výsledky naměřené u hnojených variant neklesly pod dolní mez, tj. 0,8 mg P/kg. Na stanovišti Humpolec u varianty čistírenský kal bylo dosaženo 8,4 mg P/kg, u varianty hnůj 9,0 mg P/kg a u varianty NPK 7,2 mg P/kg.

Na stanovišti Hněvčeves bylo dosaženo u varianty čistírenský kal 10,6 mg P/kg, u varianty hnůj 12,1 mg P/kg a u varianty NPK 10,9 mg P/kg. Pouze na stanovišti Suchdol nedošlo k překročení rozmezí. U varianty čistírenský kal bylo dosaženo 7,5 mg P/kg, u varianty hnůj 6,6 mg P/kg a u varianty NPK 5,0 mg P/kg.

Přirozené rozmezí mobilních fosforečnanů v půdě 10 až 100 mg P/kg udávané dle Marschnera (1995) bylo hnojením zpravidla překročeno. Na stanovišti Humpolec u varianty čistírenský kal bylo dosaženo 151 mg P/kg, u varianty hnůj 108 mg P/kg a u varianty NPK 107 mg P/kg. Na stanovišti Hněvčeves bylo dosaženo u varianty čistírenský kal 181 mg P/kg, u varianty hnůj 133 mg P/kg a u varianty NPK 127 mg P/kg. Na stanovišti Suchdol bylo dosaženo u varianty čistírenský kal 165 mg P/kg, u varianty hnůj 111 mg P/kg a u varianty NPK 86 mg P/kg.

Do půdy se fosfor dá dodávat ve formě hnojiv, jako například čistírenské kaly, chlévský hnůj, minerální hnojiva (např. NPK). Klír et al. (2008) uvádí, že se v České republice do půdy aplikací minerálními a statkovými hnojivy v jednotlivých letech od roku 1996 do roku 2008 zapravila 4,4 až 8,8 mg P/ha. Catroux et al. (1983) uvádí, že aplikace kalů do půdy ovlivňuje růst a výnos rostlin a Kotovicová et Vaverková (2012) dodávají, že se čistírenské kaly používají z důvodu bohatého zdroje organické hmoty, základních živin, stopových prvků a zlepšují fyzikálně-chemické i biologické vlastnosti půd, přičemž významně jsou zde zastoupeny dusík a fosfor. Tato fakta byla potvrzena i ve výsledcích této diplomové práce. Černý (2010) uvádí obsahy fosforu v čistírenských kalech podle různých autorů: podle Sommerse (1977) čistírenské kaly obsahují v sušině 2,5 % fosforu v jednom kilogramu kalu, podle Wanga (1997) 1,6 %, podle Stehouvera (1999) 2,2 %, podle Bozkurta and Yarilgac (2003) 0,8 %, podle Antolína et al. (2005) 1,7 % a podle Černého et al. (2009) 2,2 %. I když se obsahy fosforu v čistírenských kalech u jednotlivých autorů liší, tak kromě výchyly 0,8 % se dá říci, že obsah fosforu v sušině čistírenského kalu se většinou pohybuje okolo 2 %. S tím souhlasí i čistírenský kal z Čistírny odpadních vod v Praze Tróji, který obsahoval 2,2 % fosforu a byl použit v dlouhodobém pokusu v této diplomové práci. Podle výsledků této diplomové práce jsou čistírenské kaly nejlepším zdrojem vodorozpustného i mobilního fosforu v půdě a to jak po aplikaci, tak i v následujících letech. Rovněž podle Kidd et al. (2007) dlouhodobá aplikace čistírenských kalů vede ke zvýšení biologicky dostupného fosforu. Hanč et al. (2004) uvádí, že čistírenské kaly jsou významnějším zdrojem fosforu v porovnání s hnojem, s čímž souhlasí Kulhánek et al. (2014) a dodává, že se kaly zdají být lepším zdrojem biologicky dostupného půdního fosforu ve srovnání s běžně užívaným minerálním hnojením P.

Základem udržení půdní úrodnosti je hnojení statkovým hnojem. Pokud se pravidelně hnojí hnojem, mají půdy lepší fyzikální vlastnosti, lépe přijímají vodu, lépe zadržují živiny, jsou odolnější k výkyvům pH, umožňují vhodnější dávkování minerálních hnojiv a lepší využití živin (Vaněk et al., 2007). Pozitivní vlastnosti hnoje potvrzují dosažené výsledky na jednotlivých stanovištích, kde aplikace hnoje vedla rovněž ke zvýšení obsahu vodorozpustného i mobilního fosforu v půdě. McDowell and Sharpley (2001) ve své práci uvádí, že přidavkem hnoje byly zjištěny vyšší obsahy mobilních fosforečnanů naměřených metodou Mehlich 3 v půdě. Hnojení hnojem se tedy rovněž pozitivně projevilo na obsahu fosforu v půdě. Richter et Římovský (1996) uvádí, že v hnoji skotu je obsaženo 0,11 % fosforu, v koňském hnoji 0,13 % fosforu, v ovčím hnoji 0,14 % fosforu a v drůbežím 1,25 % fosforu. Vaněk et al. (2007) ještě uvádí i prasečí hnůj, ve kterém je obsaženo 0,25 % fosforu. V našich pokusech byly použity různé druhy hnoje skotu obsahující od 0,15 do 0,24 % P. Hnůj tedy v porovnání s kalem obsahuje méně fosforu, ale i přesto je potřeba ho do půdy dodávat, aby nedošlo k poklesu půdní úrodnosti, jak uvádí Vaněk et al. (2007).

Pro minerální hnojiva je typický vyšší obsah živin a obsah jedné nebo více živin (Vaněk et al., 2007). Jsou to látky dodávané do půdy, které rostlinám poskytují látku nebo látky nezbytné pro jejich vývin (Richter et Hlušek, 1996). U varianty NPK byly pěstované plodiny v této diplomové práci hnojeny ledkem amonným s vápencem (27,5 %), trojitým superfosfátem (21 % P) a draselnou solí DS60 (50 % K). Po aplikaci minerálních hnojiv se sice obsah vodorozpustného i mobilního fosforu v půdě zvýšil, ale v porovnání s variantou čistírenský kal a hnůj je to mnohem méně. U stanoviště Suchdol se u vodorozpustného fosforu tato varianta v průměru shodovala s kontrolní variantou a v případě mobilního fosforu obsahovala méně fosforu než kontrolní varianta. Pravděpodobně je to způsobeno výnosy, které byly u této varianty dlouhodobě nejvyšší. Lze tedy předpokládat, že s nejvyššími výnosy docházelo i k nejvyšším odběrům fosforu. Dlouhodobé hodnocení výnosů ze stejného pokusu je uvedeno v publikaci Černý et al. (2010), kde na pěti stanovištích vykazuje varianta NPK zpravidla nejvyšší výnosy všech plodin. Lindsay (1979) uvádí, že k dosažení vyšších výnosů je nutno používat i minerální hnojiva, neboť přirozeně se vyskytující sloučeniny fosforu jsou v půdě zpravidla jen málo rozpustné. Richter et Hlušek (1996) uvádí, že minerální hnojiva působí v půdě více let a zvyšují výnosy plodin, což náš předpoklad potvrzuje. Dalším důvodem, proč na stanovišti Suchdol varianta NPK dopadla hůře než kontrolní, může být způsobeno vyšším obsahem uhličitánů vápenatých na stanovišti Suchdol, kdy dochází k poutání přístupného fosforu na uhličitany vápenaté, což ve své práci popisují Xu et al. (2008), kdy fosfor do těchto vazeb může přecházet aplikací minerálních hnojiv, jako

je to v případě trojitého superfosfátu dodaného u varianty NPK. Hlušek et Trávník (2002) v pokusech zjistili, že pravidelně aplikovaný chlévský hnůj bez minerálních fosforečných hnojiv udržel během pokusných let zásobu fosforu přibližně na stejné úrovni, ale hnojení minerálními hnojivy zvýšilo půdní zásobu fosforu a z toho je patrné, že k udržení potřebné úrovně půdní úrodnosti je nezbytná aplikace organických i minerálních hnojiv. V našich výsledcích varianta hnojená hnojem vykazovala vyšší hodnoty P v půdě než NPK, varianta NPK naopak vyšší výnosy. Při aplikaci obojího by tedy došlo k zachování půdní úrodnosti i rentabilních výnosů, což potvrzuje Balík et al. (2009).

V pokusu hodnoceném v této diplomové práci se čistírenský kal a hnůj aplikují pouze k bramborám, u pšenice a ječmene je sledováno až jejich následné působení v osevním postupu. Předpokládá se tedy, že v půdě po sklizni brambor, bude obsah fosforu nejvyšší a po ječmeni, kde je sledováno působení aplikace kalů až po třech letech, nejnižší. Pokud se porovnávají průměrné hodnoty fosforu v půdě u čistírenského kalu a hnoje, tak vodorozpustný ani mobilní fosfor předpokládaný vývoj nesplňují. V případě porovnávání vodorozpustného i mobilního fosforu v půdě v jednotlivých letech, se u čistírenského kalu ukázalo, že jen ve třech případech ze třiceti byl předpoklad splněn. V případě hnoje bylo splnění předpokladu zjištěno v sedmi případech ze třiceti. Nejčastěji bylo předpokládaných výsledků dosaženo na stanovišti Hněvčeves (8 z 10 případů). Vaněk et al. (2007), Bartoš et al. (2000), Sulzberger (2007) a Černý et al. (2012) uvádějí, že působení organických hnojiv je většinou pozvolnější a dlouhodobé, čemuž získané výsledky odpovídají.

V rámci diplomové práce bylo vypočteno, kolik procent tvoří vodorozpustný fosfor z mobilního. Na stanovišti Humpolec to bylo 6,9 %, na stanovišti Hněvčeves 8,7 % a na stanovišti Suchdol 5,2 %. Po porovnání jednotlivých stanovišť bylo nejvíce vodorozpustného fosforu na stanovišti Hněvčeves, pravděpodobně je to způsobené jílovitohlinitou půdou, která zadrží více P než hlinitopísčítá na stanovišti Humpolec. Stanoviště Suchdol obsahovalo nejméně vodorozpustného fosforu. Nejspíše to bylo způsobeno poutáním P do půdní organické hmoty a fosforečnanů vápenatých. Kulhánek et al. (2009b) uvádí, že metodou Mehlich 3 je stanoveno přibližně 15x vyšší množství fosforu, než je obsah fosforu v půdním roztoku. Ze získaných výsledků tomu nejvíce odpovídá stanoviště Humpolec. Dále byl vypočten Spearmanův korelační koeficient, tedy síla závislosti obsahu vodorozpustného P na mobilním a koeficient determinace, udávající z kolika procent lze vysvětlit změnu obsahu vodorozpustného P změnou obsahu mobilního P. Na stanovišti Humpolec byla zjištěna střední závislost (0,53) a koeficient determinace byl 29 %, na stanovišti Hněvčeves silná závislost (0,69) a koeficient determinace byl 48 %, na stanovišti

Suchdol střední závislost (0,59) a koeficient determinace byl 35 %. Kulhánek et al. (2003) uvádí, že vzájemné korelace mezi Mehlich 3 a vodným výluhem je u variant hnojených čistírenskými kaly 0,90, což je více než naše výsledky, ve kterých je porovnáváno více variant hnojení a kontrolní nehnojená varianta.



## 8 ZÁVĚR

Fosfor je v půdě velice důležitý při růstu a vývinu rostlin. Pokud je ho v půdě nedostatek, tak mají pěstované rostliny nižší výnosy. Podle mnohých studií se stává limitujícím prvkem ve výživě rostlin. Je potřeba, aby byl vrácen do půdy, což se převážně děje ve formě organických a minerálních hnojiv. Velký význam má rovněž studium nových zdrojů bohatých na fosfor. Ty by měly být zdravotně, ekologicky a ekonomicky přijatelné. Jedním z takovýchto zdrojů se jeví čistírenské kaly.

Hlavním cílem diplomové práce je vyhodnocení a kvantifikace efektivity dlouhodobé aplikace čistírenských kalů z hlediska různých frakcí přístupného fosforu v půdě v rozdílných půdně-klimatických podmínkách.

Působení čistírenských kalů v půdě bylo sledováno v dlouhodobém přesném polním pokusu založeném v roce 1996 na stanovištích Humpolec, Hněvčeves a Suchdol. Obsah vodorozpustného (vodný výluh) a mobilního fosforu (Mehlich 3) byl analyzován z archivních vzorků z roku 1999, 2002, 2005, 2008 a 2011. Tyto vzorky byly odebrány vždy po sklizni sledovaných plodin. Osevní postup je založen na jednotné dávce dusíku 330 kg/ha na celý osevní postup, ve kterém jsou zařazeny brambory, pšenice a ječmen. Hodnoceny jsou varianty hnojené čistírenskými kaly, hnojem a NPK ve srovnání s kontrolní nehnojenou variantou.

Byla potvrzena hypotéza, že nejlepším zdrojem vodorozpustného i mobilního fosforu je v pokusu při použité dávce varianta hnojená čistírenskými kaly. Varianta hnojená hnojem byla druhým nejlepším zdrojem vodorozpustného i mobilního fosforu. Varianta hnojená minerálními hnojivy ve většině případů zvýšila obsah vodorozpustného i mobilního fosforu, ale v porovnání s předešlými dvěma variantami méně. Nejnižší hodnoty u všech stanovišť zpravidla vykazovala kontrolní nehnojená varianta, kde obsah vodorozpustného i mobilního fosforu v průběhu pokusu postupně klesal nebo zůstával srovnatelný s obsahem v době založení pokusu.

Bylo rovněž potvrzeno dlouhodobé působení čistírenských kalů a hnoje. Po jejich aplikaci k bramborám nedocházelo k poklesu obsahu fosforu v půdě ani v následujících letech po sklizni pšenice a ječmene.

V rámci diplomové práce byla rovněž zjištěna středně silná až silná závislost mezi obsahem mobilního a vodorozpustného fosforu.

Výsledky získané v této práci mohou posloužit pro další studie. Lze navázat pracemi zabývajícími se vlivem sledovaných hnojiv na změny obsahů dalších frakcí P v půdě a odběry fosforu rostlinami.

## 9 SEZNAM LITERATURY

- Balík, J. 1993. Základy výživy rostlin. Institut výchovy a vzdělávání ministerstva zemědělství ČR. Praha. 36 s. ISBN: 8071050563.
- Balík, J., Kulhánek, M., Pavlíková, D., Tlustoš, P., Wisniowska-Keilian, B. 2008. Fosfor v půdě. Sborník z konference „Racionální použití hnojiv zaměřené na problematiku výživy a hnojení fosforem“. Praha. KAVR. 23 – 30 s. ISBN: 9788021318564.
- Balík, J., Pavlíková, D., Vaněk, V., Černý, J. 2009. Vliv hnojení na půdní vlastnosti a půdní úrodnost. „Racionální použití hnojiv zaměřené na půdní úrodnost, organickou hmotu v půdě a použití statkových a minerálních hnojiv.“ Praha. KAVR. 11 – 15 s. ISBN: 9788021320062.
- Balík, J., Vaněk, V., Pavlíková, D., Kulhánek, M., Jakl, M. 2002. Fosfor v půdě a jeho koloběh v přírodě. Sborník z konference „Racionální použití hnojiv zaměřené na problematiku fosforu v rostlinné výrobě“. Praha. KAVR. 26 – 34 s. ISBN: 8021309571.
- Bartoš, J., Kopec, K., Myslík, V., Peza, Z., Rod, J. 2000. Pěstování a odbyt zeleniny. AGROSPOJ. Praha. 323 s.
- 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. 295 – 301.
- Bizík, J., Fecenko, J., Kotvas, F., Ložek, O. 1998. Metodika hnojenia a výživy rastlín. AT PUBLISHING. Bratislava. 114 s. ISBN: 8096781219.
- Bourioug, M., Aloui-Sossé, L., Laffray, X., Raouf, N., Benbrahim, M., Badot, P. M., Alaoui-Sossé, B. 2014. Evaluation of Sewage Sludge Effects on Soil Properties, Plant Growth, Mineral Nutrition State, and Heavy Metal Distribution in European Larch Seedlings (*Larix decidua*). *The Arabian Journal for Science and Engineering*. 39. 5325 – 5335.
- BS EN 13346. Determination of trace elements and phosphorus. Aqua regia extraction methods. 2000. British Standards Institution. p. 34.
- Bunting, A. H. 1963. Experiments on organic manures. *The Journal of Agricultural Science*. 60. 121 – 140.
- Catroux, G., L'Hermite, P., Suess, E. 1983. The Influence of sewage sludge application on physical and biological properties of soils. D. Riedel. Dordrecht. p. 253. ISBN: 9027715017.

- Citak, S., Sonmez, S. 2011. Effects of Different Organic Manure Applications on the Macro Nutrient Contents of Soil in Different Growing Seasons. *Journal of Agricultural Science and Technology*. 5. 149 – 153.
- Coker, E. G., Carlton-Smith, C. H. 1986. Phosphorus in sewage sludges as a fertilizer. *Waste Management & Research*. 4. 303 – 319.
- 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 s. ISBN: 802131401X.
- Černý, J. Využití odpadů z ČOV jako zdroje organických látek a živin. *Biom. cz* [online]. 2010 [cit. 2015-3-11], Dostupné z <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/vyuziti-odpadu-z-cov-jako-zdroje-organickych-latek-a-zivin>>.
- 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., Kulhánek, M., Shejbalová, Š., Vašák, F., Vaněk, V. 2012. Statková hnojiva a jejich využití u zahradních plodin. „Racionální použití hnojiv zaměřené na problematiku výživy zahradních plodin.“ Praha. KAVR. 39 – 46 s. ISBN: 9788021323315.
- Česko. Předpis č. 382 ze dne 17. října 2001 o podmínkách použití upravených kalů na zemědělské půdě. In: *Sbírka zákonů České republiky*. 2001. částka 145. Dostupné z <http://www.mzp.cz/www/platnalegislativa.nsf/d79c09c54250df0dc1256e8900296e32/384b1f568b108495c12570060046ea82?OpenDocument>
- Dohányos, M. 2004a. Efektivní využití a likvidace čistírenských kalů. *Odpadové fórum*. 5. 8 – 11.
- Dohányos, M. 2004b. Minimalizace produkce čistírenských kalů. Sborník semináře 040224 „Kaly z čistíren odpadních vod“. Pardubice – Semtín. Callisto-96. 39 - 48 s. ISBN: 8086832007.
- Dostál, J., Kratochvíl, J. 2004. Využití kalů z čistíren odpadních vod v zemědělství, programy a zkušenosti. Sborník semináře 040224 „Kaly z čistíren odpadních vod“. Pardubice – Semtín. Callisto-96. 81 - 88 s. ISBN: 8086832007.
- Gergeľová, Z. 2008. Využitie čistiarenských kalov a dnových sedimentov v pôdohospodárstve. *Agroinštitút Nitra*. Nitra. 27 s. ISBN: 9788071391265.
- Grécová, M., Chaloupka, V., Frank, K., Čejka, J., Petrášek, K., Chvátal, V., Valter, S., Petr, J. 1996. Zkušenosti z praktického využívání čistírenských kalů v zemědělství. *Česká vědeckotechnická vodohospodářská společnost*. Plzeň. 64 s. ISBN: 8002011112.

- Haan, S. de. 1980. Sewage sludge as a phosphate fertilizer. *Phosphorus in Agriculture*. 78. 33 – 41.
- 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 s. ISBN: 8021312327.
- Hlušek, J. 2004. Základy výživy a hnojení zeleniny ovocných kultur. Ústav zemědělských a potravinářských informací. Praha. 56 s. ISBN: 8072711474.
- Hlušek, J., Richter, R., Ryant, P. 2002. Výživa a hnojení zahradních plodin. Redakce odborných časopisů: *Zemědělec, Farmář, Úroda, Náš chov, Veterinářství, Zahradnictví, Floristika, Krmivářství, Rostlinolékař, Agroweb*. Praha. 81 s. ISBN: 8090241352.
- Hlušek, J., Trávník, K. 2002. Výsledky dlouhodobých hnojařských pokusů. „Racionální použití hnojiv zaměřené na problematiku fosforu v rostlinné výrobě.“ Praha. KAVR. 61 – 65 s. ISBN: 8021309571.
- Huang, X. L., Chen, Y., Shenker, M. 2012. Dynamics of phosphorus phytoavailability in soil amended with stabilized sewage sludge materials. *Goederma*. 170. 144 – 153.
- Ivanič, J., Havelka, B., Knop, K. 1984. Výživa a hnojenie rastlín. *Príroda*. Bratislava. 488 s.
- Kalina, M. 2005. Hnojení v zahradě. Grada Publishing, a. s. Praha 7. 116 s. ISBN: 802471275X.
- Kara, D., Özsavaşçı, C, Alkan, M. 1997. Investigation of suitable digestion methods for the determination of total phosphorus in soils. *Talanta* 44 (11). 2027 – 2032.
- Kidd P.S., Domínguez-Rodríguez M.J., Díez J., Monterosso C. 2007. Bioavailability and plant accumulation of heavy metals and phosphorus in soils amended by longterm application of sewage sludge. *Chemosphere*. 66. 1458-1467.
- Klír, J., Kunzová, E., Čermák, P. 2008. Rámcová metodika výživa rostlin a hnojení. Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i. Praha. 48 s. ISBN: 9788087011614.
- Kolář, L., Kužel, S. 2002. Organický fosfor v půdách. Sborník z konference „Racionální použití hnojiv zaměřené na problematiku fosforu v rostlinné výrobě“. Praha. KAVR. 35 – 37 s. ISBN: 8021309571.
- Kořenek, J. 1993. Výživa rostlin. Český ovocnářský a zahrádkářský svaz. Praha. 32 s.
- Kotovicová, J., Vaverková, M. 2012. Výzkum možnosti využití kalů z čistíren odpadních vod na plantážích rychle rostoucích dřevin. *Acta environmentalica universitalis comeniana* (Bratislava). 20 (1): 29 – 37.

- Kováčik, P. 2007. Výživa a úroveň hnojenia rastlín (stručne). Ústav vedecko-technických informácií pre pôdohospodárstvo. Nitra. 96 s. ISBN: 9788089088591.
- Královec, J., Fryček, A., Velich, J., Baláš, J. 1989. Hnojení travních porostů. „Komplexní metodika výživy rostlin“. Ústav vědeckotechnických informací pro zemědělství. Praha. 154 – 162.
- Kulhánek, M., Balík, J., Černý, J. Habásková, B. 2003. Použití slabých atraktantů pro stanovení okamžitě přístupného fosforu v půdě. „Racionální použití hnojiv zaměřené na problematiku vápnění“. Praha. KAVR. 42 – 46 s. ISBN: 802131401X.
- 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 s. ISBN: 802131401X.
- Kulhánek, M., Balík, J., Černý, J., Kozlovský, O., Nedvěd, V. 2009a. The content of available phosphorus in soils and P uptake by plants. *Scientia Agriculture Bohemica*. 40 (3). 105 – 109.
- 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. 151 – 157.
- 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.
- Kunzová, E. 2009. Výživa rostlin a hnojení fosforem. Výzkumný ústav rostlinné výroby, v.v.i. Praha 6 – Ruzyně. 24 s. ISBN: 9788074270154.
- Kusá, H., Růžek, P. 2001. Hygienická úprava a zemědělské využití kalů z ČOV. Sborník referátů z odborné konference „Materiálové a energetické využití odpadů“. Praha. Výzkumný ústav rostlinné výroby. 21 – 40 s. ISBN: 8086555054.
- Lewis, D. R., McGechan, M. B. 2002. A Review of Field Scale Phosphorus Dynamics Models. *Biosystems Engineering*. 82 (4). 359 – 380.
- Li, R., Yin, J., Wang, W., Li, Y., Zhang, Z. 2014. Transformation of phosphorus during drying and roasting of sewage sludge. *Waste Management*. 34. 1211 – 1216.

- Lindsay, W.L., 1979. Chemical equilibria in soils: Colorado State University, Fort Collins, USA., p. 449.
- Luscombe, P. C., Syers, J. K., Gregg, P. E. H., 1979. Water extraction as a soil testing procedur efor phosphate. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 10. 1361 – 1369.
- Maeder, P., Fliessbach, A., Dubois, D., Gunst, L., Fried, P. Niggli, U. 2002. Soil Fertility and Biodiversity in Organic Farming. *Science*. 296. 1694 – 1697.
- Macháček, V., Čermák, P. 2004. Stabilizace půdní úrodnosti z hlediska výživy fosforem a draslíkem. Výzkumný ústav rostlinné výroby. Praha. 18 s. ISBN: 8086555488, 808654852X.
- Marschner, H. 1995. Mineral nutrition of higher plants. Academia Press. San Diego CA, USA. p. 889. ISBN: 9780124735436.
- Matějů, L., Šounová, M., Balík, J. 2004. Mikrobiologické parametry kalů. Sborník semináře 040224 „Kaly z čistíren odpadních vod“. Pardubice – Semtín. Callisto-96. 49 - 56 s. ISBN: 8086832007.
- Materechera, S. A., Morutse, H. M. 2009. Response of maize phosphorus from fertilizer and chicken manure in a semi-arid environment of South Africa. *Experimental Agriculture*. 45. 261 – 273.
- McDowell, R.W., Sharpley, A.N., 2001. Soil phosphorus fraction in solution: influence of fertiliser and manure, filtration and method of determination. *Chemosphere*. 45. 737-748.
- Mehlich, A. 1984. Mehlich 3 soil test extractant: A modification of Mehlich 2 extractant. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 15. 1409 – 1416.
- Mengel, E., Kirbky, E. A. 1982. Principles of plant nutrition. International Potash Institute. Worblaufen-Bern. p. 655.
- Michalová, M. 2004. Kaly v ČR, přehledy a trendy srovnání se zeměmi EU. Sborník semináře 040224 „Kaly z čistíren odpadních vod“. Pardubice – Semtín. Callisto-96. 18 - 25 s. ISBN: 8086832007.
- Morel, C., Tiessen, H., Stewart, J. W. B. 1996. Correction for P-sorption in the measurement of soil microbial biomass P by CHCl<sub>3</sub> fumigation. *Soil Biology and Biochemistry*. 28. 1699 – 1706.
- Nátr, L. 2002. Fotosyntetická produkce a výživa lidstva. ISV nakladatelství. Praha. 424 s. ISBN: 8085866927.

- Nerudová, M. 1978. Využití odvodněných kalů z městských čistíren ke zúrodnění půd. Ústav vědeckotechnických informací pro zemědělství. Nové město nad Cidlinou. 32 s.
- Nerudová, M. 1984. Komplexní systém hnojení kaly z čistíren odpadních vod veřejných kanalizací. Ústav vědeckotechnických informací pro zemědělství. Nové Město nad Cidlinou. 54 s.
- Neuberg, J. 1998. Hnojení a výživa rostlin na zahradě. Grada Publishing spol. s r. o. Praha. 152 s. ISBN: 8071694967.
- Nimje, P. M., Seth, J. 1986. Effect of phosphorus, farmyard manure and nitrogen on some soil properties in a soya bean-maize sequence. The Journal of Agricultural Science. 107. 555 - 559.
- 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 s. ISBN: 9788021318564.
- Petersen, J. 2003. Nitrogen fertilizer replacement value of sewage sludge, composted household waste and farmyard manure. The Journal of Agricultural Science. 140. 169 – 182.
- Petersen, S. O., Henriksen, K., Mortensen, G. K., Krogh, P. H., Brandt, K. K., Sørensen, J., Madsen, T., Petersen, J. Grøn, C. 2003. Recycling of sewage sludge and household compost to arable land: fate and effects of organic contaminants, and impact on soil fertility. Soil & Tillage Research. 72. 139 - 152.
- Raclavská, H. 2007. Technologie zpracování a využití kalů z ČOV. Vysoká škola báňská – Technická univerzita. Ostrava. 172 s. ISBN: 9788024816005.
- Richter, R., Hlušek, J. 1996. Průmyslová hnojiva, jejich vlastnosti a použití. Institut výchovy a vzdělávání Ministerstva zemědělství České republiky v Praze. 50 s. ISBN: 8071051217.
- Richter, R., Římovský, K. 1996. Organická hnojiva, jejich výroba a použití. Institut výchovy a vzdělávání Ministerstva zemědělství České republiky v Praze. 40 s. ISBN: 8071051179.
- Rudolf, E. 2004. Čistírenské kaly z hlediska právních předpisů a ochrany životního prostředí. Sborník semináře 040224 „Kaly z čistíren odpadních vod“. Pardubice – Semtín. Callisto-96. 5 – 6 s. ISBN: 8086832007.
- Růžek, P., Kusá, H., Mühlbachová, G. 2000. Používání různě zpracovaných kalů z ČOV v zemědělství. Sborník přednášek z odborné konference „Možnosti využití kalů



- z ČOV v zemědělství“. Praha. Výzkumný ústav rostlinné výroby. 53 – 60 s. ISBN: 8023853333.
- Rybáček, V., Čača, Z., Fric, V., Fricová, E., Šroller, J., Votoupal, B., Daniel, J., Findejs, R., Míča, B., Radil, B., Rasochová, M., Rasocho, V., Tuček, V., Vokál, B., Zrůst, J. 1988. Brambory. Státní zemědělské nakladatelství. Praha. 358 s.
- Shah, G. A. 2013. Improving the agro-environmental value of old cattle manure. Wageningen University. Wageningen. p. 194. ISBN: 9789461736499.
- Sharpley, A. N. 1995. Soil phosphorus dynamics: agronomic and environmental impacts. *Ecological Engineering*. 5. 261 – 279.
- Schmidt, J. P., Buol, S. W., Kamprath, E. J. 1997. Soil phosphorus dynamics during 17 years of continuous cultivation: A method to estimate long-term P availability. *Geoderma*. 78. 59 – 70.
- Sirotková, D. 2004. Právní předpisy pro nakládání s čistírenskými kaly a jejich působení v praxi. Sborník semináře 040224 „Kaly z čistíren odpadních vod“. Pardubice – Semtín. Callisto-96. 7 – 11 s. ISBN: 8086832007.
- Sponar, J. 2004. Praktické poznatky k nakládání s kaly na jižní Moravě. Sborník semináře 040224 „Kaly z čistíren odpadních vod“. Pardubice – Semtín. Callisto-96. 59 – 69 s. ISBN: 8086832007.
- Sulzberger, R. 2007. Kompost, půda, hnojení: zdravá zahradní půda, výživa rostlin, hnojení. Rebo. Čestlice. 96 s. ISBN: 9788072346547.
- Syers, J. K., Johnston, A. E., Curtin, D. 2008. Efficiency of soil and fertilizer phosphorus use: reconciling changing concepts of soil phosphorus behaviour with agronomic information. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome. p. 108. ISBN: 9789251059296.
- Škarda, M. 1989. Organické hnojení. „Komplexní metodika výživy rostlin“. Praha. Ústav vědeckotechnických informací pro zemědělství. 31 – 55 s.
- Thomsen, I. K., Jensen, E. S. 1994. Recovery of nitrogen by spring barley following incorporation of N-labelled straw and catch crop material. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 49. 115 – 122.
- Tieszen, H., Moir, J. O. 1993. Characterization of available P by sequential extraction. In: Carter, M. R. (ed.): *Soil Sampling and Methods of Analysis*. Boca Raton, USA, Lewis Publishers, p. 75 – 86. ISBN: 0873718615.
- Tlustoš, P., Száková, J., Budňáková, M., Hendrych, K., Mihalík, J., Trakal, L. 2008. Zdroje fosforu a výroba fosforečných hnojiv. Sborník z konference „Racionální použití hnojiv

- zaměřené na problematiku výživy a hnojení fosforem“. Praha. KAVR. 42 – 51 s. ISBN: 9788021318564.
- Tunney, H., Carton, O. T., Brookes, P. C., Johnston, A. E. 1997. Phosphorus Loss from Soil to Water. CAB INTERNATIONAL. Willingford. p. 467. ISBN: 0851991564.
- Vaněk, V., Balík, J., Černý, J., Pavlík, M., Pavlíková, D., Tlustoš, P., Valtera, J. 2012. Výživa zahradních rostlin. Academia. Praha. 568 s. ISBN: 9788020021472.
- Vaněk, V., Balík, J., Pavlíková, D., Tlustoš, P. 2007. Výživa polních a zahradních plodin. Profi Press, s. r. o. Praha. 176 s. ISBN: 9768086726250.
- Vaněk, V., Čermák, P., Kolář, L., Černý, J. 2008. Současná úroveň spotřeby fosforečných hnojiv a vývoj obsahu přijatelného fosforu v půdách ČR. Sborník z konference „Racionální použití hnojiv zaměřené na problematiku výživy a hnojení fosforem“. Praha. KAVR. 52 – 59 s. ISBN: 9788021318564.
- Vostal, J. 1994. Základy výživy a hnojení hlavních plodin. AGROFERT, a. s., Praha. 94 s.
- Werner, W. 1994. Optimierung der zeitlich und mengenmässig differenzierten Anwendung vom Wirtschaftsdüngern im Rahmen der Fruchtfolge organischer Anbausysteme. Landwirtschaftliche Fakultät der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität. Bonn. p. 128. ISBN: 09439684.
- Xu, T., Jumei L., Yibing, M., Xiyang, H., Xiuying, L. 2008. Phosphorus efficiency in long-term (15 years) wheat–maize cropping systems with various soil and climate conditions. 108. 231 -237.
- Zábranská, J. 2004. Technologie stabilizace čistírenského kalu s hygienizačním účinkem. Sborník semináře 040224 „Kaly z čistíren odpadních vod“. Pardubice – Semtín. Callisto-96. 26 – 32 s. ISBN: 8086832007.
- Zapata, F., Roy, R. N. 2004. Use of phosphate rocks for sustainable agriculture. Food and agriculture organization of the united nations. Rome. p. 148. ISBN: 9251050309.
- Zelený, F. 1993. Výživa rostlin a potřeba hnojení. Ústav zemědělských a potravinářských informací. Praha. 59 s.
- Zimolka, J. (eds.). 2006. Ječmen – formy a užitkové směry v ČR. Profi Press, s. r. o. Praha. 200 s. ISBN: 8086726185.