

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů

Katedra agroenvironmentální chemie a výživy rostlin



Vliv hnojení čistírenskými kaly na bilanci fosforu v půdě

Diplomová práce

Autor práce: Ing. Petra Dat'ková

Obor studia: Ochrana a využívání přírodních zdrojů

Vedoucí práce: Ing. Jindřich Černý, Ph.D.

© 2018 ČZU v Praze

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci " Vliv hnojení čistírenskými kaly na bilanci fosforu v půdě " jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autorka uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 9. 4. 2018

Poděkování

Touto cestou děkuji svému vedoucímu diplomové práce Ing. Jindřichu Černému, Ph.D. za odborné vedení a cenné rady, které mi při vypracování této práce věnoval. Děkuji též technikům KAVR za pomoc při přípravě a analýzách vzorků.

Vliv hnojení čistírenskými kaly na bilanci fosforu v půdě

Souhrn

Fosfor (P) hraje zásadní roli v zemědělství i všech formách života. Fosfor je důležitou rostlinnou makroživinou, v půdě je však málo mobilní, což omezuje jeho dostupnost pro rostliny. Děje jako jsou dýchání, fotosyntéza nebo i rozklad odpadu vyžadují přiměřenou úroveň fosforu. Pro udržení vysoké rostlinné produkce kvůli rostoucí světové populaci jsou nutné významné vstupy P. Fosfor je většinou získáván z vytěženého horninového fosfátu a kombinován v minerálních hnojivech se sírou, dusíkem a draslíkem. Fosfor ve formě minerálních hnojiv je konečný a ubývající zdroj. Proto je třeba hledat udržitelnější alternativu i pro budoucí potravinovou bezpečnost. Možným řešením je využití i některých odpadních látek obsahující P, jako například čistírenské kaly.

V experimentální části byla hodnocena bilance P u dlouhodobých pokusů na stanovištích Humpolec, Hněvčeves a Praha – Suchdol u pšenice ozimé (*Triticum aestivum*). Porovnávány byly čtyři varianty hnojení a varianta kontrolní nehnojená ve dvou letech 2013 a 2014. Jako hnojivo byly aplikovány čistírenské kaly ve dvou experimentálních dávkách. Kal 1 v průměrné dávce 201 kg P/ha a Kal 3 v průměrné dávce 603 kg P/ha za tříletý cyklus. Dalšími variantami bylo hnojení minerálním hnojivem NPK v průměrné dávce 90 kg P/ha za tříletý cyklus a minerálním dusíkem. Hodnocen byl odběr P zrnem a slámou, jeho obsah v zrně a slámě a bilance P, při níž byl započítán vstup P a odběr P rostlinami. Odběr P byl vždy výrazně nižší pro nehnojenou variantu. Nejméně se lišily odběry P zrnem pšenice při porovnání obou let pro stanoviště Suchdol. Největší rozdíl v odběru fosforu mezi stanovišti byl zaznamenán pro hnojenou variantu Kal 1 a Kal 3. U varianty Kal 1 a Kal 3 byla zjištěna přímo úměrná závislost výnosu a odběru fosforu zrnem pšenice ozimé pro všechna zkoumaná stanoviště. Při aplikaci nadměrného množství P ve formě Kal 3 nebyl výnos pro tuto variantu hnojení u všech stanovišť vyšší než výnosy u ostatních hnojených variant. Z výsledků vyplývá, že hnojení čistírenskými kaly má pozitivní dopad na bilanci fosforu v půdě.

Klíčová slova: fosfor; bilance fosforu; efektivita využití fosforu; dlouhodobý polní pokus; čistírenské kaly

The effect of sewage sludge application on phosphorus balance in soil

Summary

Phosphorus (P) plays a vital role in agriculture and all forms of life. P is an important plant macronutrient, but it is less mobile in soil, which limits its availability for plants. Processes like respiration, photosynthesis or even decomposition of waste require an adequate level of P. To maintain high crop production due to the growing world population, significant phosphorus inputs are required. P is mostly obtained from mined phosphate rock and is often combined in mineral fertilizers with sulphur, nitrogen and potassium. P in the form of mineral fertilizers is the ultimate source. It is therefore necessary to look for a more sustainable alternative for future food security. A possible solution is the use of some P-containing waste, such as sewage sludge.

In the experimental part the P balance was evaluated in long-term experiments at Humpolec, Hněvčeves and Praha-Suchdol sites in winter wheat (*Triticum aestivum*). Four fertilization variants and a control variant were compared in two years 2013 and 2014. As a fertilizer, sewage sludge (SS) was applied in two experimental batches, SS 1 at an average dose of 201 kg P/ha and SS 3 at an average dose of 603 kg P/ha for a three-year cycle. Other variants were NPK fertilizer at an average dose of 90 kg P/ha over a three-year cycle and mineral nitrogen. The P uptake in grain and straw, the phosphorus content in grain and straw and the balance of P were evaluated, in which the P input and the P uptake were counted. The P uptake was significantly lower at all sites for the non-fertilized variant. The least varied P uptake in the wheat grain samples when comparing the two years was on the Suchdol site. The greatest difference in P uptake between the sites was registered for the fertilization variants of SS 1 and SS 3. For the SS 1 and SS 3 variants, the proportional dependence of yield and P uptake at winter wheat grain was found to be directly proportional to all the sites examined. With the application of an excessive amount of P in the form of variant SS 3, the yield for this fertilizer variant at all sites was not higher than that of the other fertilized variants. The results show that sludge fertilization has a positive impact on soil phosphorus balance.

Keywords: phosphorus; phosphorus balance; phosphorus efficiency; long-term field trial; sewage sludge

OBSAH

1 Úvod.....	9
2 Vědecká hypotéza a cíl práce	11
3 Literární část	12
3.1 Fosfor v půdě	12
3.1.1 Organický fosfor	13
3.1.2 Fosfor mikrobiální biomasy	15
3.1.3 Anorganický fosfor	16
3.1.4 Koloběh fosforu	17
3.1.5 Procesy ovlivňující fosfor v půdě	19
3.1.6 Metabolismus fosforu v rostlinách	19
3.2 Udržitelnost v hospodaření s fosforem.....	21
3.2.1 Možnosti recyklace fosforu	21
3.3 Hnojení čistírenskými kalů	22
3.3.1 Možnosti aplikace kalů	23
3.3.2 Možné změny vybraných půdních vlastností po aplikaci kalu	24
3.3.3 Vliv aplikace kalu na rostliny	25
3.3.4 Změny obsahu makroživin v plodinách po aplikaci kalu	26
3.4 Legislativa týkající se čistírenských kalů a možnosti jejich aplikace.....	27
3.4.1 Právní předpisy EU týkající se čistírenských kalů.....	27
3.4.2 Právní předpisy ČR týkající se čistírenských kalů.....	28
3.4.3 Právní předpisy sousedních států týkající se čistírenských kalů.....	30
4 Materiál a metody	34

4.1	Odběr a zpracování vzorků.....	35
4.2	Suchý rozklad	36
4.3	Stanovení metodou ICP-OES.....	36
5	Výsledky	38
5.1	Obsah fosforu v zrně a slámě pšenice ozimé	38
5.2	Odběr fosforu zrnem a slámou pšenice ozimé.....	40
5.3	Výnos zrna a slámy pšenice ozimé.....	48
5.4	Závislost odběru fosforu zrnem a slámou pšenice ozimé na výnosu	51
5.5	Bilance příjmu a odběru fosforu.....	56
6	Diskuze	59
6.1	Obsah fosforu v zrně a slámě pšenice ozimé	59
6.2	Odběr fosforu zrnem a slámou pšenice ozimé.....	60
6.3	Výnos zrna a slámy pšenice ozimé.....	65
6.4	Bilance příjmu a odběru fosforu.....	66
7	Závěr.....	70
8	Literatura.....	71

1 ÚVOD

Výroba potravin je pro naši existenci zásadní, a přesto plýtváme světovou zásobou fosforu, rozhodující složkou pro produkci potravin rostlinného původu. Fosfor je konečný a ubývající zdroj. Ovšem spíše než na množství fosforu, které v budoucnu může pomoci zajistit dostatek potravy na Zemi, jsou vědci zaměřeni na současnou výrobu a používání fosfátové horniny. Dnes je fosfor většinou získáván z vytěženého horninového fosfátu a často je kombinován v minerálních hnojivech se sírou, dusíkem a draslíkem. Fosfátová hornina je fosilní a magmatický sediment s vysokým obsahem fosforu, který se nahromadil před desítkami až stovky milióny lety, převážně na mořském dně. Panují obavy z rychlého vyčerpání světových zásob fosforu. Většina vědeckých diskuzí, stejně tak jako diskuzí společností zabývajících se výrobou minerálních hnojiv, se zaměřila na odhady míry vyčerpání zásob fosfátové horniny. Přesné načasování vrcholu a celkového vyčerpání zásob fosfátových hornin však závisí na několika parametrech a je proto velmi nejisté. Tyto parametry se týkají poptávky a nabídky fosfátové horniny. Parametry související s poptávkou zahrnují zvýšení počtu obyvatel, způsoby stravování, zemědělskou efektivitu, výrobní a zpracovatelské postupy a ztráty a plýtvání v celém potravinovém řetězci. Také posun ve využití alternativních materiálů obsahujících fosfor, jako je hnůj, lidské výkaly, organický odpad, masokostní moučka, čistírenské kaly a další recyklovatelné zdroje, silně ovlivňují poptávku na rezervy fosfátu z fosilních zdrojů. Objem nabídky je charakterizován velmi nejednoznačně kvůli velké nejistotě a současně klesající kvalitě fosfátových horninových rezerv, technickým pokrokem či cenou surových vstupních surovin (jako je síra a ropa) (Neset et Cordell, 2012).

Stávající zásoby horninových fosfátů by mohly být vyčerpány během příštích 50 – 100 let. Předpokládá se, že globální produkce fosforu bude vrcholit v roce 2033. Jiné studie dospěly k závěru, že téměř polovina současně dostupných zdrojů fosforu bude vyčerpána do roku 2100, nebo že zásoby fosforových rud budou k dispozici pro příští 300 – 400 let. Průmysl zabývající se výrobou hnojiv si uvědomuje, že kvalita zásob klesá a náklady na získávání, zpracování a dopravu se zvyšují (Cordell et al., 2009; Sattari et al., 2012).

K zajištění produkce potravin pro předvídanou světovou populaci v roce 2050 je potřebné významné zlepšení zemědělské produktivity a efektivity při využívání zdrojů. Výroba potravin musí růst rychleji než celosvětová populace i kvůli měnící se lidské stravě (např. zvýšení

spotřeby masa na osobu) a produkci biopaliv. A právě i vzhledem k výraznému zlepšení v produktivitě zemědělských produktů a účinnosti využívání fosforečnanů v hnojivech je předpoklad tuto skutečnost zvládnout (Sattari et al., 2012).

Tyto závažné obavy v rámci vědecké komunity a široké veřejnosti o budoucích globálních zásobách fosforečných hnojiv iniciovaly vznik nových výzkumných platforem (např. European Sustainable Phosphorus Platform (Evropská fosforová platforma), the US Sustainable Phosphorus Research Coordination Network, the Leibniz Science-Campus Rostock „Phosphorus Research“ (Kruse et al., 2015).

2 VĚDECKÁ HYPOTÉZA A CÍL PRÁCE

Předpokládá se, že bilance fosforu ovlivněná přidavkem čistírenského kalu na půdu bude kladná. Dále se předpokládá, že bilance fosforu bude ovlivněna pH půdy.

Mezi cíle práce patří zpracovat problematiku čistírenských kalů jako zdroje fosforu v zemědělství, a to popsání faktorů, které ovlivňují obsah fosforu v kalech, případně jeho formy. Rozpracována bude rovněž i využitelnost fosforu rostlinami z kalů a dalších zdrojů v půdě, přeměny fosforu v půdě a faktory, které je ovlivňují. Rozebrána bude také problematika příjmu fosforu rostlinami s ohledem na druh polních plodin a jejich využití. V experimentální části budou vyhodnoceny výsledky dlouhodobých pokusů katedry agroenvironmentální chemie a výživy rostlin FAPPZ ČZU. Pokusy jsou založeny v České republice na stanovištích s rozdílnými půdně-klimatickými podmínkami. Hodnoceny budou vstupy fosforu v čistírenských kalech do půdy, odběr fosforu pěstovanými plodinami a vypočteny budou bilance fosforu. Porovnán bude vliv čistírenských kalů s dalšími vybranými hnojivy a zastoupení pěstovaných plodin v osevním postupu. Výsledkem bude porovnání těchto variant mezi sebou.

3 LITERÁRNÍ ČÁST

3.1 Fosfor v půdě

Fosfor je 11. nejhojnějším prvkem zemské kůry. Hraje zásadní roli v zemědělství i ve všech formách života: dýchání, fotosyntéza v zelených listech, mikrobiální přeměny a rozkládání odpadu vyžadují přiměřenou úroveň fosforu ve specializovaných formách (Haygarth et al., 2013).

Fosfor je důležitou rostlinnou makroživinou, která tvoří asi 0,2 % hmotnosti sušiny rostlin. Půdní fosfor je z hlavních rostlinných živin nejméně mobilní a nejméně dostupnou živinou. Po dusíku je fosfor druhou nejčastěji omezující makroživinou pro růst rostlin. Jeho nízká dostupnost byla popsána jako „hrdlo láhve světového hladu“. Tvoří součást klíčových molekul, jako jsou nukleové kyseliny, fosfolipidy a ATP, a proto rostliny bez dobré dostupnosti této živiny nemohou růst. Fosfor se rovněž podílí na kontrole klíčových enzymatických reakcí a na regulaci metabolických cest (Schachtman et al., 1998; Sattari et al., 2012; Gichangi et al., 2009; Neset et Cordell, 2012).

Přestože celkové množství fosforu v půdě může být vysoké je často přítomen v nedostupných formách nebo ve formách, které jsou k dispozici pouze mimo rhizosféru. Jen velmi málo nehojených půd uvolňuje fosfor dostatečně rychle tak, aby se podpořila vysoká míra růstu různých rostlin. V mnoha zemědělských systémech je však aplikace fosforu na půdu nezbytná k zajištění produktivity rostlin, a právě v těchto půdách je obnova aplikovaného fosforu rostlinami ve vegetačním období velmi nízká, protože v půdě se více než 80 % fosforu stává nehybným a není tak k dispozici pro příjem rostlin kvůli adsorpci, srážení nebo konverzi na organickou formu (Schachtman et al., 1998).

Snadno dostupný fosfor v půdním roztoku zajišťuje většinu fosforu dostupného rostlinám. Dvěma hlavními faktory, které řídí dostupnost fosforu pro kořeny rostlin, jsou koncentrace fosforečnanových iontů v půdním roztoku a pufrovací kapacita fosforu, tj. schopnost půdy doplňovat tyto ionty, když je kořeny rostlin odebírají. Půdy se liší v jejich pufrovací kapacitě a v rozsahu, v jakém fixují fosfor v nerozpustných sloučeninách, které nejsou k dispozici pro příjem (Sattari et al., 2012).

Obsah fosforu v půdě je rozdílný v různých oblastech světa. Zatímco mnoho tropických oblastí s nízkovstupovými systémy zemědělství čelí nízké dostupnosti rozpustného fosforu, některé mírné oblasti s intenzivním zemědělstvím spojeným s chovem zvířat se musí vyrovnat s nadměrným množstvím fosforu v půdě, který ohrožuje ekosystém. V mnoha částech Spojených států a Evropy, kde jsou aplikována obrovská množství hnojiv bohatých na živiny (drůbeží či prasečí trus a jiné živočišné odpady), množství fosforu dodávané v hnojivech často převyšuje požadavky plodin (Sharma et al., 2007).

Půdní fosfor se vyskytuje v různých formách, a to organické a anorganické. V organické formě se nachází v půdách 20 až 80 % fosforu, z nichž většinu tvoří kyselina fytová (inositolhexafosfát). Zbytek se nachází v anorganické frakci, která obsahuje asi 170 minerálních forem fosforu.

Půdní mikroorganismy uvolňují imobilizované formy fosforu do půdního roztoku, některé jsou naopak odpovědné i za imobilizaci fosforu. Nízká dostupnost fosforu půdě omezuje příjem rostlinami. Půdou prochází prostřednictvím hmotového toku a difúze více rozpustných minerálů, jako je například draslík, fosfor se však pohybuje převážně difúzí. Vzhledem k tomu, že rychlost difúze fosforu je pomalá (10^{-12} až 10^{-15} m²/s), vysoká míra absorpce rostlinami vytváří kolem kořene zónu, ze které je fosfor vyčerpán (Schachtman et al., 1998).

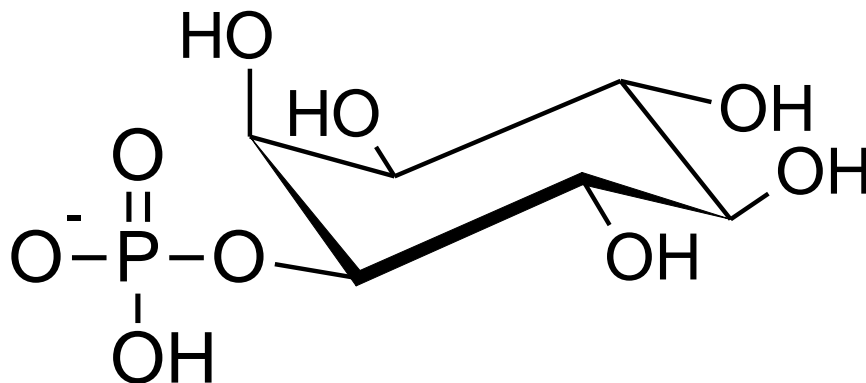
3.1.1 Organický fosfor

Organický fosfor je v půdě hojně zastoupen a je tak důležitým zdrojem fosforu pro rostliny. Snadno rovněž přechází z půdy do vody a přispívá tak i k výživě vodních organismů, včetně těch nežádoucích, produkujících toxiny (Turner et al., 2005). Jako organický fosfor se označují nukleové kyseliny, fosfolipidy, inositolfosfáty, fosfoamidy, fosfoproteiny, cukerné fosfáty, fosfonové kyseliny, organofosfátové pesticidy, organické sloučeniny fosforu a organické kondenzované fosfáty a to v rozpuštěných, koloidních a částicových formách (Turner et al., 2005).

Na základě povahy fosforové vazby se organický fosfor v půdě rozděluje na fosfátové estery, fosfonáty a anhydridy kyseliny fosforečné. Estery fosfátů jsou klasifikovány podle počtu esterových skupin spojených s fosfáty. Monoestery fosfátů jsou dominantní skupinou organických sloučenin fosforu ve většině půd. Vyskytují se hlavně jako inositolfosfáty, skupina esterů kyseliny fosforečné hexahydroxycyklohexanu (inositol). Inositolfosfáty jsou

všudypřítomnou složkou eukaryotických buněk, a předpokládá se, že představují významnou část přirozených vstupů fosforu do půd prostřednictvím rostlinných a živočišných detritů. Z fosforylovaných inositolů je nejběžnější *myo*-isomer (**Obr. 1**), i když se v půdě vyskytují i jiné stereoizomerní formy (*scyllo*, *D-chiro*, *neo*). Jeden specifický izomer, *myo*-inositol hexakisfosfát (*myo*-IP6), již zmíněn jako kyselina fytová, má vysokou hustotu náboje závislou na pH, a tak pravděpodobně interaguje s minerálními a huminovými látkami v půdní matrici. Tato reaktivita vede k vysokému stupni rekalcitrace v prostředí, čímž je často vysvětlována jeho převaha v organické frakci fosforu nejen u horských půd. Kyselina fytová je primární sloučenina pro skladování fosfátů v semenech. Téměř veškerá kyselina fytová se vyskytuje jako fyтин, vápenato-hořečnatá sůl, případně s obsahem draselných či zinečnatých iontů (obvykle s K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} nebo Zn^{2+}), která se ukládá ve formě globoidních krystalů v jednomembránových vezikulech společně s proteiny. Kyselina fytová je syntetizována z *myo*-inositolu prostřednictvím série fosforylačních kroků. Avšak o intracelulárním umístění meziproductů v biosyntéze kyseliny fytové existují pouze omezené informace.

Jiné fosfátové monoestery, jež jsou přítomné v malých množstvích v půdě, zahrnují cukerné fosfáty, fosfoproteiny a mononukleotidy (Turner et al., 2005; Cheesman et al., 2014; Turner et al., 2006; Brinch-Pedersen et al., 2002).



Obrázek 1 *myo*-inositol monofosfát (Turner et al., 2005)

Fosfátové diestery zahrnují nukleové kyseliny (DNA a RNA), fosfolipidy a teichoové kyseliny. Typicky tvoří méně než 10% půdního organického fosforu. Fosfolipidy obecně tvoří menší část půdního organického fosforu než nukleové kyseliny. Teichoové kyseliny jsou kyselé polysacharidy přítomné převážně v buněčných stěnách grampozitivních bakterií. Fosfodiestery

jsou poměrně špatně stabilizovány v extracelulárním prostředí, což vede k obecně větší labilitě a potenciálu biologického obratu (Turner et al., 2005; Nash et al., 2014).

Fosfonáty obsahují vazby uhlík-fosfor, čímž se značně odlišují od ostatních organických sloučenin fosforu přítomných v půdě. Převládajícím fosfonátem v přírodě je kyselina 2-aminoethylfosfonová, jejíž výskyt je prokázán v různých organismech. Fosfonáty se hromadí ve vlhkých, chladných nebo kyselých půdách (Turner et al., 2005).

Anhydridy kyseliny fosforečné (organické kondenzované fosfáty) se podílejí na biochemickém přenosu energie a zahrnují sloučeniny, jako je adenosin-5'-trifosfát. Obsahují fosfátové monoesterní a anhydridové vazby, které jsou však v půdě nacházeny zřídka. Většina půdního organického fosforu se stabilizuje vazbami na minerální složky půdy. Záporně nabitě organické sloučeniny fosforu se váží k minerálům, jako jsou hlinitokřemičitany a hydratované oxidy železa nebo hliníku. Mohou se vázat přímo nebo prostřednictvím vícesytných kationtů, jako je vápník nebo trojmocné železo. V důsledku toho je obtížné extrahovat většinu půdního organického fosforu i v silných rozpouštědlech. Zejména inositolfosfáty se silně sorbují na hlinitokřemičitany a reagují s kovy za vzniku nerozpustných precipitátů známých jako fytáty. Fytáty vápníku jsou nerozpustné v alkáliích, zatímco fytáty železa a hliníku jsou nerozpustné v kyselinách. Fosforečnanové diestery jsou sorbovány slaběji, i když DNA může za kyselých podmínek proniknout do mezivrstevných prostor jílu (Turner et al., 2005).

3.1.2 Fosfor mikrobiální biomasy

Fosfor mikrobiální biomasy je jednou z neaktivnějších forem fosforu v půdách a hraje důležitou roli v biogeochemickém cyklu fosforu. Mikrobiální aktivita je jeho důležitou složkou. V této formě je poskytován biologicky dostupný fosfor do suchozemských ekosystémů. Fosfor mikrobiální biomasy je označován jako klíčový indikátor biochemických procesů v půdě. Nicméně přeměna fosforu mikrobiální biomasy je z velké části způsobena krátkou životností mikroorganismů. Proto je fosfor mikrobiální biomasy jednou z neaktivnějších složek v půdě a je důležitým zdrojem biologicky dostupného fosforu v ekosystémech. Například rychlost přeměny fosforu mikrobiální biomasy v Anglii je zhruba 2,5 roku a míra přeměny v Číně je mnohem rychlejší, a to asi 0,5 roku. Potenciálně vysvětlují tento rozdíl různé varianty vegetace, stejně tak i studie probíhající na půdách s různou strukturou. Půdy s těžší strukturou

měly nižší míru přeměny ve srovnání s půdou s lehkou strukturou. Naopak klima hraje důležitou roli v mikrobiálním vývoji a složení. (Sun et al., 2008; Halecki et Gąsiorek, 2015).

3.1.3 Anorganický fosfor

Za hlavní anorganické složky fosforu se považují složky, které: i) jsou adsorbovány výměnnými místy; (ii) spojené s oxidy železa, hliníku a manganu; (iii) spojené s uhličitany; (iv) spojené s vápníkem jako apatit; nebo (v) vázané v krystalické minerální formě (například křemičitany) (Turner et al., 2005).

Výskyt anorganického fosforu a jeho formy závisí na typu půdy a na dalších charakteristikách půdy a půdního roztoku. V různých půdách tedy převládají jednotlivé formy anorganického fosforu, aktivní formy anorganického fosforu, včetně fosforu adsorbovaného na povrch oxidů hliníku a železa (Al-P a Fe-P), či spojeného s vápníkem (Ca-P) jako sekundární precipitát nebo přírodními minerály, jako je apatit nebo jako neaktivní formy. Všechny formy fosforu mohou existovat ve všech půdních typech, ale fosfor vázaný na oxidy hliníku a železa je bohatě zastoupen ve vysoce zvětralých kyselých půdách, zatímco Ca-P převládá v mladých vápenitých půdách ze suchých a polosuchých oblastí, které mají obvykle vysoké pH. V kyselých půdách jsou hlavními adsorbujícími činidly fosfátu krystalické a nekystalické oxidy Fe a Al (seskvioxidy) (Melese et al., 2015).

Fosfor se vyskytuje rovněž jako anorganický ortofosfát, buď jako H_2PO_4^- nebo HPO_4^{2-} , v závislosti na pH půdního roztoku. Tyto formy jsou pro rostliny přijatelné, a proto mají rozhodující funkce v mnoha procesech, jako je energetický metabolismus, syntéza nukleových kyselin a membrán, stejně jako fotosyntéza. Předpokládá se, že koncentrace volného (mobilního) anorganického fosforu v půdě se pohybují v rozmezí od 1 do 10 μM a tato nízká dostupnost omezuje produktivitu rostlin v mnoha suchozemských ekosystémech. Anorganický fosfor představuje kontinuum lability, od ortofosfátu v roztoku až po vysoce rekalitrantní formy. Ve většině půd se dynamika fosforu řídí především fyzikálně chemickými procesy sorpce-desorpce a srážení-rozpouštění. Biologické procesy mikrobiální imobilizace, remineralizace imobilizovaného fosforu a mineralizace nemikrobiálního organického fosforu rovněž odstraňují nebo doplňují fosfátové ionty v půdním roztoku (Plassard et al., 2011; Bünemann et al., 2012).

3.1.4 Koloběh fosforu

Koloběh fosforu v půdě je dynamický systém zahrnující půdu, rostliny a mikroorganismy. Hlavní procesy zahrnují příjem fosforu půdy rostlinami, recyklaci vrácením rostlinných a živočišných zbytků, biologickou přeměnu mineralizace - imobilizace, fixační reakce na povrchu jílu a oxidů, a solubilizaci a tvorbu minerálních fosfátů chemickými reakcemi a aktivitou mikroorganismů.

V přírodních systémech se veškerý fosfor využívaný rostlinou vrací zpět do půdy v rostlinných a živočišných zbytcích, při kultivaci se ve sklizni nějaký fosfor odebere a vrátí se pouze část. Většina ztrát půdního fosforu vzniká erozí, menší ztráty nastávají následkem vyluhování (Stevenson et Cole, 1999).

Fosfor v půdním roztoku

V porovnání s ostatními makroživinami jako je například síra a vápník, je koncentrace fosforu v půdním roztoku velmi nízká. Obecně je se vyskytuje v koncentraci od 0,001 mg/l ve velmi neúrodných půdách do 1 mg/l v úrodných, velmi hnojených půdách. Kořeny rostlin přijímají fosfor rozpuštěný v půdním roztoku, nejvíce jako fosforečnanové ionty (HPO_4^{2-} a H_2PO_4^-), avšak takto jsou přijímány i některé organické formy fosforu.

Ve velmi kyselých půdách (pH 4 až 5,5) se vyskytuje spíše monovalentní anion H_2PO_4^- , v zásaditém prostředí alkalických půd převládá divalentní anion HPO_4^{2-} , obsah monovalentního aniontu H_2PO_4^- je však vlivem chemické sorpce nízký. Oba anionty jsou velmi významné v půdách neutrálních. Z těchto dvou aniontů je aniont H_2PO_4^- pravděpodobně více dostupným pro rostliny, ovšem důležitější pro příjem fosforu, než přítomnost konkrétního fosforečného aniontu, je vliv pH na reakce fosforu a dalších půdních složek (Brady et Weil, 2008).

Přijem kořeny a mykorhizou

Přijem fosforečnanových iontů z půdního roztoku je omezován pomalým pohybem těchto iontů k povrchu kořenů. Tento stav může být částečně překonán při proliferaci kořenů do zón, kde se ionty nacházejí. Rovněž se fosforečnanové ionty pohybují ke kořenům mnoha rostlin prostřednictvím symbiózy s mykorrhizními houbami. Mikroskopické mykorrhizní hyfy s vlákny se rozprostírají do půdy několik centimetrů od kořenových povrchů. Hyfy jsou schopny absorbovat ionty fosforu, jakmile se ionty vyskytnou v půdním roztoku a dokonce mohou mít i přístup k některému silně vázanému fosforu. Hyfy pak přivádějí fosfát do kořene transportem

do hyfálních buněk, kde retenční mechanismy půdy nemohou interferovat s pohybem fosforu. Obecně se tato mykorrhizní asociace nejlépe rozvíjí tam, kde rostou hostitelské rostliny nerušeně v půdě s nízkou dostupností fosforu. Nicméně přítomnost těchto hub byla prokázána při růstu rostlin v počátku vegetačního období, dokonce i v půdách s vysokým obsahem dostupného fosforu (Brady et Weil, 2008).

Rozklad rostlinných zbytků

V rostlině je část fosforu přemístěna do nadzemní biomasy rostlin, kde se stává součástí rostlinných pletiv. Fosfor se vrací do půdy při opadu listů a odumírání kořenů rostlin nebo při jejich konzumaci lidmi či zvířaty, a to ve formě zbytků rostlin, hrabanky a živočišného odpadu. Mikroorganismy, které rozkládají zbytky, dočasně spojují alespoň část fosforu ve svých buňkách (fosfor mikrobiální biomasy), nakonec se část fosforu uvolní mineralizací. Fosfor se pak spojí s aktivními a pasivními frakcemi půdní organické hmoty, kde je vytvořena jeho zásoba a je tak přístupný pro budoucí uvolnění. Tyto organické formy fosforu pomalu mineralizují do rozpustných forem, které mohou kořeny rostliny absorbovat, čímž se cyklus opakuje (Brady et Weil, 2008).

Zisk a ztráta

Hlavními cestami, kterými se fosfor ztrácí z půdního systému, je odvoz rostlinných produktů (5 až 50 kg/ha.rok u sklizené biomasy), eroze částic půdy nesoucí fosfor (0,1 až 10 kg/ha.rok na minerálních a organických molekulách) a vyluhování fosforu do podzemní vody (0,0001 až 0,4 kg/ha.rok).

Množství fosforu, které vstupuje do půdy z atmosféry (sorbováno na částice prachu), je poměrně malé (0,05 až 0,5 kg/ha.rok), ale může téměř vyvážit ztráty z půd v nenarušených lesních a travních ekosystémech. Optimální produkce rostlin v agroekosystému vyžaduje, aby přísun fosforu z hnojiva překročil odběr fosforu při sklizni plodiny, ale pouze do té doby, než se nahromadí dostatek fosforu pro to, aby se snížila schopnost fixace fosforu v půdě. Úroveň úrodnosti půdy a závažnost znečištění životního prostředí je z velké části určována rovnováhou - nebo nerovnováhou - mezi vstupy hnojiv a krmiv a výnosy rostlinných a živočišných produktů (Brady et Weil, 2008).

3.1.5 Procesy ovlivňující fosfor v půdě

Rozpustnost a odběr anorganického fosforu z půdního roztoku závisí na mineralogii půdy a pH. V alkalických půdách se koncentrace fosforu v půdním roztoku postupně snižuje srážením na méně rozpustné Ca-fosfáty. Ve vysoce zvětralých kyselých půdách bohatých na oxidy hliníku a železa (např. ferralsoly, které převažují v subtropických a tropických oblastech) je anorganický fosfor silně navázán na minerální silikátové jílovité a pedogenní oxidy hliníku a železa.

V průběhu času může být sorpce anorganického fosforu postupně silnější, díky pomalé difúzi fosfátu na mikropóry, které vytvářejí "okludovaný fosfor" nebo dokonce přechází na vysrážené Al- a Fe-fosfáty. Tomuto procesu, který přispívá k nízké účinnosti fosforečného hnojiva v půdách s nízkým pH, mohou částečně zabránit nízkomolekulární organické anionty a vyšší molekulární organické látky, jako jsou fulvické a huminové kyseliny, které „konkurují“ fosfátu při obsazování pozitivně nabitých vazebných míst. K desorpci fosfátů mohou také přispět chelatační organické sloučeniny. Existují však důkazy, že dynamika redoxu je úzce spojena s dynamikou sorbovaného a rozpuštěného fosfátu v důsledku přímého vlivu redoxu na rozpustnost oxidů hliníku a železa (Kruse et al., 2015).

3.1.6 Metabolismus fosforu v rostlinách

Fosfor je rostlinami přijímán v ortofosfátových formách H_2PO_4^- a HPO_4^{2-} , které se vyskytují v půdním roztoku ve velmi nízkých koncentracích (0,1 - 10 μM). Jakmile je určité množství fosforu rostlinou přijato, přemění se část na molekuly metabolické energie, a to na fosfátové estery a nukleotidy, a na strukturní molekuly, tedy na nukleové kyseliny a fosfolipidy (Broadley, Burns, & Burns, 2002). Optimální pH pro příjem fosforu 4,5 až 5,0 indikuje zvýšený rostlinný příjem H_2PO_4^- přes HPO_4^{2-} . Kvůli reakcím s půdními složkami je fosfor dodáván kořenům rostlin spíše difúzí než hmotnostním tokem. Kořeny rostlin mohou změnit dostupnost fosforu v půdním roztoku acidifikací rhizosféry, vylučováním organických kyselin a sekrecí extracelulárních fosfatáz. Rychlé vychytávání fosforu na povrchu kořene vede k tomu, že kolem kořene je 0,2 až 1,0 mm bez fosforu. Aby rostliny překonaly rozdíl koncentrace od půdního roztoku k vnitřním rostlinným buňkám, stejně jako negativní membránový potenciál, je nutná aktivní transportace přes plazmalemu (Vance, 2011).

Pokud porovnáme metabolismus rostlin s metabolismem fosforu u hub, je u hub fosfor jako anorganický fosfát snadno dostupný specializovanými transportéry. Tyto transportéry fosfátů musí pracovat v mikromolárních koncentracích, protože například hladina anorganického fosfátu v půdním roztoku je zřídka nad 10 μM . Důležitým faktorem je forma fosforu, která je přítomna při různých hodnotách pH v prostředí, kdy například při hodnotách $\text{pH} < 6,0$ existuje primárně jako H_3PO_4^- . Jiné formy anorganických fosfátů zahrnují pyrofosfát a polyfosfát. Fosforečnan z pyrofosfátu a polyfosfátu je přístupný působením například alkalických fosfatáz.

Jiné zdroje fosfátů zahrnují organofosfáty (např. fosforylethanolamin). Kromě hydrolýzy těchto sloučenin sekretovanými enzymy mohou být některé organofosfáty transportovány do buňky a dále využity (Borkovich et Ebbole, 2010).

I vzhledem k nízkým koncentracím dostupného fosforu v půdě vyvinuly rostliny dvě obecné strategie pro lepší získávání fosforu a jeho využití v prostředích chudých na živiny, a to: ty, které jsou zaměřeny na zachování a recyklaci fosforu a ty, které směřují k lepšímu získávání nebo vychytávání fosforu. Procesy, které snižují využívání fosforu, zahrnují sníženou rychlost růstu, zvýšený růst na jednotku příjmu fosforu, remobilizaci vnitřního fosforu, modifikaci metabolismu uhlíku, která obchází kroky vyžadující fosfor, alternativní cesty dýchání a změny biosyntézy membrány vyžadující méně fosforu. Procesy, které vedou ke zvýšení absorpce fosforu, zahrnují modifikovanou kořenovou architekturu a vyšší kořenový růst, vývoj kořenových chloupků vedoucí ke zvětšenému povrchu kořenové plochy, zvýšenou expresi genů přenášejících fosfor a zvýšenou produkci a exsudaci fosfatáz a organických kyselin. Tyto četné reakce na aklimatizaci na nedostatek fosforu se vzájemně nevylučují a mohou se vyskytovat u jednoho druhu (Vance, 2011).

Příkladem recyklace fosforu může být znovuvyužití fosforu během stárnutí listů, kdy jsou esenciální živiny uzavřené v listu, například fosfor, mobilizovány a transportovány do tkáně, zejména do rašících listů a rozvíjejících se semen. Recyklace fosforu je zásadní, protože pomáhá zajistit dosud získaný fosfor tak, aby nedošlo k jeho ztrátám v životním prostředí, zejména v přirozeně se vyskytujících podmínkách, kde většina neobdělávaných půd obsahuje nízké hladiny rozpustného ortofosfátu. (Stigter et Plaxton, 2015).

3.2 Udržitelnost v hospodaření s fosforem

V intenzivních zemědělských systémech je cílem dosažení maximální produkce, která vyžaduje významné vstupy fosforu tak, aby produktivita rostlin nebyla omezena dostupností fosforu v půdě. Toho se běžně dosahuje aplikací anorganického fosforu ve formě rozpustných minerálních hnojiv. Většina zemědělských půd má kapacitu k zachycování tohoto fosforu adsorpcí na minerální povrchy půdy a tvorbou hůře rozpustných minerálů fosforu a organického fosforu. Tato "pufrovací kapacita" zajišťuje průběžný přísun anorganického fosforu do půdního roztoku, jde tak o pozvolnější zajištění fosforu k uspokojení stávajících a budoucích požadavků na rostliny. V mnoha oblastech však pokračující aplikace fosforečnanových hnojiv, spolu s nedostatečným zohledněním vstupů fosforu v dovezených krmivech a obsahem fosforu ve stájových hnojivech vedla k akumulaci významných množství půdního fosforu. Proto v intenzivních zemědělských systémech úrovně dostupného fosforu běžně překračují množství potřebné pro maximální růst rostlin. (Schjonning et al., 2004).

Během potravinové krize v roce 2008 vzrostly ceny hnojiv a ceny komodit z fosfátů se během 18 měsíců zvýšily o 800 %. Tato zranitelnost globálního trhu s fosfátovou horninou činí identifikaci a přijetí udržitelných cest pro budoucí zajišťování potravin ještě naléhavější.

Fosfor byl v zemědělství po desetiletí v mnoha industrializovaných zemích nadměrně využíván (Sattari et al., 2012). Bohužel, používání fosforu nad rámec požadavků plodin a neúčinné využívání půdního fosforu rostlinami vedlo k akumulaci převážně nedostupné zásoby půdního fosforu a rovněž k eutrofizaci vodních toků (Menezes-Blackburn et al., 2016).

3.2.1 Možnosti recyklace fosforu

Existuje několik technologických postupů pro recyklaci fosforu z odpadní vody, čistírenských kalů nebo z popela po termickém využití čistírenských kalů. Recyklace z odpadní vody je založena převážně na precipitačních nebo krystalizačních procesech či na biologickém odstraňování (inkorporace do biomasy). Recyklace z kalu nebo popela vyžaduje předchozí hydrolyzu, dezintegraci a rozpouštění (Blöcher et al., 2012). Dalším příkladem využití fosforu z odpadních vod je struvit ($MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$, fosforečnan hořečnato – amonný). Struvit obsahuje jen malé množství škodlivých látek a vyznačuje se relativně nízkou rozpustností fosforu (Vogel et al., 2015; Schoumans et al., 2015).

3.3 Hnojení čistírenskými kaly

Komunální odpadní vody se ve velkém začaly využívat asi před 150 lety, poté, co byly do měst západní Evropy a severní Ameriky zavedeny toalety a kanalizační systémy. Odpadní voda byla vypouštěna bez jakékoliv úpravy a vodní toky byly silně znečištěny. Problém ilustruje například situace v Londýně v padesátých letech 19. století, kdy zápach z řeky Temže byl tak silný, že v parlamentu se záclony namáčely v chlornanu vápenatém. Pro snižování znečištění Temže byly po proudu zřízeny primitivní čistírny odpadních vod, využití pro zemědělskou oblast bylo v tomto případě vedlejším benefitem při čištění odpadních vod.

Praxe čistíren odpadních vod se rychle rozšířila, sloužily nejen Londýnu, ale i velkým městům v Evropě a desítky čistíren odpadních vod byla na přelomu století 20. století i ve Spojených státech. Potřeba spolehlivého a pravidelného odbytu čistírenských kalů však nebyla zcela kompatibilní se sezónním charakterem požadavků živin a vody pro rostlinnou výrobu. Postupně byly technologie vylepšovány a nacházeny jiné možnosti využívání kalů z čistíren odpadních vod.

Kal je koncentrovaná suspenze pevných látek, z velké části složená z organické hmoty a organických pevných látek obsahujících živiny a její konzistence může být v závislosti na druhu zpracování kalů ve formě od suspenze až po suché pevné látky. Kaly z čistíren odpadních vod byly v zemědělství používány od svého vzniku.

Vzhledem ke zkušenostem s využíváním lidských exkrementů, odpadních vod a stájových hnojiv na zemědělské půdě, bylo použití čistírenského kalu logickým vývojem. Například v Ohio byl čistírenský kal z Aliance používán jako hnojivo již v roce 1907.

Živinové složení kalů a jeho význam pro rostliny bylo hodnoceno mnoha vědci a je považováno za podobné jako u jiných hnojiv organického původu, které se běžně používají na obdělávané půdě, například stájová hnojiva. Vedle hlavních rostlinných živin obsahuje kal také stopové prvky, které jsou nezbytné pro růst rostlin. Půdy, které byly obdělávány po desetiletí, mají často nedostatečné obsahy určitých stopových prvků, jako je zinek a měď. Některé vápnité půdy mají nedostatek železa. Aplikace čistírenského kalu mohou pomoci odstranit i tyto nedostatky (Council, 1996).

Ovšem málokdy městské kanalizační systémy přepravují do čistíren pouze odpadní vody z domácností. Průmyslová odpadní voda a dešťová voda jsou odváděny ze silnic a jiných

zpevněných ploch, a jsou často vypouštěny do kanalizace. Čistírenský kal tak může kromě organických látek obsahovat i mnoho toxických látek. Kaly z čistíren odpadních vod mohou také obsahovat další škodlivé toxické látky, jako jsou detergenty, různé soli a pesticidy, odpadní látky z průmyslových provozů, toxické organické látky a hormonální disruptory, které byly zachycené při čištění vody, což brání jejich následnému využití v zemědělství (Singh et Agrawal, 2008).

3.3.1 Možnosti aplikace kalů

Obsah fosforu v sušině kalu z ČOV vyjádřený jako P_2O_5 je asi 10 hm. %, v některých případech však může dosáhnout až 20 hm. %. Jinými studiemi bylo zjištěno, že obsah P_2O_5 se pohybuje okolo 15,2 hm. % v surovém kalu, na čemž se shoduje i Shiba et Ntuli, 2017 s ostatními autory. V mnoha zemích je přímá aplikace kalu na zemědělskou půdu již zakázána (např. Švýcarsko, některé z německých spolkových zemí atd.) a další vlnu zákazů lze předpokládat i do budoucna. Nejen proto je třeba hledat vhodné metody pro čištění kalů, které by mohly naplnit jak ekonomické, tak i environmentální požadavky (Šyc et al., 2015).

Blöcher et al., 2012 i Ye et al., 2017 uvádí, že kaly z čistíren odpadních vod představují důležitý sekundární zdroj fosforu, protože velké procento fosfátů z odpadních vod je přeneseno právě do kalu (přibližně 90 %).

Hlavními složkami čistírenských kalů bývají fosfor, oxid křemičitý, oxidy železa, oxid vápenatý a oxid hlinitý.

Chemická charakteristika čistírenských kalů shromážděných za více než 2 roky z osmi měst ve státě Indiana v USA ukázala, že kal z čistíren odpadních vod obsahuje přibližně 50 % organické hmoty a 1 až 4 % anorganického uhlíku. Organický dusík a anorganický fosfor představovaly většinu celkového dusíku a fosforu v kalu. Organický a anorganický uhlík, organický dusík a anorganický fosfor, vápník a hořčík byly přítomny v poměrně konstantních koncentracích v daném kalu po celou dobu odběru vzorků. Obsahy anorganického dusíku, organického fosforu, draslíku a všech ostatních kovů se během celé doby studia poměrně lišily. Největší odchylky byly zjištěny u stopových prvků a těžkých kovů, jako jsou kadmium, zinek, měď, nikl a olovo.

Charakteristika čistírenských kalů z Kalkaty, Indie, byla prováděna pro zhodnocení možného využití jako hnojiva. Hodnota pH kalů z čistíren odpadních vod byla neutrální až mírně alkalická. Kaly byly bohaté na organický uhlík a dusík.

Srovnání údajů o fyzikálně-chemických vlastnostech vybraných kalů z různých zemí shromážděných v letech 1998-2002 jasně ukázalo, že pH se může lišit od kyselé až alkalické oblasti (čistírenský kal Thajsko: pH 6,82, Španělsko: pH 8,6 a Indie: pH 7,1) (Singh et Agrawal, 2008).

Adegoke et al., 2016 uvádí, že listy rostlin rostoucích v půdě hnojené čistírenským kalem obsahovaly největší koncentrace glukosinolátů, tedy bioaktivních sloučenin, které by mohly hrát významnou roli v udržitelném zemědělství jako alternativní nástroje proti půdním patogenům v konvenčním zemědělství. Dále pak byla celková sklizeň papriky zvýšena o 15 až 34 % po přidání čistírenského kalu na původní půdu.

3.3.2 Možné změny vybraných půdních vlastností po aplikaci kalu

Jak je známo, změny pH nebo redox potenciálu, ovlivňují systém půdy, rostlin i mikroorganismů. Mohou být ovlivněny dynamiky stopových prvků a organické hmoty a například i uvolňování fosforu (Kim et al., 2016). Například mohou být ovlivněné tyto vlastnosti půdy: stabilita půdních agregátů, objemová hmotnost, kationtová výměnná kapacita (dochází k jejich zvýšení), eroze (dochází k poklesu) (Singh et Agrawal, 2008).

Hodnota pH půdy

Bourioug et al., 2014 uvádí, že při aplikaci čistírenského kalu na půdu nedošlo k žádnému výraznému rozdílu v pH. Aplikace kalu mírně ovlivnila hodnoty pH v povrchové vrstvě půdy a pH bylo vyšší. Toto odpovídá i zjištění ve studii, kdy se pH půdy po aplikaci čistírenského kalu změnilo z 6,0 na 6,9 nebo zjištění v jiné studii, která uvádí, že se pH půdy po přidání čistírenského kalu změnilo z 5,9 na 6,2 (Mbagwu et al., 1991; Ociepa et al., 2017).

V jiných studiích bylo vyšší pH zaznamenáno v půdách, na které byl aplikován čistírenský kal pocházející převážně z odpadních vod z domácností. Ovšem je zaznamenáno i snížení pH půdy. Změny pH půdy byly v korelaci s použitím uhličitanu vápenatého při úpravě čistírenských kalů a kyselin během rozkladu kalu (Singh et Agrawal, 2008).

Redox potenciál půdy

Bourioug et al., 2014 nepozoroval žádný významný rozdíl v redox potenciálu mezi půdou, na kterou byl aplikován čistírenský kal a půdou, která byla ponechána bez aplikace čistírenského kalu. Hodnoty tohoto parametru se pohybovaly v rozmezí 356 až 434 mV.

3.3.3 Vliv aplikace kalu na rostliny

Obecně se ukázalo, že přidání kalu na zemědělskou půdu zvyšuje růst a produkci plodin. Zvýšení výnosu plodin v důsledku aplikace kalu často přesahovalo výnos z půd kontrolních pokusů s dobře řízeným hnojením.

Například celková koncentrace bílkovin v pšeničné slámě pěstované na půdě hnojené pouze čistírenským kalem a slámě pěstované na půdě hnojené N, P a K z komerčního hnojiva, tak aby se obsah živin N, P a K rovnal obsahu živin v kalu, byla vyšší než u pšeničné slámy pěstované na půdě hnojené komerčním N, P a K hnojivem. Stejně tak byl vyšší i výnos zrna pšenice a slámy, a to u pšenice hnojené čistírenským kalem o 0,1 kg/ha u zrna a 0,6 kg/ha u slámy. Půda byla hnojena množstvím 10 t/ha vysušeného kalu. Tyto údaje ukazují, že pšenice může využívat živiny z čistírenských kalů tak účinně, jak může vyžívat živiny z komerčních hnojiv, například i při výrobě vysoce kvalitních slám pro krmení hospodářských zvířat (Day et al., 1987).

Avšak bylo například zjištěno, že aplikace neupraveného surového čistírenského kalu měla škodlivé účinky na klíčení semen a růst sadby. Jiné výzkumy vykazovaly při nadměrné aplikaci čistírenských kalů (5,6 Mt/ha sušiny) přibližně o 30 % vyšší výnos kostravy (*Festuca arundinacea Schreb.*) třikrát během dvouletého období ve srovnání s kontrolami.

Zjištěno bylo rovněž, že při aplikaci kalu v poměru 0, 80, 160 a 320 t/ha sušiny se zvýšila průměrná sušina pěstované slunečnice (*Helianthus annuus L.*). Hodnocený byl i efekt aplikace kalu na růst a výnos ječmene (*Hordeum vulgare L.*) v klimatických podmínkách Středozemí. Do půdy byly zapravovány konvenční hnojiva a čistírenský kal (15 t/ha sušiny). Opakovaná aplikace kalu v těchto podmínkách snížila hodnotu pH a zvýšila obsah celkového organického uhlíku a zvýšila kationtovou výměnnou kapacitu. Výnos zrna ječmene se výrazně zvýšil při opakovaném použití kalů. Koncentrace bílkovin v listech ječmene a akumulace sušiny v rostlinách pěstovaných v půdě upravené čistírenskými kaly byla vyšší od počátku vývoje až po metání. Bylo však zjištěno významné zvýšení koncentrace těžkých kovů v zrnech, které se při dlouhodobější aplikaci čistírenského kalu projevilo. (Singh et Agrawal, 2008).

Příjem fosforu z čistírenských kalů rostlinami se liší podle typu půdy, na který se aplikuje, a typu kalu produkovaného na konkrétní ČOV. Byl zjištěn vyšší příjem fosforu rostlinami v jílovité půdě ve srovnání s morénovou půdou, což naznačuje nižší sorpční kapacitu fosforu

v jílovité půdě. Zjištěno rovněž bylo, že příjem fosforu rostlinami se významně liší, když se do půdy aplikují stejné množství fosforu v chemicky upravených kalech z různých ČOV (Hansrud et al., 2016).

V jiné studii se v jílovité půdě přidáním čistírenských kalů zvýšily všechny měřené parametry (sušina rostlin, obsah fosforu a fosfor odebraný nadzemními částmi rostlin) a byly vyšší než hodnoty u půdy, která nebyla hnojena fosforem, avšak nejvyšší hodnoty již vyjmenovaných parametrů byl prokázán při hnojení půdy fosforečnanem vápenatým. Procento fosforu z hnojiva odebraného jílkem (*Lolium*) dosáhlo nejvyšší hodnoty u fosforečnanu vápenatého (12,21 %) a pohybovalo se mezi 7,58 a 9,48 % u kalů. Podobně vyšly i hodnoty pro obsah fosforu a celkového fosforu odebraného nadzemními částmi rostlin, kdy se hodnota fosforu odebraného nadzemními částmi rostlin se pro jílek hnojený čistírenskými kaly pohybovala mezi téměř 22 - 23 mg P/kg půdy. V hlinité půdě byly hodnoty odběru fosforu a hodnoty dalších parametrů nižší. Nejnižší využití fosforu obsaženého v čistírenských kalech bylo zjištěno pro kaly upravené flokulací přídavkem FeSO_4 a anaerobní digescí. V hlinité půdě byla významnost vlastností kalu snížena i kvůli vysokému obsahu fosforu v půdě, který sám o sobě již splnil většinu potřeb plodiny (Frossard et al., 1996).

3.3.4 Změny obsahu makroživin v plodinách po aplikaci kalu

Chemické složení rostlin závisí na faktorech životního prostředí (teplota, sluneční záření, množství srážek, půdní podmínky), na úrovni minerálního, a organického hnojení. Obsah makroživin a mikroživin je určen analyzovanou částí rostlin.

Například Kępka et al. (2016) ve své studii porovnával výnos zrn a slámy jarního ječmene, a to porovnáním aplikace minerálního hnojiva a aplikace kombinace minerálního hnojiva (dodání NPK hnojiva) a čistírenského kalu. Z provedeného výzkumu vyplývá, že čistírenský kal významně ovlivnil nárůst výnosu jarního ječmene. Z kontrolního stanoviště hnojeného pouze minerálním NPK hnojivem činil výnos 4,20 a 3,10 t/ha sušiny, zatímco výnos zrn a slámy získaný ze stanoviště hnojeného čistírenským kalem činil 4,80 a 3,50 t/ha sušiny. Z provedeného výzkumu vyplývá, že použití komunálního splaškového kalu pro hnojení zvýšilo výnos zrn a slámy o 14,2 %, respektive o 12,9 %, ve srovnání s kontrolním hnojením. Obsah studovaných makroživin v jarním ječmenu závisel na způsobu hnojení a na části rostliny. Použití městského odpadního kalu do půdy zvýšilo obsah makroživin ve výnosu ječmene. Při provedeném výzkumu

byly také pozorovány rozdíly v koncentracích živin v jednotlivých částech jarního ječmene. Bylo zjištěno, že zrna jarního ječmene mají vyšší obsah dusíku, fosforu a hořčíku, zatímco sláma měla vyšší obsah draslíku, sodíku a vápníku.

Při aplikaci čistírenských kalů s obsahem fosforu cca 2 – 4 % fosforu v sušině byl pro aplikaci 44 t/ha příjem fosforu zkoumanou plodinou, žitem, asi 53 kg/ha, při aplikaci téměř dvojnásobného množství, tedy 87 t/ha, byl příjem fosforu asi 80 kg/ha, ovšem při aplikaci ještě vyšších dávek, 133 a 266 t/ha, se příjem fosforu ustálil na cca 85 kg/ha (McLaughlin, 1984).

3.4 Legislativa týkající se čistírenských kalů a možnosti jejich aplikace

3.4.1 Právní předpisy EU týkající se čistírenských kalů

Evropskou unií byla schválena řada směrnic o nakládání s odpady. Již v roce 1975 požadovala rámcová směrnice o odpadech od členských států, aby podporovaly prevenci vzniku odpadů a jejich ekologickou likvidaci.

Směrnice 86/278/EHS o ochraně životního prostředí a zejména půdy při používání kalů z čistíren odpadních vod v zemědělství usiluje o podporu používání kalů z čistíren odpadních vod v zemědělství. Zároveň reguluje jeho použití takovým způsobem, aby bylo zabráněno jakýmkoliv potenciálním škodlivým účinkům na půdu, vegetaci, zvířata a lidské bytosti. Podle výše uvedeného principu je používání neupraveného kalu v zemědělství zakázáno, pokud není vstříkován nebo zapracován do půdy. Kromě toho se výrazem „upravený kal“ rozumí kal, který byl podroben biologické, chemické nebo tepelné úpravě, byl dlouhodobě skladován nebo jinak zpracován tak, že došlo k významnému snížení jeho schopnosti zkvasitelnosti a následně snížena možnost ohrožení zdraví jeho využíváním."

Směrnice 91/689/EHS o nebezpečných odpadech stanovila v roce 1991 pravidla pro nakládání s tímto druhem odpadu, tato směrnice byla nahrazena směrnicí 2008/98/ES o odpadech.

Směrnice 91/271/EHS o čištění odpadních vod a stanovuje normy pro kvalitu odpadních vod. Hlavním článkem směrnice o čištění odpadních vod, který se zabývá kalem, je článek 14, kde je uvedeno, že "Kdykoli je to vhodné, měl by být kal vznikající při čištění odpadních vod znovu použit. Způsoby zneškodňování musí minimalizovat nepříznivé účinky na životní prostředí."

Okrajově se čistírenských kalů a jejich případné aplikace na zemědělskou půdu týká i Směrnice 91/676/EHS o ochraně vod před znečištěním dusičnany, neboli tzv. nitrátová směrnice, která se věnuje snížení znečištění vody dusičnany používanými pro zemědělské účely a předcházení dalšímu znečištění. Klade důraz na správnou zemědělskou praxi při aplikaci hnojiv, tudíž se v tomto případě může jednat i o čistírenské kaly. A dále se kalů týká i Směrnice Rady 1999/31/ES o skládkách odpadů, která si klade za cíl předcházet, nebo maximálně omezit negativní dopady skládek na povrchové vody, podzemní vody, půdu, ovzduší a lidské zdraví. Do budoucna se tedy jedná o i v případě kalů o nejméně udržitelnou možnost při nakládání s nimi. (Fytili et Zabaniotou, 2008).

Evropská komise (DG Environment) v roce 2008 pověřila společnost Milieu Ltd spolu s partnerskými společnostmi WRc a Risk & Policy Analysts Ltd (RPA) přípravou Studie o environmentálních, ekonomických a sociálních dopadech používání kalů z čistíren odpadních vod na půdu (DG ENV.G.4/ETU/2008/0076r).

Cílem studie bylo poskytnout Komisi nezbytné prvky pro posuzování environmentálních, hospodářských a sociálních dopadů, včetně dopadů na zdraví, současných postupů využívání kalů z čistíren odpadních vod, poskytnout přehled možných rizik a příležitostí a stanovit možnosti politiky související s používáním čistírenských kalů na půdě. Tato studie tedy poskytuje základní informace pro rozhodnutí, zda je nebo není potřeba revize směrnice, a stanoví základ pro případnou revizi. Studie obsahuje zajímavá data například s ohledem na produkci a různé druhy zpracování čistírenských kalů v členských státech Evropské unie pro rok 2010 a 2020. Z této studie například vyplývá, že Česká republika recyklovala na půdu 55 % vyprodukovaného čistírenského kalu, spáleno bylo 25 % vyprodukovaného kalu z čistíren odpadních a vod a 10 % kalu bylo skládkováno. Lucembursko s 90 % a Maďarsko spolu s Irskem se 75 % recyklovaného čistírenského kalu patří ke státům, které čistírenský kal na půdu aplikují nejvíce v Evropské unii. Dále ze studie vyplývá, že trend aplikace čistírenského kalu na půdu by se měl do roku 2020 mírně zvýšit (2009).

3.4.2 Právní předpisy ČR týkající se čistírenských kalů

Základní právní předpisy České republiky, které se týkají nakládání s kaly z čistíren odpadních vod, jsou následující zákony a vyhlášky.

Důležitým předpisem, který se obecně věnuje odpadům, a tedy i kalům, je zákon č. 185/2001 Sb., o odpadech a o změně dalších zákonů. Podle zákona o odpadech je kal odpadem vznikajícím při čištění odpadních vod. Podle současného znění zákona o odpadech je původce kalů povinen provádět úpravu kalů a stanovit program, kde by měl prokázat splnění podmínek pro možnou aplikaci kalu stanovených zákonem a prováděcím právním předpisem, pokud by měly být čistírenské kaly předány k použití na zemědělské půdě. Program je pak původce kalů povinen předat právnické či fyzické osobě, která kal bude k aplikaci na zemědělskou půdu využívat. Tato osoba je povinna používat pouze takové kaly, které jsou upravené s ohledem na výživové potřeby rostlin za podmínek stanovených tímto zákonem a prováděcím právním předpisem a v souladu s programem stanoveným původcem kalu tak, že případné použití kalu nezhorší kvalitu půdy a kvalitu povrchových a podzemních vod (2001).

Dalším důležitým předpisem v oblasti problematiky čistírenských kalů a jejich možné aplikace na půdu je zákon č. 156/1998 Sb., o hnojivech, pomocných půdních látkách, pomocných rostlinných přípravcích a substrátech a o agrochemickém zkoušení zemědělských půd. Působnost tohoto zákona se vztahuje pouze na hnojiva, statková i průmyslová, ale nevztahuje se na čistírenské kaly. Určuje však povinnost právnických a fyzických osob, které používají na zemědělské půdě upravené kaly, tuto skutečnost nahlásit Ústřednímu kontrolnímu a zkušebnímu ústavu zemědělskému (ÚKZÚZ) (Česko 1998).

Předpisem, který se věnuje problematice aplikace čistírenských kalů na půdu je vyhláška č. 474/2000 Sb., o stanovení požadavků na hnojiva, která upravuje mezní hodnoty koncentrací vybraných rizikových látek a prvků v kalech pro jejich použití na zemědělské půdě (ukazatele pro hodnocení kalů).

Vyhláška č. 377/2013 Sb., o skladování a způsobu používání hnojiv, je předpisem, který stanovuje způsob hlášení o používání upravených kalů, a vzor formuláře pro hlášení je součástí tohoto předpisu (Česko 2013).

Vyhláška č. 437/2016 Sb., o podmínkách použití upravených kalů na zemědělské půdě a změně vyhlášky č. 383/2001 Sb., o podrobnostech nakládání s odpady a změně vyhlášky č. 341/2008 Sb., o podrobnostech nakládání s biologicky rozložitelnými odpady a o změně vyhlášky č. 294/2005 Sb., o podmínkách ukládání odpadů na skládky a jejich využívání na povrchu terénu a změně vyhlášky č. 383/2001 Sb., o podrobnostech nakládání s odpady

(vyhláška o podrobnostech nakládání s biologicky rozložitelnými odpady), je komplexní vyhláškou, která zrušila vyhlášku č. 382/2001 Sb., a zavádí jednoznačné požadavky pro používání upravených kalů na zemědělské půdě. Základem je, že vyhláška k čistírenskému kalu přistupuje jako k odpadu, nikoliv jako ke hnojivu. Mezi důležité podmínky aplikace patří například, že kal musí být zapraven do půdy nejpozději do 48 hodin od rozprostření na půdní blok, dále pak, že na 1 hektar může být použito nejvýše 5 tun sušiny kalů, a to jednou za 3 roky, či že při přímém použití upravených kalů musí být minimální obsah sušiny kalu 4 %.

3.4.3 Právní předpisy sousedních států týkající se čistírenských kalů

3.4.3.1 Rakousko

Rakousko je státem, který je rozdělen na devět spolkových zemí. Většina spolkových zemí má vlastní nařízení o používání kalů, obvykle ve formě nařízení k čistírenským kalům. Na místní úrovni jsou obce odpovědné za sběr a čištění odpadních vod.

Ochrana půdy je regulační záležitostí v každé jednotlivé spolkové zemi. Každá země má proto své vlastní předpisy o tom, do jaké míry může být čistírenský kal aplikován na půdu nebo zda je zakázáno jeho použití. Ve všech spolkových zemích, kde je povoleno použití čistírenských kalů, je třeba před aplikací zkontrolovat vhodnost použití v zamýšlených oblastech. V úvahu je nutno brát také použití hnojiv ve spolkových zemích společně s aplikací kalů z čistíren odpadních vod. Zohledňují se charakteristiky místa, stav půdy, požadavky na výživu pěstovaných plodin a produktivitu jednotlivých produkčních oblastí.

Legislativním předpisem, který se částečně dotýká čistírenských kalů a jejich možného využívání na zemědělské půdě je spolkový zákon o udržitelném nakládání s odpady z roku 2002 – AWG 2002. Kalů a jejich možné aplikace se dotýká i spolkový plán odpadového hospodářství pro rok 2006 (BAP 2006) a prováděcí vyhláška spolkového ministra zemědělství, lesnictví, životního prostředí a vodního hospodářství, která byla vydána k zákonu o hnojivech z roku 1994.

Základem je Směrnice 86/278/EHS o ochraně životního prostředí a zejména půdy při používání kalů z čistíren odpadních vod v zemědělství, která stanoví minimální požadavky.

Spolkové země Salcbursko, Vídeň a Tyrolsko vydaly obecný zákaz používání kalů z čistíren odpadních vod na zemědělské půdě (Rakousko 2002; Oliva et al., 2009).

3.4.3.2 Slovensko

Nejdůležitějším legislativním dokumentem, který upravuje podmínky aplikace čistírenského kalu a hloubkových sedimentů do zemědělské půdy a do lesní půdy, povinnosti producenta a odběratele čistírenského kalu a hloubkových sedimentů, výkon státní kontroly při aplikaci čistírenského kalu a hloubkových sedimentů do zemědělské půdy a do lesní půdy, je zákon 188/2003 Z. z., o aplikaci čistírenského kalu a dnových sedimentů do půdy a o doplnění zákona č. 223/2001 Z. z. o odpadech a o změně a doplnění některých zákonů v znění pozdějších předpisů.

V podstatě jde o to, aby na půdy (lesní a zemědělsky využívané) byly aplikovány pouze takové čistírenské kaly nebo rybníční sedimenty, které splňují chemická a biologická kritéria uvedená v přílohách 2 až 5 zákona 188/2003 Z. z., o aplikaci čistírenského kalu a dnových sedimentů do půdy, zároveň však zákon definuje požadavky pro půdu (chemické, biologické, ale i další) do které lze kal respektive sediment aplikovat, jakož i množství těchto látek za čas, kdy například v průběhu pěti let nesmí být na 1 ha aplikovaných > 15 t sušiny.

Mezi další omezení aplikace kalů patří například to, že kal musí obsahovat ≥ 18 % hmot. sušiny (v případě kalu omezení neplatí, pokud pochází z čistírny odpadních vod s kapacitou < 5000 EO) nebo například půda do které se plánuje aplikovat kal nesmí mít $\text{pH} < 5$.

Plán aplikace čistírenského kalu do zemědělské půdy, nebo do lesní půdy schvaluje příslušný orgán ochrany zemědělského půdního fondu či příslušný orgán státní správy lesního hospodářství (Slovensko 2017).

3.4.3.3 Polsko

Ministr životního prostředí, ochrany přírodních zdrojů a lesů má v Polsku plné legislativní kompetence v oblasti životního prostředí. Kromě toho se monitoringu jak kvality vody, tak i odpadních vod věnuje 7 regionálních směrnic pro vodní hospodářství (RZGW).

Prosazování práva životního prostředí provádí národní inspektorát ochrany životního prostředí a regionální inspekční služba pro ochranu životního prostředí. Na místní úrovni odpovídá za dodávku vody a čištění odpadních vod 2468 obcí.

Hlavními předpisy, týkající se ochrany životního prostředí v Polsku, jsou zákon ze dne 27. července 2001 o zavedení zákona o ochraně životního prostředí, zákona o odpadech

a o změně některých zákonů, zákon ze dne 16. dubna 2004 o ochraně přírody, zákon ze dne 14. prosince 2012 o odpadech, zákon o ochraně půdy určený pro zemědělství nebo lesnictví ze dne 3. února 1995.

Použití kalů v zemědělství je upraveno zákonem o odpadech ze dne 14. prosince 2012. Podrobné informace o používání kalů obsahuje čl. 96 zákona o odpadech. Dále je použití kalů v zemědělství upraveno ve vyhlášce ministra životního prostředí ze dne 6. února 2015 ohledně komunálního čistírenského kalu. Konkrétně se jedná o podmínky, že obsah těžkých kovů v čistírenských kalech nepřesahuje množství uvedené v příloze 1 nařízení, dále pak, že v případě použití kalů v zemědělství a při regeneraci půdy pro zemědělské účely nebyly ve vzorku kalu izolovány bakterie rodu *Salmonella*, případně určitý počet vajíček parazitů, množství těžkých kovů v horní vrstvě půdy o hloubce 0-25 cm, nepřesahuje mezní hodnoty uvedené v přílohách této vyhlášky, hodnota pH půdy není nižší než 5,6, Použití kalů nezpůsobuje žádné zhoršení kvality půdy či povrchových a podzemních vod a kaly se používají mimo růst rostlin určených k přímé lidské spotřebě, což je chápáno jako doba od výsevu nebo výsadby až po sklizeň.

Limity pro obsah těžkých kovů a dalších možných závadných a nebezpečných ve většině případů kopírují dolní hranice těchto limitů nastavené ve směrnici 86/278/EEC, případně je tato hodnota nižší než limity v již zmíněné směrnici.

Jednorázově, během dvou nebo tří let, využití čistírenského kalu pro rekultivaci půdy pro nezemědělské účely a při vytváření pozemků pro specifické potřeby vyplývající z plánů nakládání s odpady, územních plánů nebo stavební rozhodnutí a pro pěstování rostlin určených k produkci kompostů a nepotravinářských plodin a pro výrobu krmiv může být přijatelná dávka čistírenského kalu kumulována a nesmí překročit 30 t sušiny/ha/2 roky nebo 45 t sušiny/ha/3 roky (Office for Official Publications of the European Communities 2001, Polsko 2017)

3.4.3.4 Německo

Německý právní rámec týkající se životního prostředí vydávají spolkové orgány, ale každý příslušný orgán ve spolkových zemích může rozhodnout o podrobnějších předpisech a je také odpovědný za provádění a prosazování spolkových zákonů a předpisů.

Zemědělské využití kalů je upraveno novou vyhláškou o čistírenských kalech ze dne 27. září 2017 a vstoupila v platnost dne 3. října 2017. Za účelem dalšího navracení živin z čistírenských

kalů (fosforu) do živinového cyklu rozsáhlejším způsobem, než jaký byl dříve využíván při recyklaci čistírenských kalů při zapracování do půdy a současně významného omezení využití čistírenského kalu pro zapravování do půdy pro účely dalšího snížení znečišťujících látek, byla změněna vyhláška z roku 1992 o kalu z odpadních vod.

Z důvodů předběžné opatrnosti je v novele vyhlášky zákaz používat v zemědělství čistírenské kaly z čistíren odpadních vod o velikosti >50 000 EO a pro provozovatele těchto čistíren odpadních vod je povinné zpětně získávat fosfor z kalů v případě, že obsah fosforu v sušině kalu je více než 2 %. V rámci ochrany zdrojů musí být obnovený fosfor, ve formě fosfátu, použit pro hnojení rostlin. Pro čistírny odpadních vod o velikosti <50 000 EO, zůstává možnost využívání kalů k agrochemickým účelům. Všechny stávající ČOV musí vypracovat koncepcí získávání fosforu do roku 2023

Zatímco předchozí znění kalové vyhlášky upravovalo pouze používání kalů z čistíren odpadních vod na zemědělské nebo zahradnické půdy, požadavky pozměněného znění platí pro veškeré využití čistírenských kalů, zejména pro zemědělské využití a dodávky producentů čistírenských kalů a kompostů z čistírenských kalů.

Vyhláška uvádí pouze několik parametrů, co se týče kvality kalu, ale výslovně se odkazuje na parametry podle nařízení o hnojivech, které upravuje jakost a použití hnojiv (Düngemittelverordnung - DüMV) a další právní předpisy, týkající se například ochrany půdy apod. o se týče požadavků na čistírenské kaly určené pro agronomické využití, je stejně jako u ostatních států základním předpisem Směrnice 86/278/EHS o ochraně životního prostředí a zejména půdy při používání kalů z čistíren odpadních vod v zemědělství (Office for Official Publications of the European Communities 2001, Německo 2017).

4 MATERIÁL A METODY

V experimentální části diplomové práce byly využity výsledky z dlouhodobých stacionárních pokusů s rotací plodin. Tyto pokusy byly založeny na podzim v roce 1996, na pěti stanovištích v České republice s rozdílnými půdně-klimatickými podmínkami, konkrétně se jedná o Červený Újezd, Hněvčeves, Humpolec, Lukavec /u Pacova/ a Prahu – Suchdol.

V diplomové práci byly zpracovány výsledky ze tří vybraných stanovišť, ze stanoviště Hněvčeves, ze stanoviště Humpolec a ze stanoviště Suchdol. Velikost pokusné parcely je na stanovišti Hněvčeves i na stanovišti Humpolec je 60 m², na stanovišti Suchdol 60,5 m².

Tab. 1 Charakteristika pokusných stanovišť (Vašák, 2016)

	Hněvčeves	Humpolec	Suchdol
Lokalizace	50°18'46"N, 15°43'3"E	49°33'16"N, 15°21'2"E	50°7'40"N, 14°22'33"E
Nadmořská výška (m n. m.)	265	525	286
Průměrná roční teplota (°C)	8,2	7	9,1
Průměrné roční srážky (mm)	573	665	495
Půdní typ	Luvizem	Kambizem	Černozem
Půdní subtyp	modální	modální	Modální
Půdní druh	písčito-hlinitá	písčito-hlinitá	hlinito-písčitá
Objemová hmotnost pd [g/cm ³]	1,5	1,4	1,43
pH (KCl)	5,7	4,7	7,1

Zpracovávaná data se týkají odběru fosforu zrnem a slámou pšenice. Výsledky byly vypočítány pro pět různých typů hnojení. Každý typ zastupuje varianta, která:

- není hnojená, tzv. kontrola,
- hnojená čistírenským kalem tak, aby došlo k aplikaci shodné dávky dusíku (330 kg/ha za tříletou rotaci plodin),
- hnojená čistírenským kalem třikrát více,
- hnojená pouze dusíkem,
- hnojená minerálním hnojivem NPK.

Hnojení pokusu je postaveno na aplikaci shodné dávky dusíku (330 kg/ha) na všech variantách, mimo kontrolu. Dohromady 330 kg dusíku za tříleté období. Dávky živin, které jsou vždy aplikovány v tříletém cyklu, uvádí **Tab. 2**. Dávky kalů, které jsou aplikované jakožto hnojivo na půdu v pokusech, jsou rovněž odvozeny od dávky dusíku.

Průměrná dávka fosforu na variantě Kal 1 je 201 kg P/ha za tříletý cyklus, pro Kal 3 je to 603 kg P/ha, přesné dávky fosforu v aplikovaných kálech v jednotlivých letech jsou popsány v **Tab. 3**. Na variantě NPK je dávka fosforu 90 kg P/ha za tříletý cyklus. Na variantě N a Kontrola je dávka P 0 kg P/ha.

Tab. 2 Dávky živin aplikovaných hnojiv v tříletém cyklu

Varianta	brambory			Pšenice			Ječmen		
	N	P	K	N	P	K	N	P	K
Kontrola	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kal 1	330 ¹⁾	201 ²⁾	55 ²⁾	0	0	0	0	0	0
Kal 3	990 ¹⁾	603 ²⁾	165 ²⁾	0	0	0	0	0	0
N ³⁾	120	0	0	140	0	0	70	0	0
NPK ³⁾	120	30	100	140	30	100	70	30	100

¹⁾ celkový dusík v organických hnojivech

²⁾ průměrná dávka podle obsahu živin v hnojivech

³⁾ Minerální hnojiva: N – LAV (27 % N) P – trojitý superfosfát (21 % P) K – draselná sůl (50 % K)

Tab. 3 Dávky a obsah P v aplikovaných kalů ve sledovaném období

Rok	dávka [t/ha]	sušina [%]	sušina [t/ha]	obsah P [mg/kg suš.]	dávka P [kg/ha]
2012	29,50	28,00	8,26	26578,00	219,53
2013	31,50	29,68	9,35	32805,00	306,70

4.1 Odběr a zpracování vzorků

Rostlinné vzorky byly odebrány po sklizni ve formě slámy a zrna, konkrétně pšenice. Rostlinné vzorky byly sušeny na vzduchu s řízenou ventilací.

Zrno bylo vyčištěno od nečistot a rozemleto. Pro mletí zrna je využíván kladívkový mlýnek IKA MF 10.2. Po usušení byly rostlinné vzorky (sláma) semlety na střížném mlýnu SM 100 Retsch.

4.2 Suchý rozklad

Pro stanovení fosforu ve vzorcích slámy a zrna pšenice byl zvolen suchý rozklad. Obsah fosforu v rostlinných materiálech byl stanoven z navážky vzorku 0,4 g. Po navážení jednotlivých vzorků pro měření do křemenných kádinek jsou vzorky dány na topnou desku. Zde jsou vzorky postupným zvyšováním teploty vždy po hodině, a to konkrétně na 220 °C, 280 °C až na konečných 350 °C, zuhelňovány.

Zpopelnění vzorků probíhá za dlouhého působení vysoké teploty 550 °C v „muflových“ pecích. Cílové teploty je dosaženo pozvolným nárůstem a zpopelňuje se obvykle přes noc (10 - 16 hod). Po vyjmutí kádinek a jejich zchladnutí je do kádinek přidán 1 ml HNO₃ pro vyloužení popela. Takto upravené vzorky se hodinu odpařují na varné desce při teplotě 120 °C. Po odpaření HNO₃ se kádinky vloží na „dovypálení“ do muflových pecí při působení teploty 500 °C po dobu 1 hodiny. Následně se kádinky z pecí vyjmou a po vychladnutí se za pomoci ultrazvukové lázně převedou s roztokem 1,5 % HNO₃ do 25 ml zkumavek.

4.3 Stanovení metodou ICP-OES

Metoda hmotnostní spektrometrie s indukčně vázaným plazmatem je analytická metoda a slouží ke stanovení obsahu stopových množství jednotlivých prvků v analyzovaném vzorku. Kombinuje indukčně vázané plazma (ICP, inductively coupled plasma) a emisní spektrometrii (OES, optical emission spectrometry).

Metoda indukčně vázaného plazmatu je založena na tvorbě aerosolu z kapalného vzorku, který přivádí do mlžné komory peristaltické čerpadlo. Výboj indukčně vázaného plazmatu vzniká v proudícím argonu, který vytéká z plazmové hlavice a je „zažehnut“ jiskrovým výbojem a udržován přívodem vysokofrekvenční energie indukční cívkou (příkon 1-2 kW). V důsledku toho je vyvoláno střídavé magnetické pole, které zrychluje elektrony do kruhové trajektorie. Kvůli kolizi mezi atomem argonu a elektrony dochází k ionizaci, což vede ke vzniku stabilní plazmy. Plazma je extrémně horká, 6000 – 7000 K. V indukční zóně může dokonce dosáhnout

10000 K. Při desolvataci hořáku dochází k atomizaci a ionizaci vzorku. Vzhledem k tepelné energii, kterou elektrony vznikají, dosahují vyššího "excitovaného" stavu. Excitovaný stav je velmi nestabilní, proto se vybuzené elektrony vrací zpět na své původní energetické hladiny a přitom emitují světlo o přesně definované vlnové délce, určené specifickým energetickým rozdílem obou hladin. Každý prvek má vlastní charakteristické emisní spektrum, které se měří pomocí spektrometru. Měří se intenzita světla na specifické vlnové délce a za pomoci kalibrace se vypočítá koncentrace námi sledovaného prvku, fosforu.

Fosfor byl měřen na přístroji Agilent 720.

Po přepočtu jsou výsledky obsahu fosforu vyjadřovány v mg P/kg sušiny (ppm). Z výsledků obsahu fosforu a výnosu (t/ha) sklizených částí rostlin (zrno, sláma, hlízy) byl vypočten odběr P (kg/ha).

Konkrétní výsledky jsou v této práci prezentovány formou tabulek i grafů. Statistické zpracování bylo provedeno v programu Excel.

5 VÝSLEDKY

5.1 Obsah fosforu v zrně a slámě pšenice ozimé

Naměřené hodnoty obsahu fosforu v zrně pšenice ozimé se v roce 2013 pohybovaly od 3689 mg P/kg zrna pšenice pro hnojenou variantu Kal 3 na stanovišti Suchdol po hodnotu 1609 mg P/kg zrna pšenice na stanovišti Humpolec. Pro hnojenou variantu Kal 1 se v roce 2013 pohybovaly hodnoty mezi 3351 mg P/kg zrna pšenice na stanovišti Suchdol po hodnotu 1053 mg P/kg zrna pšenice na stanovišti Humpolec. Nejnižší hodnoty byly v roce 2013 naměřeny pro nehnojenou variantu, kdy se pohybovaly od 3112 mg P/kg zrna pšenice (Suchdol) do 854 mg P/kg zrna pšenice (Humpolec). Rozdíly mezi stanovišti byly v roce 2013 vyšší než v roce 2014, kdy se hodnoty obsahu fosforu v zrně pohybovaly od 4035 mg P/kg zrna pšenice u stanoviště Suchdol po 3323 mg P/kg zrna pšenice pro hnojenou variantu Kal 3 či od 4071 mg P/kg zrna pšenice u stanoviště Suchdol po 3010 mg P/kg zrna pšenice na stanovišti Humpolec pro variantu Kal 1. U varianty NPK se hodnoty v roce 2013 pohybovaly od 2765 mg P/kg zrna pšenice u stanoviště Suchdol do 1800 mg P/kg zrna pšenice u stanoviště Hněvčeves. V roce 2014 byly pro tuto variantu hodnoty obsahu P vyšší, pohybovaly se u zrna pšenice od 3899 mg P/kg na stanovišti Suchdol do 2997 mg P/kg na stanovišti Hněvčeves. V roce 2014 byly hodnoty obsahu P v zrně pšenice nejnižší pro nehnojenou variantu na stanovišti Humpolec, 2825 mg P/kg zrna, u stanoviště Suchdol byla naměřena hodnota 3982 mg P/kg zrna pšenice a u stanoviště Hněvčeves 3099 mg P/kg zrna pšenice. Ovšem na stanovišti Suchdol ani na stanovišti Hněvčeves se v roce 2014 nejednalo o nejnižší hodnotu.

Obsah fosforu ve slámě pšenice ozimé se pohyboval pro hnojenou variantu Kal 1 v roce 2013 v hodnotách od 565 mg P/kg slámy pšenice (Humpolec) po 369 mg P/kg slámy (Hněvčeves). Pro hnojenou variantu Kal 3 se hodnoty pohybovaly od 793 mg P/kg slámy (Humpolec) po 184 mg P/kg slámy (Suchdol) v roce 2013. U hnojené varianty NPK se hodnoty v roce 2013 pohybovaly od 546 mg P/kg slámy na stanovišti Humpolec po 128 mg P/kg slámy na stanovišti Suchdol. V roce 2014 byly obsahy fosforu u jednotlivých hnojených variant v porovnání s rokem 2013 vyšší. Pro hnojenou variantu Kal 1 se hodnoty obsahu fosforu pohybovaly od 849 mg P/kg slámy pšenice (Suchdol) po 469 mg P/kg slámy pšenice (Humpolec). Hodnoty u hnojené varianty

Kal 3 byly rovněž vyšší v roce 2014 a pohybovaly se od 890 mg P/kg slámy do 589 mg P/kg slámy.

Obsahy fosforu v jednotlivých letech pro jednotlivá stanoviště jsou uvedeny v **Tab. 4** **Chyba!**
Nenalezen zdroj odkazů..

Tab. 4 Obsah fosforu v zrně a slámě pšenici v mg P/kg sušiny

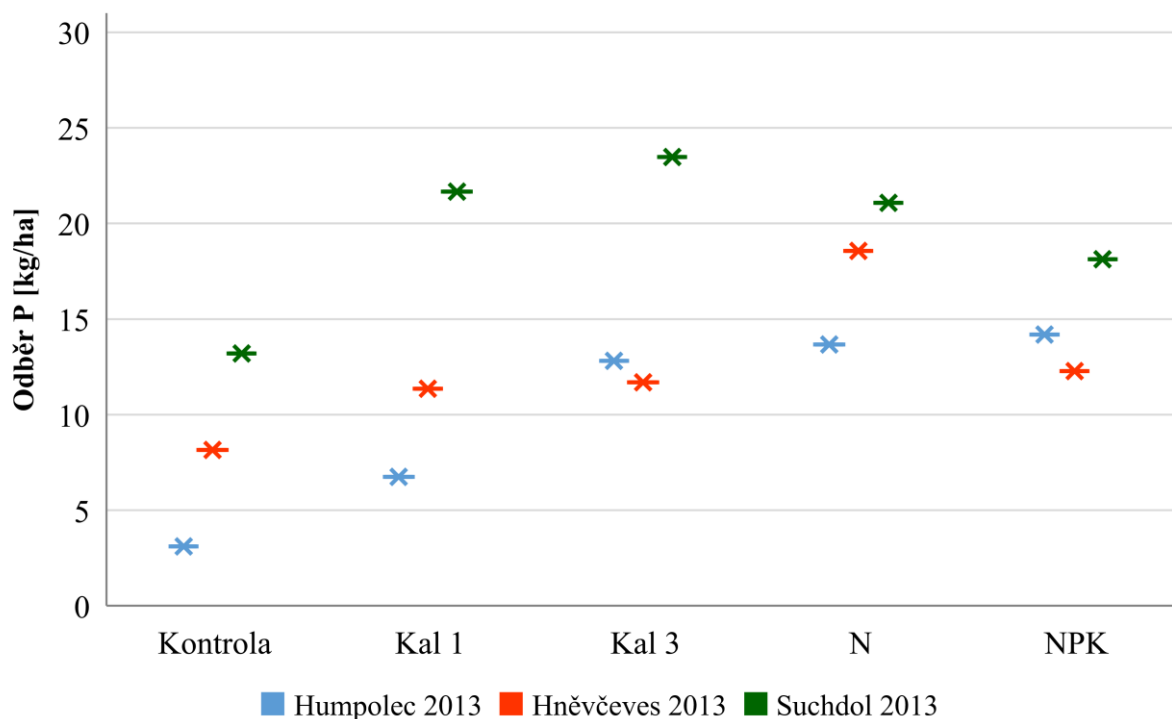
Varianta	Suchdol 2013		Hněvčeves 2013		Humpolec 2013	
	zrno průměr P [mg/kg]	sláma průměr P [mg/kg]	zrno průměr P [mg/kg]	sláma průměr P [mg/kg]	zrno průměr P [mg/kg]	sláma průměr P [mg/kg]
Kontrola	3112	89	1742	147	854	735
Kal 1	3351	369	1613	321	1053	565
Kal 3	3689	184	1619	316	1609	793
N	2890	402	2555	208	1928	410
NPK	2765	128	1800	354	1920	546

Varianta	Suchdol 2014		Hněvčeves 2014		Humpolec 2014	
	zrno průměr P [mg/kg]	sláma průměr P [mg/kg]	zrno průměr P [mg/kg]	sláma průměr P [mg/kg]	zrno průměr P [mg/kg]	sláma průměr P [mg/kg]
Kontrola	3982	597	3099	369	2825	328
Kal 1	4071	849	3011	513	3010	469
Kal 3	4035	890	3513	762	3323	589
N	3871	590	3200	202	3406	505
NPK	3899	674	2997	318	3085	487

5.2 Odběr fosforu zrnem a slámou pšenice ozimé

Odběr fosforu zrnem pšenice ozimé v roce 2013 a rozdíly v odběru fosforu pro jednotlivé typy hnojení je znázorněn v **Grafu 1**. Hodnoty pro hnojenou variantu Kal 1 se pohybovaly od 6,75 kg/ha na stanovišti Humpolec do hodnoty 21,66 kg/ha na stanovišti Suchdol. U varianty Kal 3 se hodnoty pohybovaly od 11,69 kg/ha v Hněvčevsi po 23,47 kg/ha na stanovišti Suchdol. Hodnoty pro variantu hnojenou N se pohybovaly od 13,66 kg/ha na stanovišti Humpolec do 21,08 kg/ha pro stanoviště Suchdol. U varianty hnojené NPK bylo rozmezí hodnot od 12,28 kg/ha u stanoviště Hněvčeves do 18,13 kg/ha na stanovišti Suchdol. Hodnoty nehnojené varianty Kontrola se pohybovaly v intervalu od 3,11 kg/ha na stanovišti Humpolec do 13,19 kg/ha na stanovišti Suchdol.

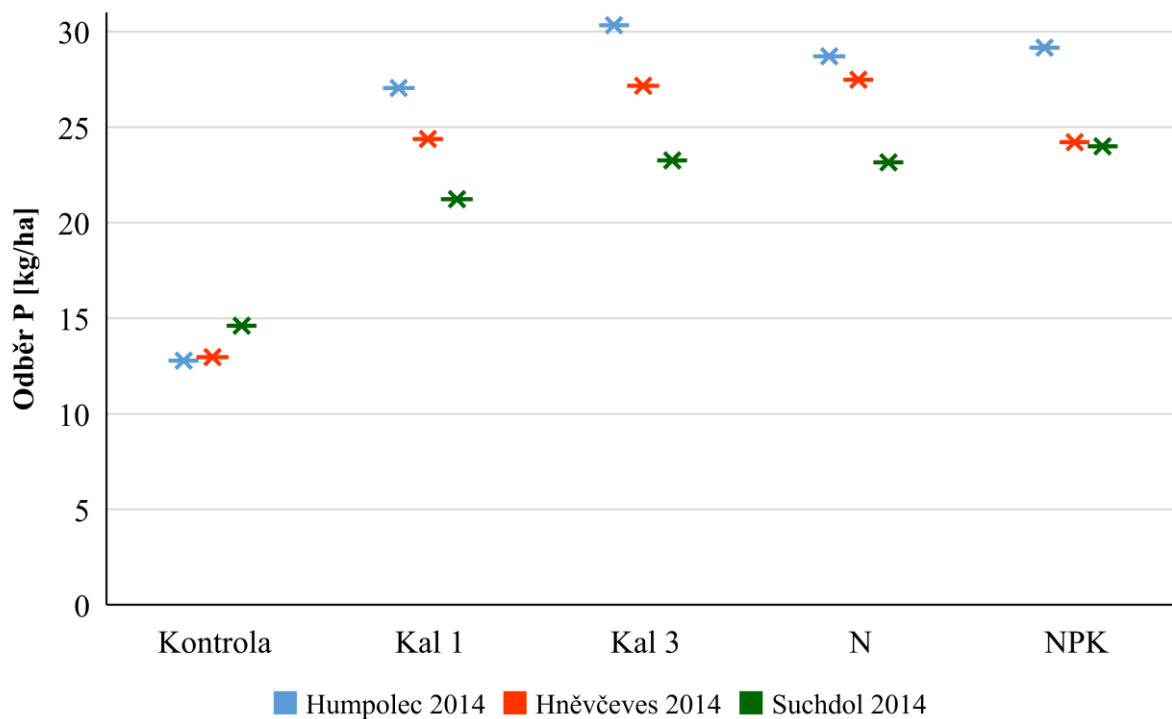
Nejvyšší odběr P při porovnání všech hnojených variant byly vypočteny pro hnojenou variantu Kal 3 (23,47 kg/ha) a to na stanovišti Suchdol. Nejnižší odběr P při porovnání hnojených variant byl zjištěn pro nehnojenou variantu Kontrola (3,11 kg/ha) na stanovišti v Humpolci.



Graf 1 Odběry P [kg/ha] zrnem pšenice pro jednotlivé varianty hnojení pro rok 2013

Odběr fosforu zrnem pšenice ozimé v roce 2014 a rozdíly v odběru fosforu pro jednotlivé typy hnojení je znázorněn v **Grafu 2**. Hodnoty pro hnojenou variantu Kal 1 se pohybovaly od 21,23 kg/ha na stanovišti Suchdol do hodnoty 27,05 kg/ha na stanovišti Humpolec. U varianty Kal 3 se hodnoty pohybovaly od 23,26 kg/ha v Suchdolu po 30,32 kg/ha na stanovišti Humpolec. Hodnoty pro variantu hnojenou N se pohybovaly od 23,15 kg/ha na stanovišti Suchdol do 28,70 kg/ha pro stanoviště Humpolec. U varianty hnojené NPK bylo rozmezí hodnot od 24,00 kg/ha u stanoviště Suchdol do 29,16 kg/ha na stanovišti Humpolec. Hodnoty nehnojené varianty Kontrola se pohybovaly v intervalu od 12,78 kg/ha na stanovišti Humpolec do 14,61 kg/ha na stanovišti Suchdol.

Nejvyšší odběr P při porovnání všech hnojených variant byly vypočteny pro hnojenou variantu Kal 3 (30,32 kg/ha) a to na stanovišti Humpolec. Nejnižší odběr P při porovnání hnojených variant byl zjištěn pro nehnojenou variantu Kontrola (12,78 kg/ha) na stanovišti v Humpolci.

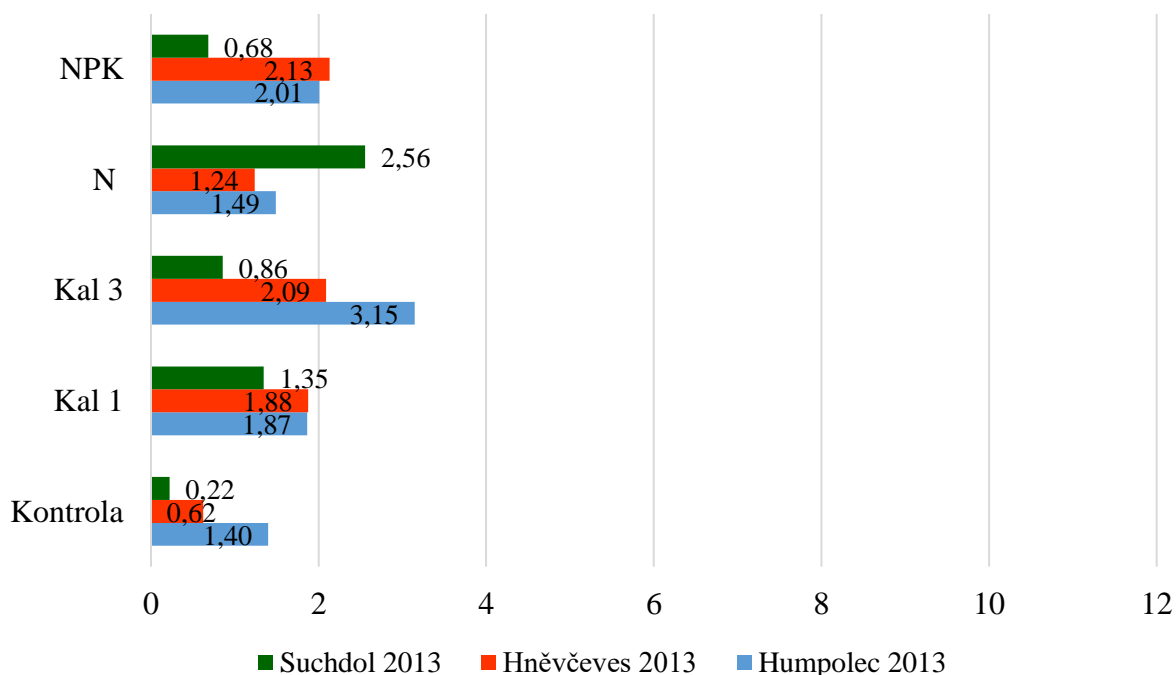


Graf 2 Odběry P [kg/ha] zrnem pšenice pro jednotlivé varianty hnojení pro rok 2014

Odběr fosforu slámou pšenice ozimé v roce 2013 a rozdíly v odběru fosforu pro jednotlivé typy hnojení a stanoviště je znázorněn v **Grafu 3**.

Hodnoty pro hnojenou variantu Kal 1 se pohybovaly od 1,35 kg/ha na stanovišti Suchdol do hodnoty 1,88 kg/ha na stanovišti Hněvčeves. U varianty Kal 3 se hodnoty pohybovaly od 0,86 kg/ha v Suchdole po 3,15 kg/ha na stanovišti Humpolec. Hodnoty pro variantu hnojenou N se pohybovaly od 1,24 kg/ha na stanovišti Hněvčeves do 2,56 kg/ha pro stanoviště Suchdol. U varianty hnojené NPK bylo rozmezí hodnot od 0,68 kg/ha u stanoviště Suchdol do 2,13 kg/ha na stanovišti Hněvčeves. Hodnoty nehnojené varianty Kontrola se pohybovaly v intervalu od 0,22 kg/ha na stanovišti Suchdol do 1,40 kg/ha na stanovišti Humpolec.

Nejvyšší odběr P při porovnání všech hnojených variant byl vypočten pro hnojenou variantu Kal 3 (3,15 kg/ha) a to na stanovišti Humpolec. Nejnižší odběr P při porovnání hnojených variant byl zjištěn pro nehnojenou variantu Kontrola (0,22 kg/ha) na stanovišti v Suchdolu. Jak je patrné, hodnoty pro variantu nehnojenou byly nejnižší ze sledovaných variant.



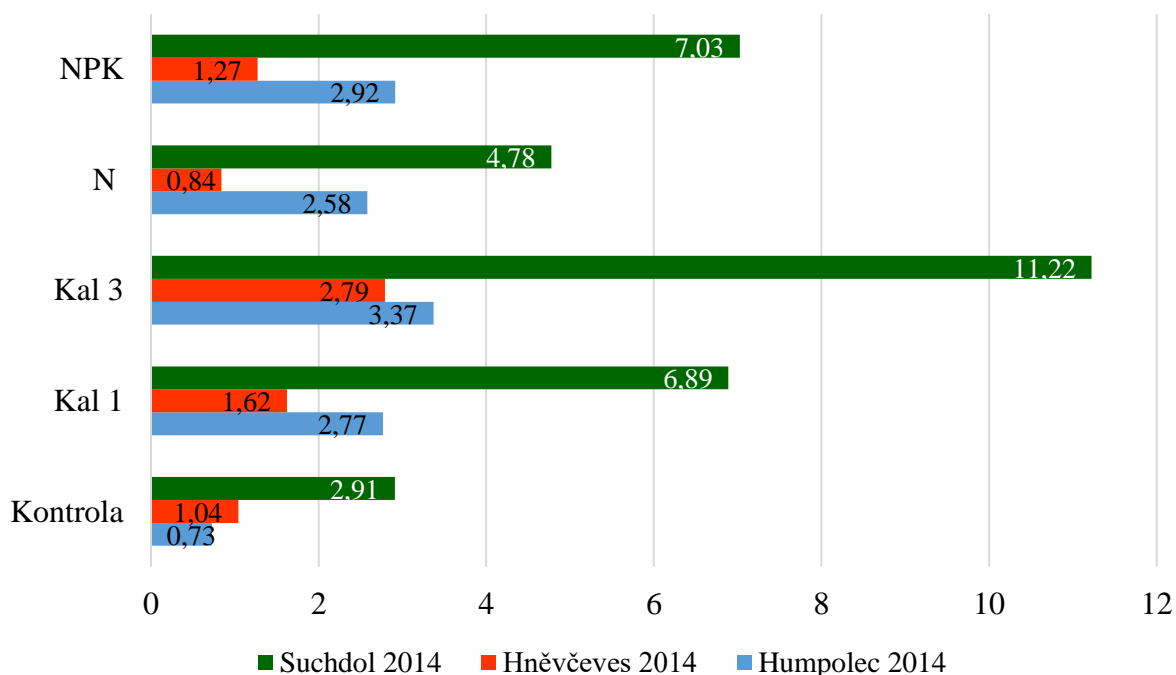
Graf 3 Odběry P [kg/ha] slámou pšenice pro jednotlivé varianty hnojení pro rok 2013

Největší rozdíl v odběrech fosforu slámou pšenice ozimé mezi stanovišti byl zaznamenán pro hnojenou variantu Kal 3. Pro stanoviště Suchdol byla u varianty Kal 3 vypočtena hodnota

0,86 kg/ha, zatímco pro stanoviště Humpolec byla vypočtená hodnota vyšší, 3,15 kg/ha a stejně tak i pro stanoviště Hněvčeves, 2,09 kg/ha. Naopak nejméně se lišily vypočtené hodnoty pro variantu Kal 1. U této varianty se hodnoty odběru fosforu pro stanoviště Humpolec a Hněvčeves lišily pouze o setinu kg/ha.

Odběr fosforu slámou pšenice ozimé v roce 2014 a rozdíly v odběru fosforu pro jednotlivé typy hnojení a stanoviště je znázorněn v **Grafu 4**.

Hodnoty pro hnojenou variantu Kal 1 se pohybovaly od 1,62 kg/ha na stanovišti Hněvčeves do hodnoty 6,89 kg/ha na stanovišti Suchdol. U varianty Kal 3 se hodnoty pohybovaly od 2,79 kg/ha v Hněvčevsi po 11,22 kg/ha na stanovišti Suchdol. Hodnoty pro variantu hnojenou N se pohybovaly od 0,84 kg/ha na stanovišti Hněvčeves do 4,78 kg/ha pro stanoviště Suchdol. U varianty hnojené NPK bylo rozmezí hodnot od 1,27 kg/ha u stanoviště Hněvčeves do 7,03 kg/ha na stanovišti Suchdol. Hodnoty nehnojené varianty Kontrola se pohybovaly v intervalu od 0,73 kg/ha na stanovišti Humpolec do 2,91 kg/ha na stanovišti Suchdol.



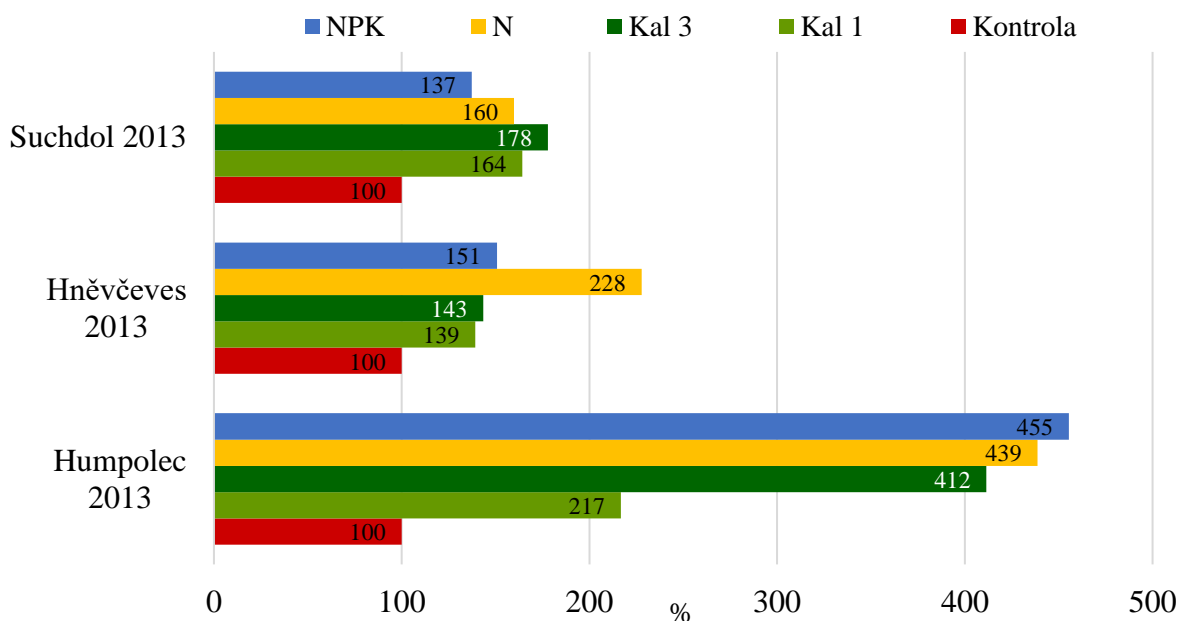
Graf 4 Odběry P [kg/ha] slámou pšenice pro jednotlivé varianty hnojení pro rok 2014

Nejvyšší odběr P při porovnání všech hnojených variant byl vypočten pro hnojenou variantu Kal 3 (11,22 kg/ha) a to na stanovišti Suchdol. Nejnižší odběr P při porovnání hnojených variant

byl zjištěn pro nehnojenou variantu Kontrola (0,73 kg/ha) na stanovišti v Humpolci. Jak je patrné, hodnoty pro variantu nehnojenou byly nejnižší ze sledovaných variant.

Největší rozdíl v odběrech fosforu slámou pšenice ozimé mezi stanovišti byl zaznamenán pro hnojenou variantu Kal 3. Pro stanoviště Suchdol byla u varianty Kal 3 vypočtena hodnota 11,22 kg/ha, zatímco pro stanoviště Humpolec byla vypočtená hodnota nižší, 3,37 kg/ha a stejně tak i pro stanoviště Hněvčeves, 2,79 kg/ha. U varianty Kontrola se vypočtené hodnoty lišily nejméně.

Relativní srovnání odběru fosforu zrnem pšenice ozimé v roce 2013 a rozdíly mezi jednotlivými stanovišti, jsou vyjádřeny v **Grafu 5**.

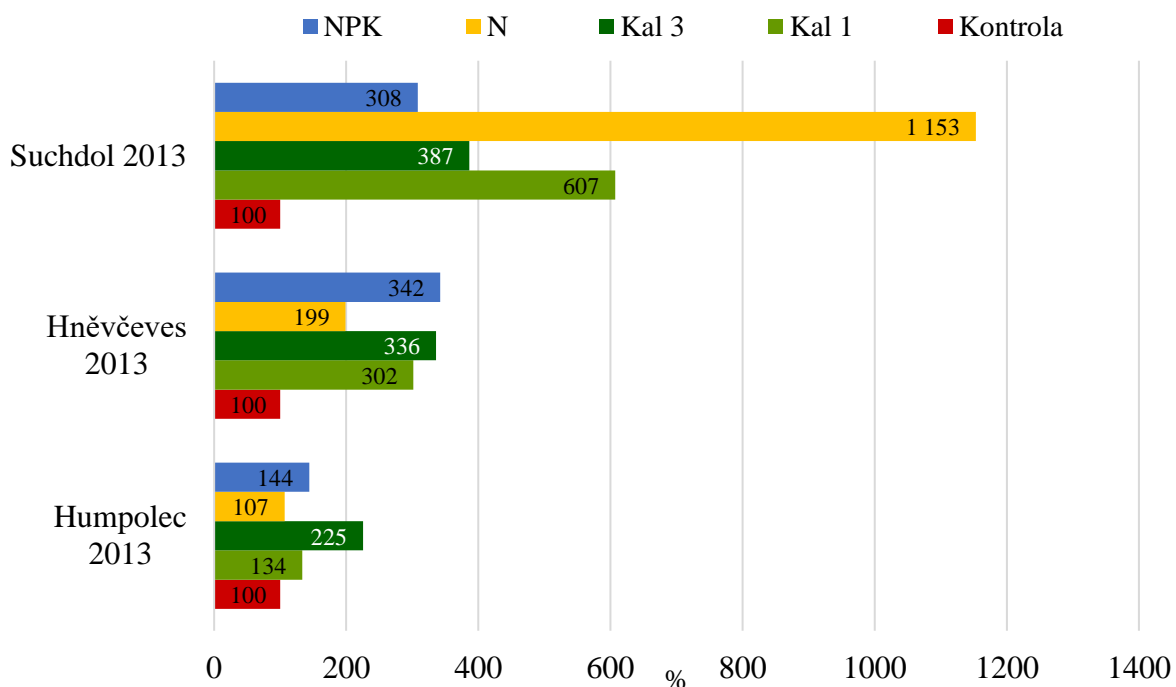


Graf 5 Relativní srovnání odběru P zrnem pšenice v roce 2013 ve vztahu ke kontrole (100%)

Pro stanoviště Suchdol byly hodnoty odběru fosforu vypočteny vyšší pro všechny čtyři porovnávané varianty hnojení s variantou Kontrola. Relativně vyšší odběr ve vztahu ke kontrolní variantě byl vypočten pro variantu Kal 3 a Kal 1. Pro stanoviště Hněvčeves byly rovněž všechny porovnávané hodnoty odběru fosforu u jednotlivých variant hnojení vyšší ve vztahu ke kontrolní variantě, avšak zde byl relativně nejvyšší odběr fosforu vypočten pro variantu hnojenou N, a byl tak vzhledem ke Kontrolě o téměř 130 % vyšší. Na stanovišti Humpolec byly odběry fosforu vzhledem ke kontrolní variantě velmi vysoké, a to až o 355 % pro variantu hnojenou

NPK. Při porovnání hnojených variant Kal 1 a Kal 3 s variantou Kontrola, byl pro Kal 1 naměřen odběr o asi 115 % vyšší a pro Kal 3 dokonce o asi 310 % vyšší.

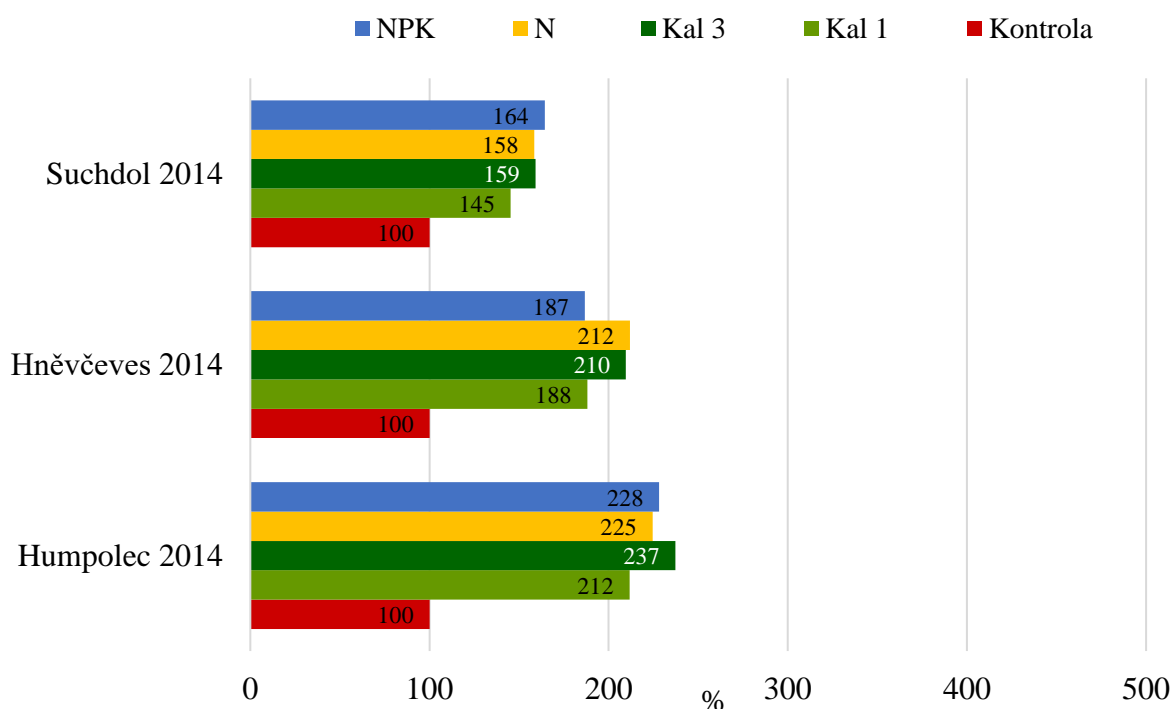
Relativní srovnání odběru fosforu slámou pšenice ozimé v roce 2013 a rozdíly mezi jednotlivými stanovišti, jsou vyjádřeny v **Grafu 6**.



Graf 6 Relativní srovnání odběru P slámou pšenice v roce 2013 ve vztahu ke kontrole (100%)

Na stanovišti Suchdol byly hodnoty odběru fosforu vypočteny vyšší pro všechny čtyři porovnávané varianty hnojení s variantou Kontrola. Relativně nejvyšší odběr fosforu ve vztahu ke kontrolní variantě byl vypočten pro variantu N, a to vyšší o více než 1000 %. Pro stanoviště Hněvčeves byly rovněž všechny porovnávané hodnoty odběru fosforu u jednotlivých variant hnojení vyšší ve vztahu ke kontrolní variantě, avšak zde byl relativně nejvyšší odběr fosforu vypočten pro variantu hnojenou NPK, byť rozdíly mezi touto variantou a variantou Kal 3 a Kal 1 vztáženou ke kontrolní variantě byly malé, v řádu desítek procent. Na stanovišti Humpolec byly odběry fosforu vzhledem ke kontrolní variantě velmi nízké, a to o 125 % pro hnojenou variantu Kal 3. Při porovnání hnojené varianty N s variantou Kontrola, byl pro variantu N vypočten odběr pouze o asi 7 % vyšší.

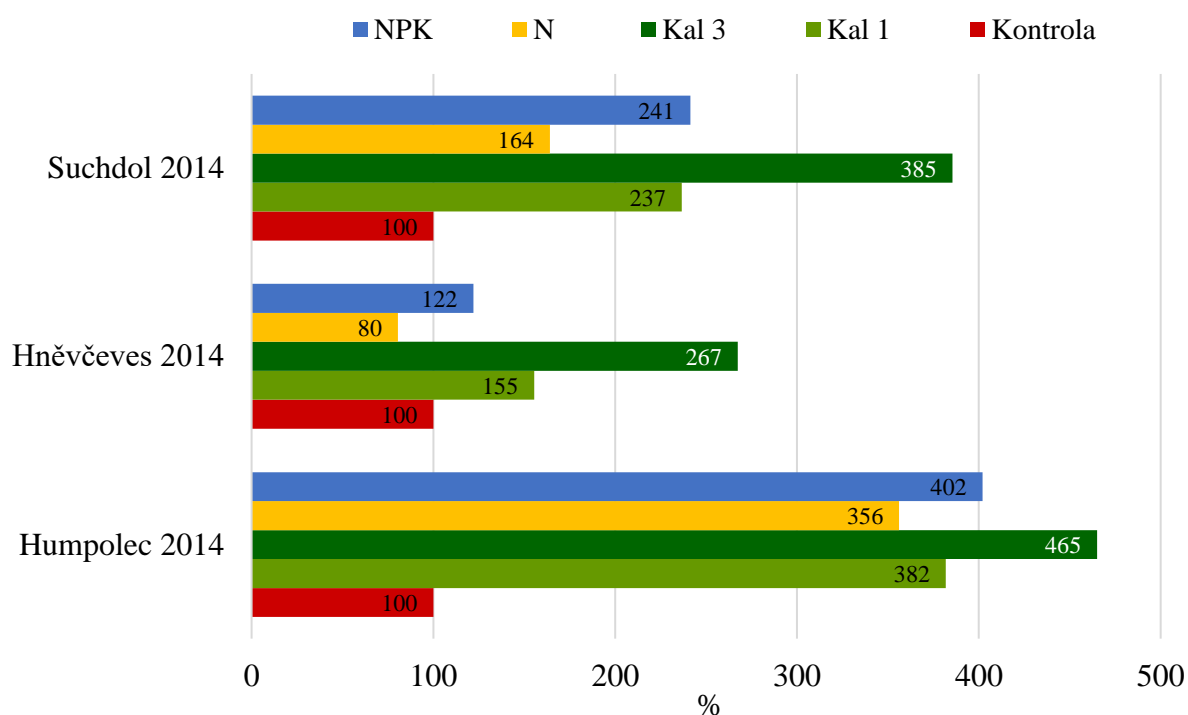
Relativní srovnání odběru fosforu zrnem pšenice ozimé v roce 2014 a rozdíly mezi jednotlivými stanovišti, jsou vyjádřeny v **Grafu 7**.



Graf 7 Relativní srovnání odběru P zrnem pšenice v roce 2014 ve vztahu ke kontrole (100%)

Pro stanoviště Suchdol byly hodnoty odběru fosforu vypočteny vyšší pro všechny čtyři porovnávané varianty hnojení s variantou Kontrola. Relativně vyšší odběr ve vztahu ke kontrolní variantě byl vypočten pro všechny varianty velmi podobný s rozdílem mezi 45 % – 65 %. Pro stanoviště Hněvčeves byly rovněž všechny porovnávané hodnoty odběru fosforu u jednotlivých variant hnojení vyšší ve vztahu ke kontrolní variantě, stejně tak byly hodnoty odběrů velmi podobné, avšak zde byl relativně vyšší odběr fosforu vzhledem k variantě Kontrola s rozdílem mezi 87 % - 112 %. Na stanovišti Humpolec byly odběry fosforu vzhledem ke kontrolní variantě vysoké a velmi vyrovnané, nejvíce se vzhledem ke Kontrolě lišil odběr fosforu u hnojené varianty Kal 3, tedy o 137 %. Při porovnání hnojené varianty Kal 1 s variantou Kontrola, byl pro Kal 1 naměřen odběr o asi 112 % vyšší.

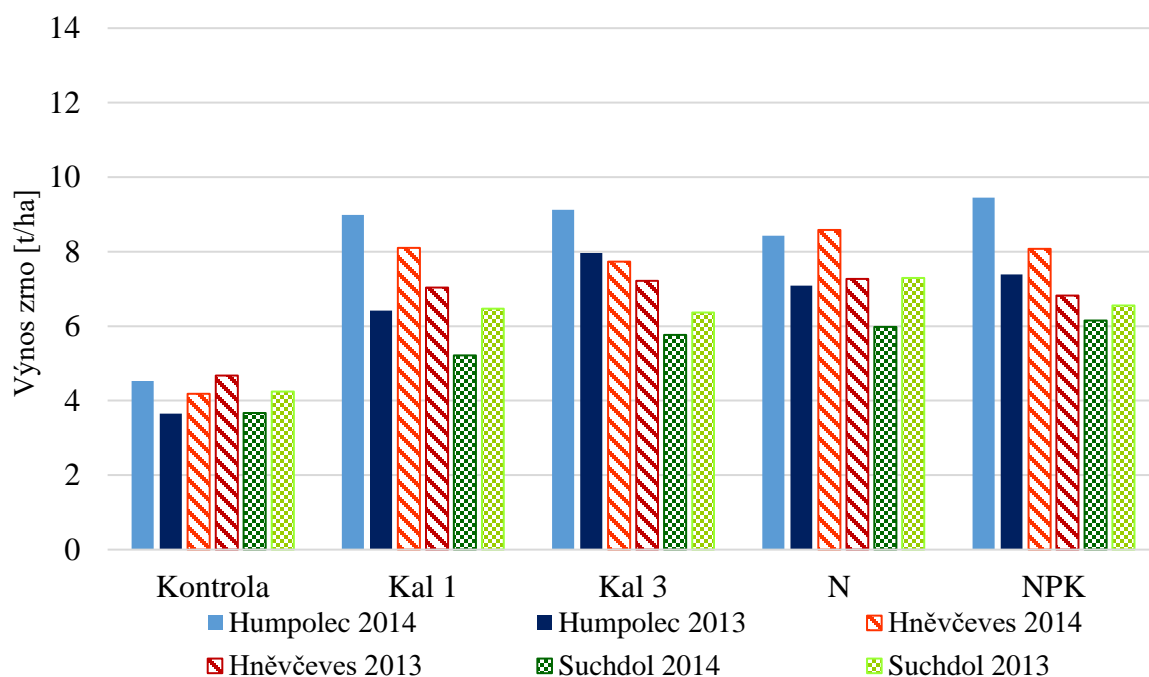
Relativní srovnání odběru fosforu slámou pšenice ozimé v roce 2014 a rozdíly mezi jednotlivými stanovišti jsou vyjádřeny v **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů..** Pro stanoviště Suchdol byly hodnoty odběru fosforu vypočteny vyšší pro všechny čtyři porovnávané varianty hnojení s variantou Kontrola. Relativně nejvyšší odběr ve vztahu ke kontrolní variantě byl vypočten pro variantu Kal 3, varianty NPK a Kal 1 měly odběry fosforu velmi podobné. Pro stanoviště Hněvčeves nebyly všechny porovnávané hodnoty odběru fosforu u jednotlivých variant hnojení vyšší ve vztahu ke kontrolní variantě, byl zde relativně nejvyšší odběr fosforu vypočten pro variantu Kal 3, a byl tak vzhledem ke Kontrolě o téměř 168 % vyšší. Pro variantu hnojenou N byl ve vztahu ke kontrolní variantě vypočten odběr nižší a to o 20 %. Na stanovišti Humpolec byly odběry fosforu vzhledem ke kontrolní variantě velmi vysoké, a to až o 365 % pro hnojenou variantu Kal 3. Při porovnání hnojené varianty Kal 1 s variantou Kontrola, byl pro Kal 1 naměřen odběr o asi 282 % vyšší.



Graf 8 Relativní srovnání odběru P slámou pšenice v roce 2014 ve vztahu ke kontrolě (100%)

5.3 Výnos zrna a slámy pšenice ozimé

Srovnání výnosu zrna pšenice pro jednotlivé roky je znázorněno na **Grafu 9**. Výnos pro stanoviště Suchdol se pohyboval od hodnoty 4,24 t/ha u nehnojené varianty po 7,29 t/ha u varianty hnojené N v roce 2013. V roce 2014 byly výnosy u stanoviště Suchdol na všech variantách nižší, a pohybovaly se od 3,67 t/ha pro nehnojenou variantu po 6,15 t/ha pro variantu NPK. Výnos pro stanoviště Hněvčeves se pohyboval od 4,68 t/ha u nehnojené varianty po 7,26 t/ha u varianty hnojené N v roce 2013. V roce 2014 byly výnosy na stanovišti Hněvčeves na všech variantách vyšší s výjimkou kontrolní nehnojené varianty. Výnosy se na tomto stanovišti pohybovaly od 4,18 t/ha pro nehnojenou variantu po 8,59 t/ha pro variantu N. Výnos pro stanoviště Humpolec se pohyboval od hodnoty 3,65 t/ha u nehnojené varianty po 7,96 t/ha u hnojené varianty Kal 3v roce 2013. V roce 2014 byly výnosy u stanoviště Humpolec na všech hnojených variantách vyšší, a pohybovaly se od 4,52 t/ha pro nehnojenou variantu po 9,45 t/ha pro variantu NPK.



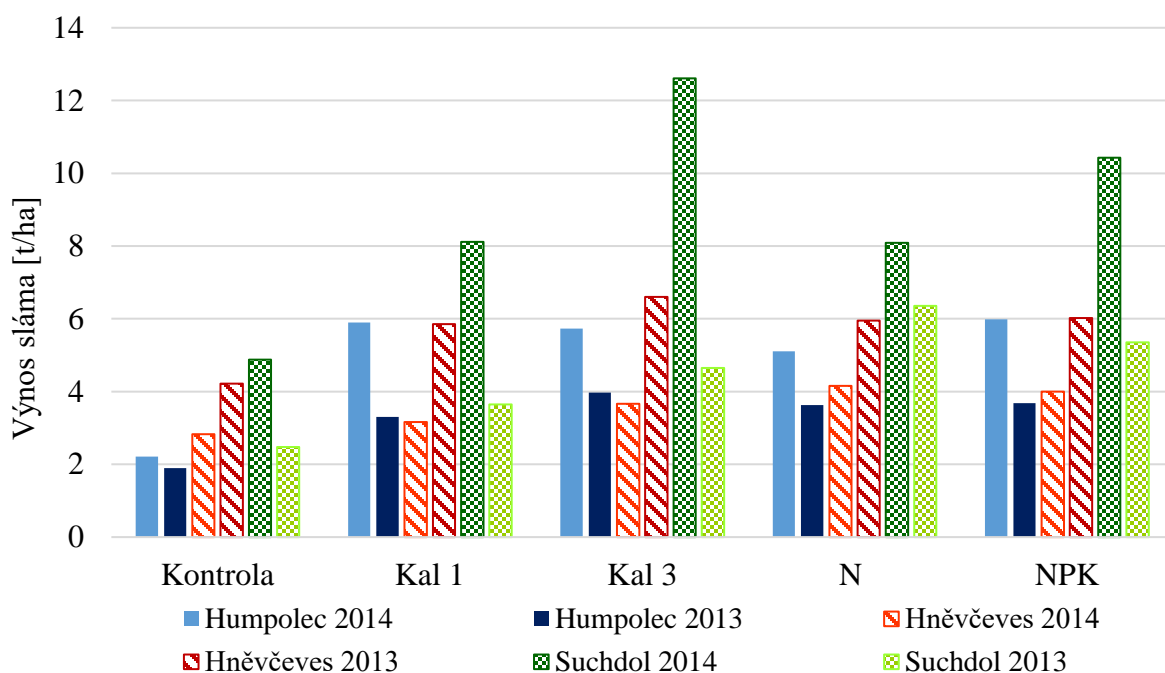
Graf 9 Výnos [t/ha] zrna pšenice pro jednotlivé varianty hnojení pro roky 2013 a 2014

Největší rozdíl ve výnosu zrna pšenice mezi stanovišti byl zaznamenán pro hnojenou variantu Kal 1. Pro stanoviště Suchdol byla u varianty Kal 1 pro rok 2014 vypočtena hodnota 5,22 t/ha, což je nejnižší hodnota výnosu pro tuto variantu hnojení za oba hodnocené roky pro zkoumaná stanoviště, zatímco pro stanoviště Humpolec byla pro rok 2014 vypočtená hodnota vyšší, 8,99 kg/ha a pro stanoviště Hněvčeves, 8,10 t/ha. Pro rok 2013 byly výnosy u této varianty velmi podobné. U varianty NPK byl výnos u stanoviště Suchdol v roce 2014, pro které byla vypočtena hodnota 6,15 t/ha, rovněž nižší než u stanoviště Humpolec v témže roce, 9,45 t/ha, a v Hněvčevsi byla pro rok 2014 vypočtena na hodnotu 8,08 t/ha. Rozdíly u hnojené varianty NPK pro rok 2014 byly však při porovnání vypočtených hodnot u hnojené varianty Kal 1 menší pro všechna stanoviště. Naopak nejméně se lišily vypočtené hodnoty pro nehnojenou variantu Kontrola. U této varianty se hodnoty výnosu pro stanoviště Humpolec, Hněvčeves a Suchdol liší pouze o desetinu t/ha. Ovšem pro tuto variantu byly výnosy výrazně nižší než pro ostatní varianty, nejnižší výnos zrna pšenice byl u stanoviště Humpolec v roce 2013, 3,65 t/ha, a pro stanoviště Suchdol v roce 2014, 3,67 t/ha.

Srovnání výnosu slámy pšenice pro jednotlivé roky je znázorněno na **Grafu 10**. Výnos pro stanoviště Suchdol se pohyboval od hodnoty 2,48 t/ha u nehnojené varianty po 6,36 t/ha u varianty hnojené N v roce 2013. V roce 2014 byly výnosy u stanoviště Suchdol na všech variantách vyšší, a pohybovaly se od 4,88 t/ha pro nehnojenou variantu po 12,61 t/ha pro variantu Kal 3. Výnos pro stanoviště Hněvčeves se pohyboval od 4,22 t/ha u nehnojené varianty po 6,60 t/ha u hnojené varianty Kal 3 v roce 2013. V roce 2014 byly výnosy na stanovišti Hněvčeves na všech variantách nižší. Výnosy se na tomto stanovišti pohybovaly od 2,83 t/ha pro nehnojenou variantu po 4,16 t/ha pro variantu N. Výnos pro stanoviště Humpolec se pohyboval od hodnoty 1,90 t/ha u nehnojené varianty po 3,97 t/ha u hnojené varianty Kal 3 v roce 2013. V roce 2014 byly výnosy u stanoviště Humpolec na všech hnojených variantách vyšší, a pohybovaly se od 2,21 t/ha pro nehnojenou variantu po 5,99 t/ha pro variantu NPK.

Největší rozdíl ve výnosu mezi stanovišti byl zaznamenán pro hnojenou variantu Kal 3. Pro stanoviště Suchdol byla u varianty Kal 3 pro rok 2014 vypočtena hodnota 12,61 t/ha, což je nejvyšší hodnota výnosu pro tuto variantu hnojení za oba hodnocené roky pro zkoumaná stanoviště, zatímco pro stanoviště Humpolec byla pro rok 2014 vypočtená hodnota nižší,

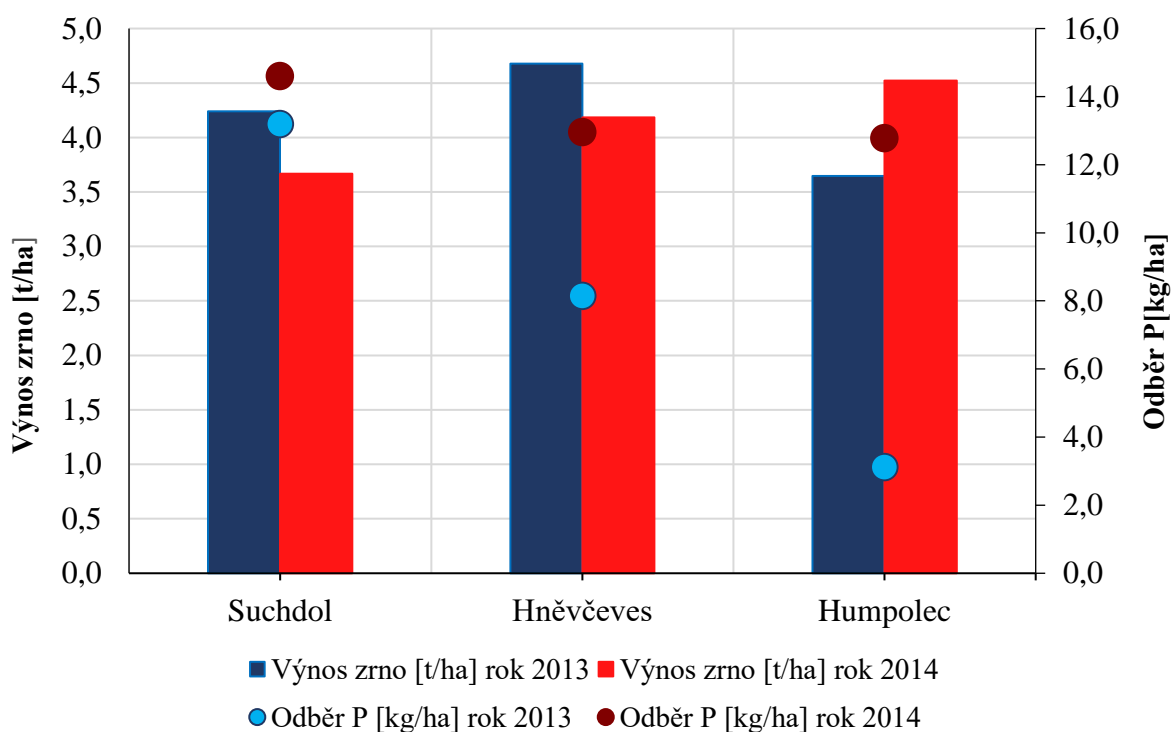
8,73 t/ha a pro stanoviště Hněvčeves, 3,66 t/ha. Pro rok 2013 byly výnosy u této varianty velmi odlišné, nejvyšší hodnota výnosu byla zjištěna u stanoviště Hněvčeves, 6,60 t/ha. U varianty NPK byl odběr u stanoviště Suchdol v roce 2014, pro které byla vypočtena hodnota 10,43 t/ha, rovněž vyšší než u stanoviště Humpolec v témže roce, 5,99 kg/ha a v Hněvčevsi byla pro rok 2014 vypočtena na hodnotu 4,00 t/ha. Rozdíly u hnojené varianty NPK pro rok 2014 byly však při porovnání vypočtených hodnot u hnojené varianty Kal 3 menší pro všechna stanoviště. Naopak nejméně se lišily vypočtené hodnoty pro nehnojenou variantu Kontrola. Ovšem pro tuto variantu byly výnosy výrazně nižší než pro ostatní varianty, nejnižší výnos zrna pšenice byl u stanoviště Humpolec v roce 2013, 1,90 t/ha.



Graf 10 Výnos [t/ha] slámy pšenice pro jednotlivé varianty hnojení pro roky 2013 a 2014

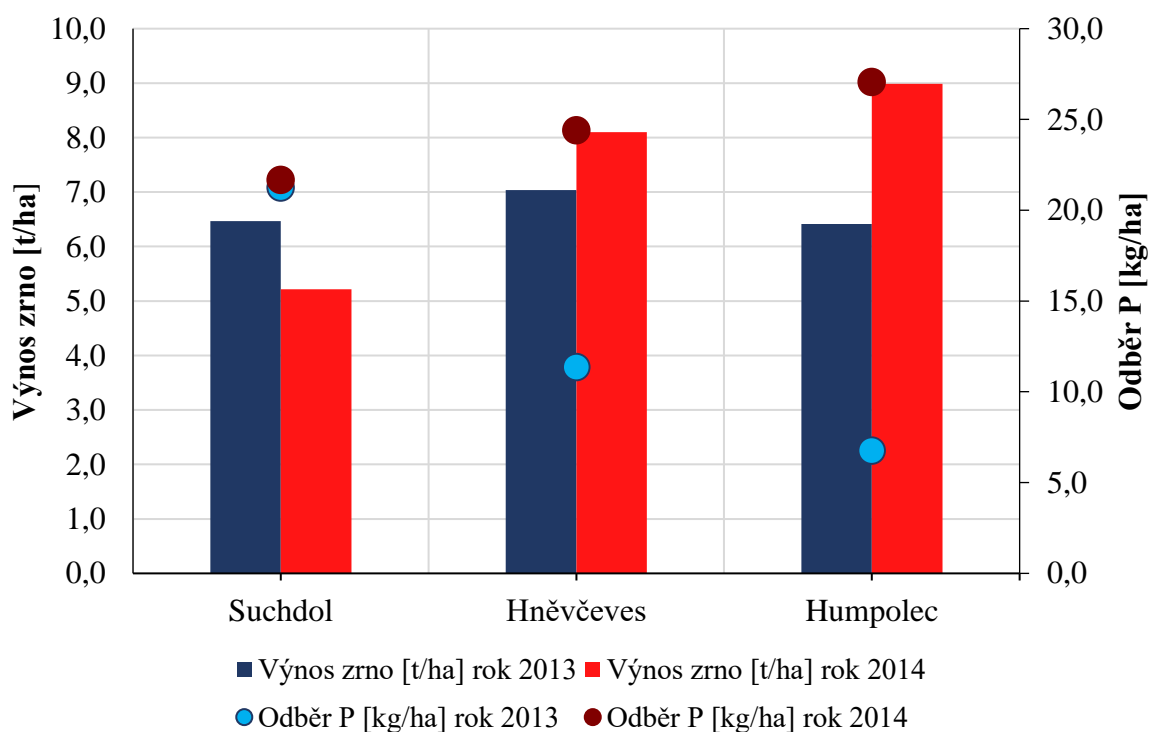
5.4 Závislost odběru fosforu zrnem a slámou pšenice ozimé na výnosu

Závislost výnosu a odběru fosforu zrnem pšenice ozimé v letech 2013 a 2014 a rozdíly v jednotlivých letech pro variantu hnojení Kontrola, tedy variantu nehnojenou, jsou vyjádřeny v **Grafu 11**. Nejnižší hodnota výnosu zrna pšenice, 3,65 t/ha, byla vypočtena pro stanoviště Humpolec, a to konkrétně pro rok 2013. Nejvyšší hodnota výnosu, 4,68 t/ha, byla vypočítána pro stanoviště Hněvčeves pro rok 2013. Pro stanoviště Suchdol byla vyšší hodnotou výnosu 4,24 kg/ha hodnota z roku 2013, naopak pro stanoviště Humpolec byl zaznamenán vyšší výnos v roce 2014. Pro rok 2013 z grafického vyjádření nelze určit přímou závislost výnosu na odběru fosforu zrnem pšenice, avšak pro rok 2014 se odběr fosforu u všech sledovaných stanovišť pohybuje okolo 13 – 14 kg/ha, tedy bez ohledu na výnos jsou si hodnoty odběrů fosforu relativně podobné.



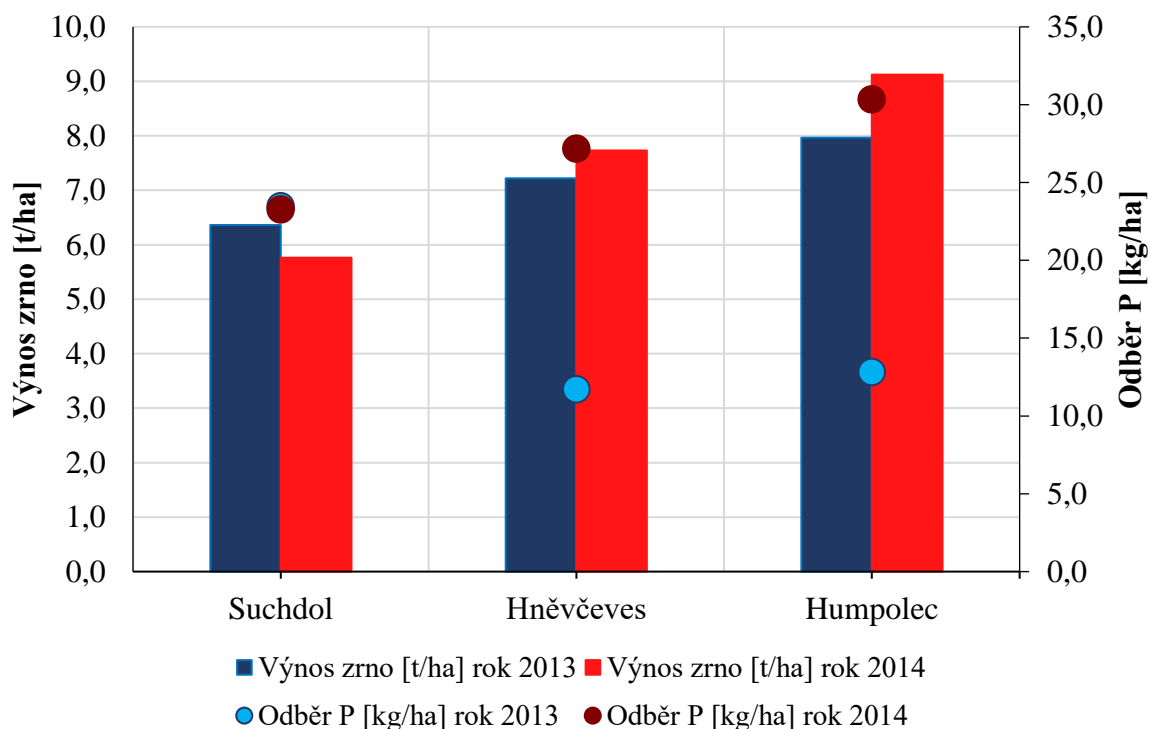
Graf 11 Závislost výnosu a odběru fosforu zrnem pšenice pro variantu hnojení Kontrola

Závislost výnosu a odběru fosforu zrnem pšenice ozimé v letech 2013 a 2014 a rozdíly v jednotlivých letech pro variantu hnojení Kal 1 jsou vyjádřeny v **Grafu 12**. Nejnižší hodnota výnosu zrna pšenice, 5,22 t/ha, byla vypočtena pro stanoviště Suchdol, a to konkrétně pro rok 2014. Nejvyšší hodnota výnosu, 8,99 t/ha, byla vypočítána pro stanoviště Humpolec pro rok 2014. Pro stanoviště Hněvčeves byla vyšší hodnotou výnosu 8,10 t/ha hodnota z roku 2014, naopak pro stanoviště Suchdol byl zaznamenán vyšší výnos v roce 2013. Pro rok 2013 z grafického vyjádření lze určit závislost výnosu na odběru fosforu zrnem pšenice pro stanoviště Hněvčeves a Humpolec, a to pokles odběru fosforu při nižší hodnotě výnosu. V roce 2014 je zřejmá přímo úměrná závislost odběru fosforu a výše hodnoty výnosu, kdy při vyšší hodnotě výnosu, byla rovněž i vyšší hodnota odběru fosforu z jednotlivých stanovišť. Stanoviště Suchdol mělo v obou letech odběr P velmi podobný, 21,23 kg/ha v roce 2013 a 21,66 kg/ha v roce 2014, zatímco u stanoviště Hněvčeves a stanoviště Humpolec se odběry P lišily v závislosti na výši výnosu v jednotlivých letech.



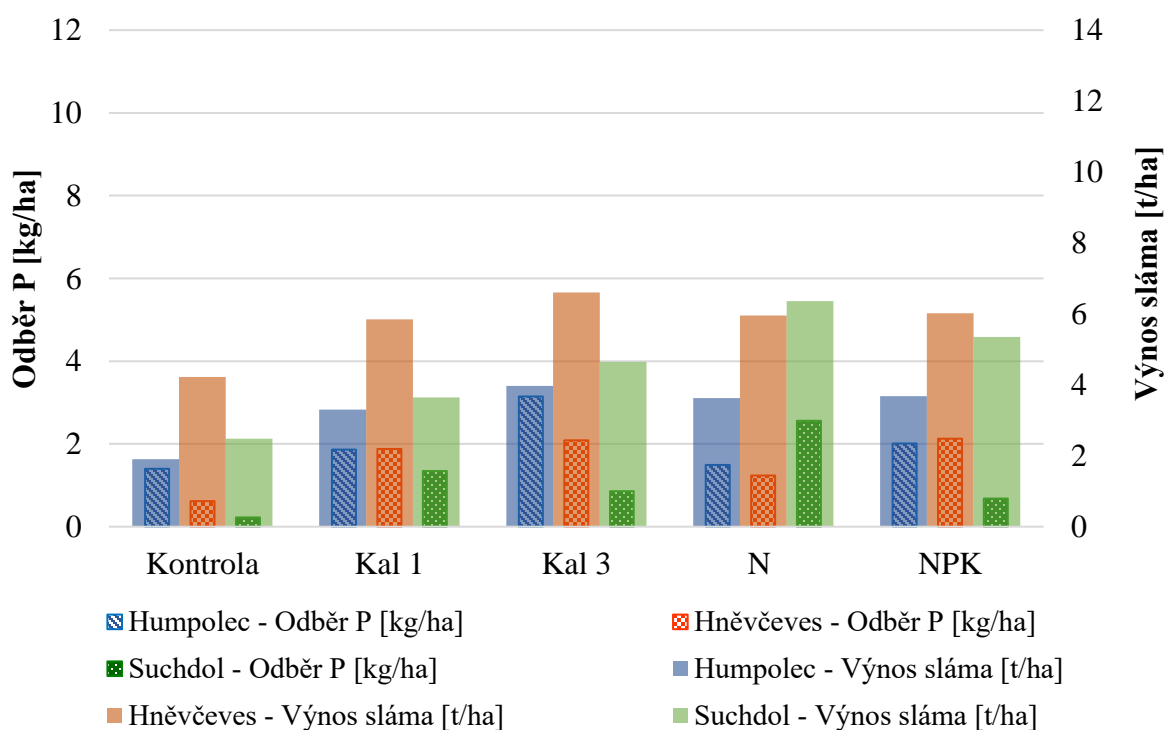
Graf 12 Závislost výnosu a odběru fosforu zrnem pšenice pro variantu hnojení Kal 1

Závislost výnosu a odběru fosforu zrnem pšenice ozimé v letech 2013 a 2014 a rozdíly v jednotlivých letech pro variantu hnojení Kal 3 jsou vyjádřeny v **Grafu 13**. Nejnižší hodnota výnosu zrna pšenice, 5,76 t/ha, byla vypočtena pro stanoviště Suchdol, a to konkrétně pro rok 2014. Nejvyšší hodnota výnosu, 9,12 t/ha, byla vypočítána pro stanoviště Humpolec pro rok 2014. Pro stanoviště Hněvčeves byla vyšší hodnotou výnosu 7,73 kg/ha hodnota z roku 2014, naopak pro stanoviště Suchdol byl zaznamenán vyšší výnos v roce 2013. Pro rok 2013 a 2014 z grafického vyjádření pro Kal 3 lze konstatovat, že závislosti výnosu a odběru fosforu zrnem pšenice ozimé při porovnání s grafickou závislostí pro Kal 1 jsou podobné. Pro stanoviště Suchdol jsou odběry fosforu pro tuto hnojenou variantu téměř totožné a nejsou tak přímo závislé na výši výnosu. V roce 2014 je zřejmá přímo úměrná závislost odběru fosforu a výše hodnoty výnosu, kdy při vyšší hodnotě výnosu, byla rovněž i vyšší hodnota odběru fosforu z jednotlivých stanovišť.



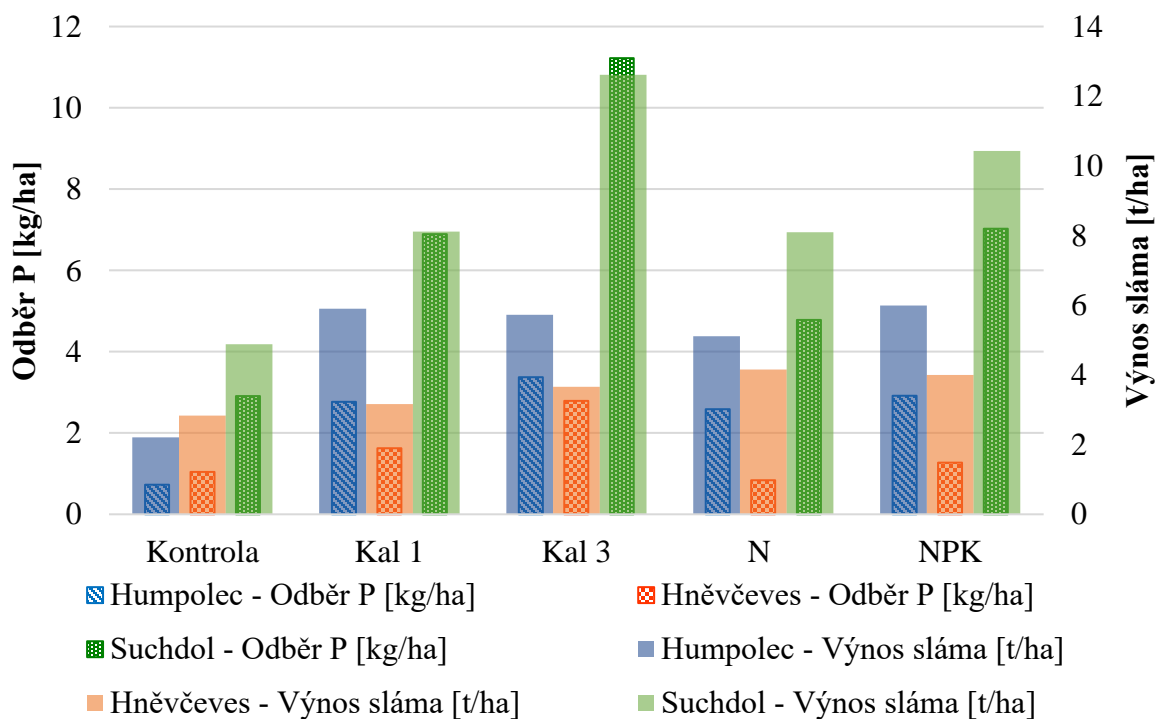
Graf 13 Závislost výnosu a odběru fosforu zrnem pšenice pro variantu hnojení Kal 3

Závislost výnosu a odběru fosforu slámou pšenice ozimé v roce 2013 a rozdíly v jednotlivých variantách hnojení, jsou vyjádřeny v **Grafu 14**. Hodnoty výnosu jsou označeny plnou barvou, stanoviště je vždy barevně sjednoceno. Hodnoty odběru fosforu u jednotlivých stanovišť jsou graficky vyjádřeny různým šrafováním. Nejnižší hodnota výnosu slámy pšenice, 1,90 t/ha, byla vypočtena pro stanoviště Humpolec, a to konkrétně pro kontrolní variantu. U varianty Kontrola byl zjištěn při vyšším výnosu velmi malý odběr fosforu pro stanoviště Suchdol, naopak u stanoviště Humpolec byl při nižším výnosu zjištěn odběr větší. Nejvyšší hodnota výnosu, 6,60 t/ha, byla vypočítána pro stanoviště Hněvčeves pro variantu Kal 3, avšak pro tuto variantu byl nejvyšší odběr na stanovišti v Humpolci, i přesto, že na tomto stanovišti byl pro tuto variantu výnos nejnižší. Pro stanoviště Suchdol byl zaznamenán nejvyšší výnos pro variantu hnojení N a zároveň i nejvyšší odběr ze zkoumaných variant.



Graf 14 Závislost výnosu a odběru fosforu slámou pšenice pro různé varianty hnojení pro rok 2013

Závislost výnosu a odběru fosforu slámou pšenice ozimé v roce 2014 a rozdíly v jednotlivých variantách hnojení, jsou vyjádřeny v **Grafu 15**. Hodnoty výnosu jsou označeny plnou barvou, stanoviště je vždy barevně sjednoceno. Hodnoty odběru fosforu u jednotlivých stanovišť jsou graficky vyjádřeny různým šrafováním. Nejnižší hodnota výnosu slámy pšenice, 2,21 t/ha, byla vypočtena pro stanoviště Humpolec, a to konkrétně pro kontrolní variantu. U varianty Kontrola byla zjištěna přímo úměrná závislost, tedy že při vyšším výnosu je odebráno vyšší množství fosforu, a to pro všechna stanoviště, a stejně tak i pro všechny hnojené varianty. Nejvyšší hodnota výnosu, 12,61 t/ha, byla vypočítána pro stanoviště Suchdol pro variantu Kal 3, a rovněž pro tuto variantu byl zjištěn i nejvyšší odběr. Pro stanoviště Humpolec byl zaznamenán nejvyšší výnos pro variantu hnojení NPK a Kal 1, a avšak nejvyšší odběr ze zkoumaných variant byl vypočten pro toto stanoviště v hnojené variantě Kal 3. Stanoviště Hněvčeves mělo nejvyšší odběr P rovněž pro hnojenou variantu Kal 3, avšak vyšší výnos byl pro toto stanoviště vypočten hned pro dvě odlišné varianty hnojení, a to pro variantu NPK a variantu N.

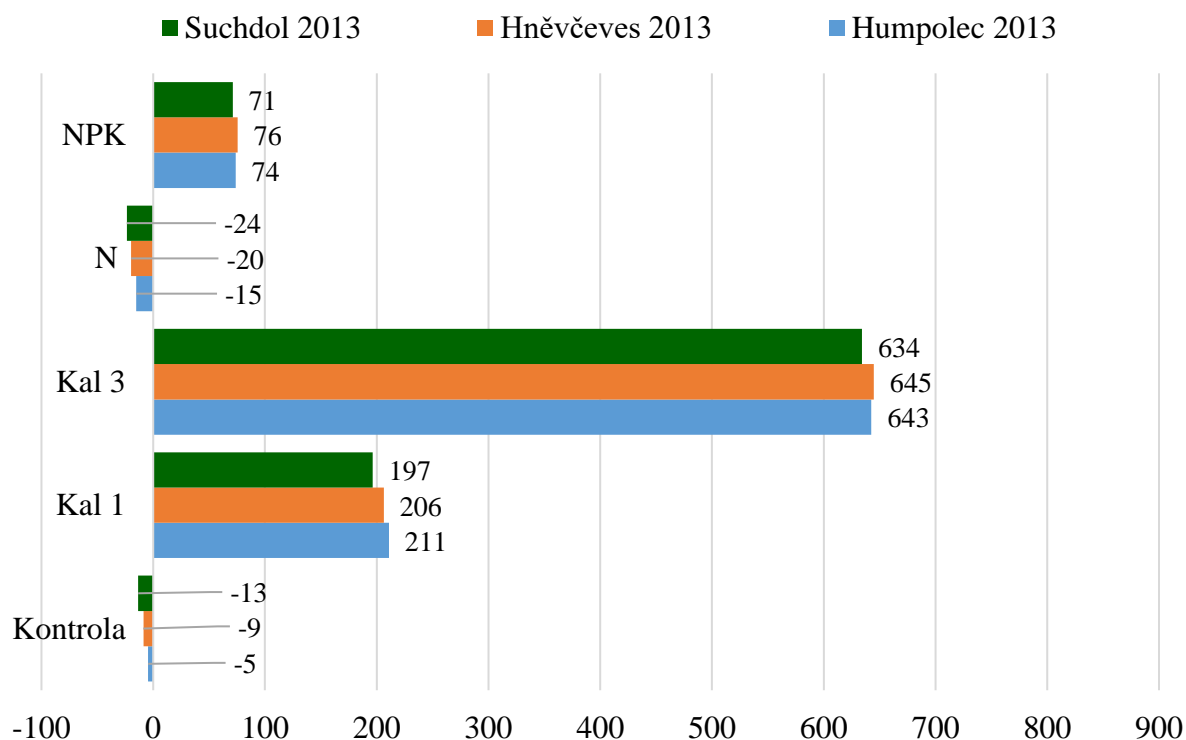


Graf 15 Závislost výnosu a odběru fosforu slámou pšenice pro různé varianty hnojení pro rok 2014

5.5 Bilance příjmu a odběru fosforu

Bilance příjmu a odběru fosforu pšenící ozimou v roce 2013 a rozdíly v jednotlivých variantách hnojení, jsou vyjádřeny v **Grafu 16**.

Na stanovišti Suchdol byla vypočtena bilance v roce 2013 u nehnojené varianty Kontrola -13,41 kg P/ha, která je zároveň nejnižší bilancí. Nejvyšší bilance pro variantu Kontrola byla vypočtena pro stanoviště Humpolec, a to -4,51 kg P/ha. Stanoviště v Hněvčevsi mělo pro tuto variantu bilanci -8,77 kg P/ha. U hnojené varianty N byly vypočteny v roce 2013 nižší bilance než u nehnojené kontrolní varianty, pro stanoviště Suchdol bilance nejnižší, -23,63 kg P/ha, pro stanoviště Hněvčevs -19,80 kg P/ha a pro stanoviště Humpolec bilance nejvyšší, -15,15 kg P/ha.



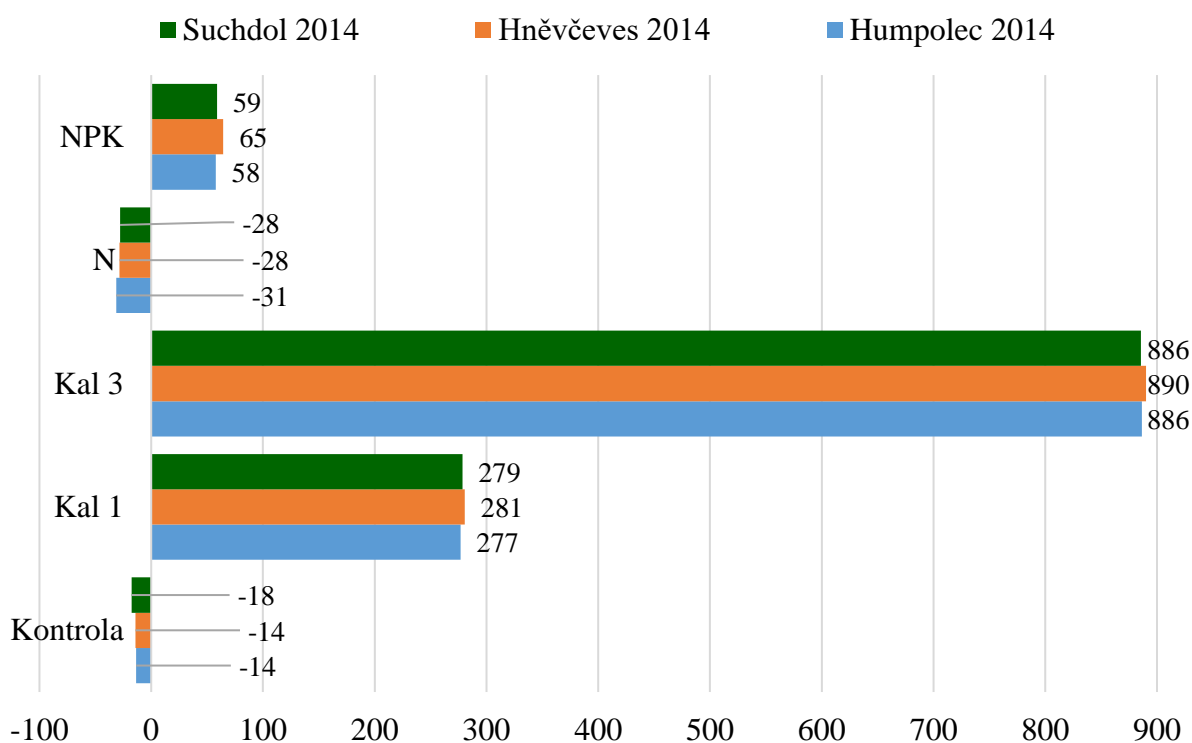
Graf 16 Bilance příjmu a odběru fosforu pro jednotlivé varianty hnojení v roce 2013

Pro variantu hnojení Kal 1 byla vypočtena v roce 2013 pro stanoviště Suchdol hodnota bilance 196,53 kg P/ha, která byla hodnotou nejnižší. Vyšší bilance byla vypočtena pro stanoviště Hněvčeves, a to 206,31 kg P/ha a nejvyšší bilance byla vypočtena pro tuto variantu hnojení u stanoviště Humpolec, 210,92 kg P/ha. Na stanovišti Suchdol byla pro variantu hnojení Kal 3

vypočtena v roce 2013 hodnota bilance 634,28 kg P/ha, která byla hodnotou nejnižší. Vyšší bilance byla vypočtena pro stanoviště Hněvčeves, 644,82 kg P/ha a nejvyšší bilance byla vypočtena pro tuto variantu hnojení u stanoviště Humpolec, 210, 92 kg P/ha.

U hnojené varianty NPK byla vypočtena v roce 2013 bilance pro stanoviště Suchdol nejnižší, 71,19 kg P/ha, pro stanoviště Hněvčeves nejvyšší, 75,59 kg P/ha a pro stanoviště Humpolec bilance, 73,81 kg P/ha.

Bilance příjmu a odběru fosforu pšenicí ozimou v roce 2014 a rozdíly v jednotlivých variantách hnojení, jsou vyjádřeny v **Grafu 17**.



Graf 17 Bilance příjmu a odběru fosforu pro jednotlivé varianty hnojení v roce 2014

Na stanovišti Humpolec byla vypočtena bilance v roce 2014 u nehnojené varianty Kontrola -13,50 kg P/ha, zároveň to na tomto stanovišti byla nejvyšší bilance. Nejnižší bilance pro variantu Kontrola byla vypočtena pro stanoviště Suchdol, a to -17,52 kg P/ha. Stanoviště v Hněvčevsi mělo pro tuto variantu bilanci -14,01 kg P/ha. U hnojené varianty N byly vypočteny v roce 2014 nižší bilance než u nehnojené kontrolní varianty, pro stanoviště Suchdol bilance nejvyšší, -27,93 kg P/ha, pro stanoviště Hněvčeves -28,31 kg P/ha a pro stanoviště Humpolec bilance nejnižší, -31,28 kg P/ha.

Pro variantu hnojení Kal 1 byla vypočtena v roce 2014 pro stanoviště Suchdol hodnota bilance 278,58 kg P/ha. Vyšší bilance byla vypočtena pro stanoviště Hněvčeves, a to 280,69 kg P/ha a nejnižší bilance byla vypočtena pro tuto variantu hnojení u stanoviště Humpolec, 276,88 kg P/ha. Na stanovišti Suchdol byla pro variantu hnojení Kal 3 vypočtena v roce 2014 hodnota bilance 885,62 kg P/ha, která byla hodnotou nejnižší. Nejvyšší bilance byla vypočtena pro stanoviště Hněvčeves, 890,15 kg P/ha a pro tuto variantu hnojení u stanoviště Humpolec byla bilance 886,41 kg P/ha.

U hnojené varianty NPK byla vypočtena v roce 2014 bilance pro stanoviště Suchdol nižší, 58,97 kg P/ha, než pro stanoviště Hněvčeves, kde byla nejvyšší, 64,52 kg P/ha a pro stanoviště Humpolec bilance nejnižší, 57,92 kg P/ha.

6 DISKUZE

6.1 Obsah fosforu v zrně a slámě pšenice ozimé

Naměřené hodnoty obsahu fosforu v zrně pšenice ozimé v roce 2014 byly na stanovišti Suchdol pro všechny sledované varianty vyšší než v roce 2013. Výsledky však nejsou přímo závislé na výnosu, neboť výnos na stanovišti Suchdol byl v roce 2013 vyšší pro všechny sledované varianty. V roce 2013 mohlo však na stanovišti Suchdol dojít k tzv. zředovacímu efektu, velký nárůst biomasy může mít tento zředovací efekt na fosfor přijatý rostlinou, a tím i nižší hodnoty obsahu P v pšenici. Tento jev zmiňují ve své práci autoři Blackshaw et al. (2004) nebo Hamnér et al. (2017). Stanoviště Suchdol mělo v obou porovnávaných letech průměrné obsahy fosforu vyrovnanější pro všechny varianty než stanoviště v Hněvčevsi a Humpolci.

Na stanovišti Hněvčevs byly naměřené hodnoty obsahu fosforu v zrně pšenice vyšší pro všechny sledované varianty v roce 2014. Obsah fosforu ve slámě pšenice byl však pro rok 2013 a 2014 velmi podobný u variant NPK a N, pro zbylé varianty byl v roce 2014 vyšší. Hodnoty obsahu fosforu v zrně pšenice v roce 2014 odpovídají výši výnosu, který byl pro stanoviště Hněvčevs pro všechny sledované varianty v roce 2014 vyšší, avšak naopak pro slámu byl vyšší obsah P v roce 2013.

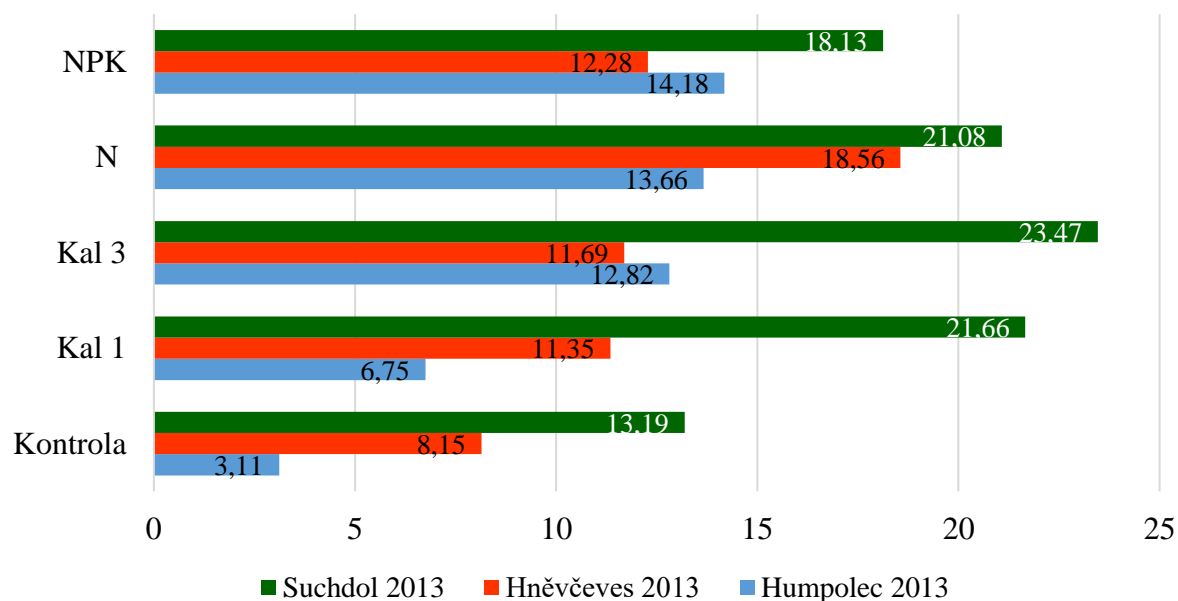
Hodnoty obsahu fosforu v zrně pšenice ozimé byly na stanovišti Humpolec pro všechny varianty v roce 2014 vyšší. Obsah P ve slámě pšenice byl v roce 2014 vyšší pro varianty Kal 1 a N. Hodnoty obsahu P v zrně pšenice odpovídají výši výnosu, který byl v roce 2014 vyšší. Výnos slámy pšenice pro stanoviště Humpolec byl v roce 2014 rovněž vyšší pro všechny sledované varianty oproti roku 2013. Pro nehnojenou variantu Kontrola byl u zrna pšenice vždy obsah fosforu nižší než pro ostatní varianty hnojení. McDonald et al. (2015) ve své práci uvedl hodnoty obsahu fosforu v zrně pšenice pro nehnojenou variantu od 2534 mg P/kg zrna pšenice do hodnoty 3777 mg P/kg zrna pšenice. Pro variantu hnojenou 30 kg P/ha byl obsah fosforu v zrně pšenice vyšší v průměru o 200 mg P/kg zrna pšenice. Výsledky naměřené v této práci těmto hodnotám odpovídají. Například pro stanoviště Suchdol jsou pro hnojenou variantu Kal 1 hodnoty obsahu P v zrně asi o 200 mg P/kg zrna pšenice vyšší než pro nehnojenou variantu Kontrola. Tlustoš et al. (2017) ve své práci porovnává rozdíly mezi nehnojenou variantou a variantami hnojenými hnojem a hnojem v kombinaci s NPK, obsahy fosforu v zrně pšenice

se pro nehnojenou variantu se pohybují mezi 2584 – 2980 mg P/kg zrna pšenice. Xin et al. (2017) ve své studii uvedl hodnoty obsahu P ve slámě pšenici pro nehnojenou variantu, 2,59 g P/kg slámy pšenice, 2,35 g P/kg slámy pšenice pro variantu hnojenou pouze Na K a 2,88 g P/kg slámy pšenice pro variantu hnojenou NPK. Vyšší obsah P ve slámě pšenici, 3,93 g P/kg, byl zjištěn u varianty hnojené kompostem. Námi zjištěné výsledky těmto výsledkům odpovídají. Průměrná hodnota hnojené varianty Kal 1 je 3364 mg P/kg zrna pšenice v roce 2014.

Stanoviště Suchdol mělo v obou porovnávaných letech průměrné obsahy fosforu vyrovnanější pro všechny varianty než stanoviště v Hněvčevsi a Humpolci. Pro nehnojenou variantu Kontrola byl u slámy pšenice obsah fosforu ve většině nižší než pro ostatní varianty hnojení, pouze u stanoviště Hněvčevs byl obsah fosforu nejnižší pro variantu N. Tlustoš et al. (2017) ve své práci uvedl hodnoty obsahů fosforu ve slámě pšenice pro nehnojenou kontrolní variantu v intervalu mezi 377 – 644 mg P/kg slámy pšenice. Námi naměřené hodnoty odpovídají hodnotám naměřeným v dalších studiích. Xin et al. (2017) ve své studii uvedl hodnoty obsahu P ve slámě pšenici pro nehnojenou variantu, 0,29 g P/kg slámy pšenice, 0,29 g P/kg slámy pšenice pro variantu hnojenou pouze N a K a 0,28 g P/kg slámy pšenice pro variantu hnojenou NPK. Vyšší obsah P ve slámě pšenici, 0,39 g P/kg, byl zjištěn u varianty hnojené kompostem. Vyšší obsah P ve slámě pšenice v roce 2014 může znamenat náročnější sezónní podmínky, ale zároveň i lepší přístupnost fosforu v půdě, pokud je vyšší obsah P i v zrna. Celkový obsah P při součtu slámy a zrna pšenice byl vyšší pro všechny varianty u všech sledovaných stanovišť v roce 2014, lze tedy říci, že v roce 2014 byly vhodnější sezónní podmínky pro dozrání úrody. Tomu odpovídá i údaj z Českého statistického úřadu, kdy u pšenice ozimé byl v roce 2014 dosažen hektarový výnos 6,61 t, v roce 2013 to bylo 5,75 t (2015).

6.2 Odběr fosforu zrnem a slámou pšenice ozimé

Pro stanoviště Suchdol byl porovnáním odběrů fosforu zrnem pšenice u jednotlivých variant hnojení v roce 2013 zjištěn nejvyšší odběr P u všech sledovaných variant hnojení. Výsledky je možné porovnat na **Grafu 18**. V tomto vyjádření lze snadněji porovnat odběry u jednotlivých typů hnojení.



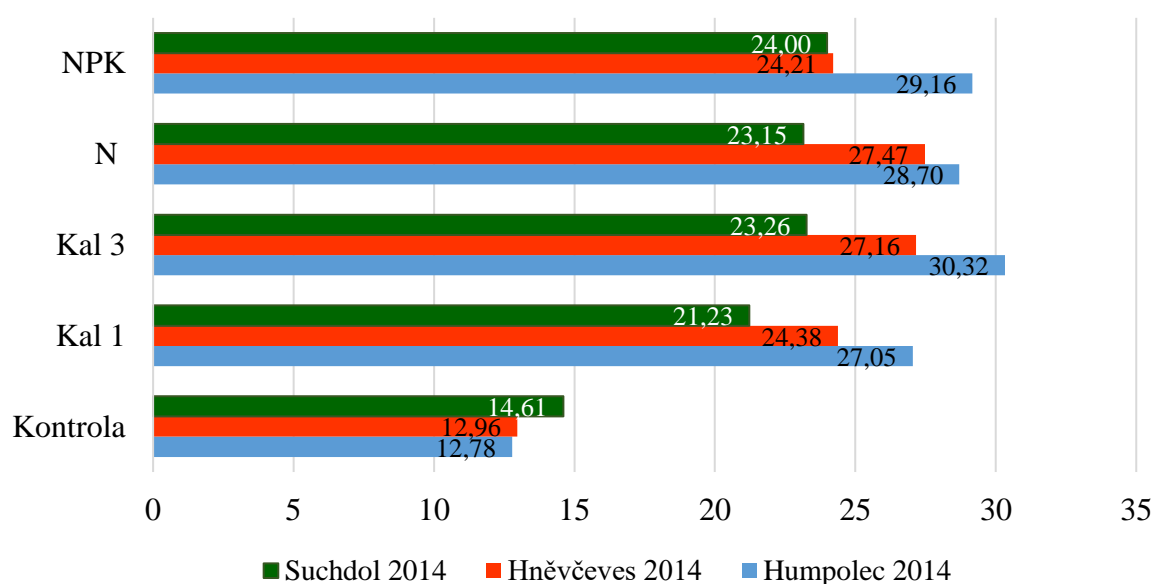
Graf 18 Odběry P [kg/ha] zrnem pšenice pro jednotlivé varianty hnojení pro rok 2013

Odběr fosforu u nehnojené varianty Kontrola naznačuje, že na stanovišti Suchdol je stále v půdě obsažen dostatek přístupného fosforu pro jeho využití a odběr rostlinami. Pokud odběr fosforu u nehnojené varianty na stanovišti Suchdol porovnáme s hodnotami odběru P na stanovišti v Humpolci, byl odběr fosforu v Humpolci o 76 % nižší. Přístup fosforu na tomto stanovišti a jeho odběr byl ovlivněn souborem různých faktorů. Stejně tak tomu bylo i hnojené varianty Kal 1, kde na stanovišti v Humpolci byl odběr fosforu o 69 % nižší. Otto et Kilian (2001) ve své studii uvádí, že nedostatek pozitivní reakce na aplikovaný P v některých letech lze připsat nízké hladině výnosu, která vyplývá z množství srážek ve vegetačním období a celkového množství ročních srážek. Nepříznivá vlhkost v kořenové zóně během vegetačního období vede k poklesu růstu a nedostatečné odezvě na použitý P.

Přístupnost fosforu je v tomto případě ovlivněna i pH půdy, která jsou rozdílná, jak je možné porovnat v **Tab. 1**, a zatímco stanoviště Suchdol má půdu neutrální až slabě zásaditou, půda v Humpolci je slabě kyselá až kyselá. Jak uvádí Zicker et al. (2018), obsah fosforu v půdě se snižuje, pokud není do půdy dodáván pravidelně hnojením, a naopak zvyšuje, pokud je hnojeno více než je potřeba pro pěstované plodiny. Dále uvádí, že přístupnost půdního fosforu je velmi závislá na pH i na celkových klimatických podmínkách v průběhu roku. Von Tucher et al. (2018) ve své práci zmiňuje, že nízké pH půdy je rozhodujícím faktorem pro

výnos a jeho závislosti na aplikaci fosforu. Rozhodující je konkrétně při nízkých úrovních půdního P. Dále ve své studii prokazuje, že příliš nízké pH půdy musí být upraveno vápněním, aby se zvýšila účinnost použití fosforečných hnojiv. Námi zjištěné hodnoty odběru P v roce 2013 u stanovišť Hněvčeves a Humpolec tyto výsledky potvrzují.

V roce 2014 byl porovnáním odběrů fosforu zrnem pšenice u jednotlivých variant hnojení zjištěn nejvyšší odběr fosforu u stanoviště Humpolec, a to ve všech variantách hnojení, s výjimkou kontrolní varianty. Výsledky je možné porovnat na **Graf 19**. V tomto vyjádření lze snadněji porovnat odběry u jednotlivých typů hnojení.



Graf 19 Odběry P [kg/ha] zrnem pšenice pro jednotlivé varianty hnojení pro rok 2014

Pro stanoviště Suchdol byly vypočteny hodnoty odběru fosforu a v obou porovnávaných letech se od sebe hodnoty odběru fosforu zrnem pšenice lišily maximálně o 5 % pro všechny varianty hnojení. Zatímco pro stanoviště Humpolec i Hněvčeves byly vypočtené hodnoty odběru fosforu v roce 2014 s rokem 2013 čtvrtinové. Tyto hodnoty souvisí se sezónními podmínkami. Velmi dobře lze toto porovnání sledovat na **Graf 12** a **Graf 13**, kde jsou porovnávány hodnoty odběru v letech 2013 a 2014.

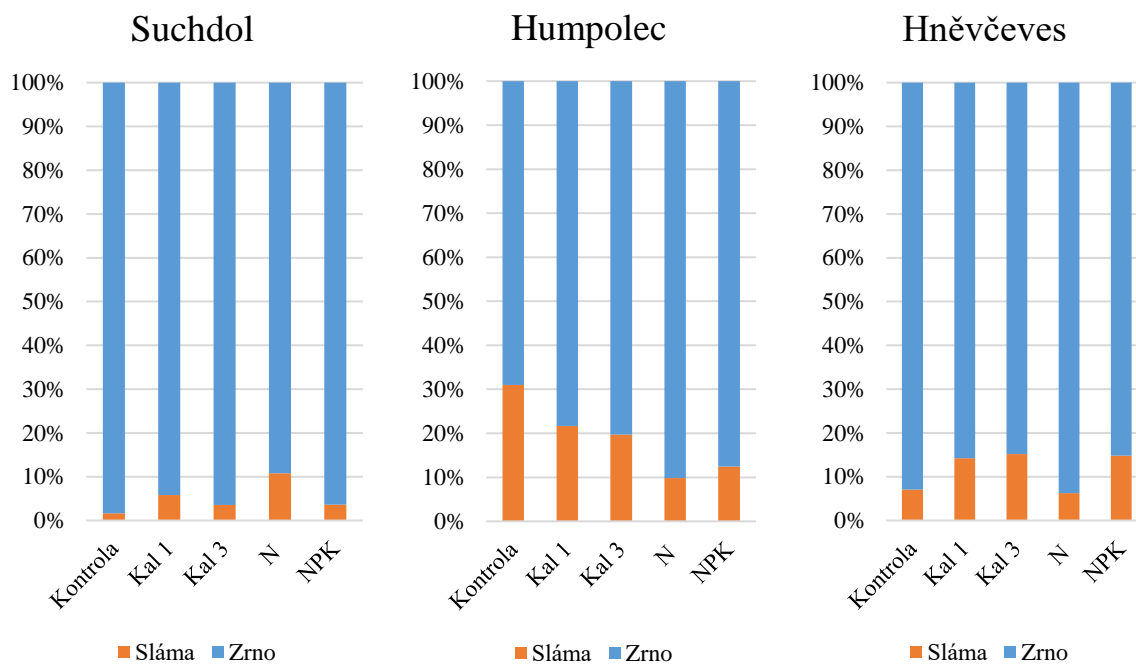
Pokud porovnáme výnosy zrna a odběr P z roku 2013 a 2014, jak je vyobrazeno na **Graf 12** a **Graf 13**, pak je možné říci, že vyšší výnosy mají v důsledku vliv na odběr P zrnem. Tyto výsledky uvádí i Rückschloss et al. (2010), který ve svém pokusu sledoval dlouhodobý vliv

hnojení na velikost výnosu. Uvádí také, že hmotnost zrna vzniká z výnosových prvků jako poslední, a proto je značně modifikovaná rovněž i sezónními podmínkami.

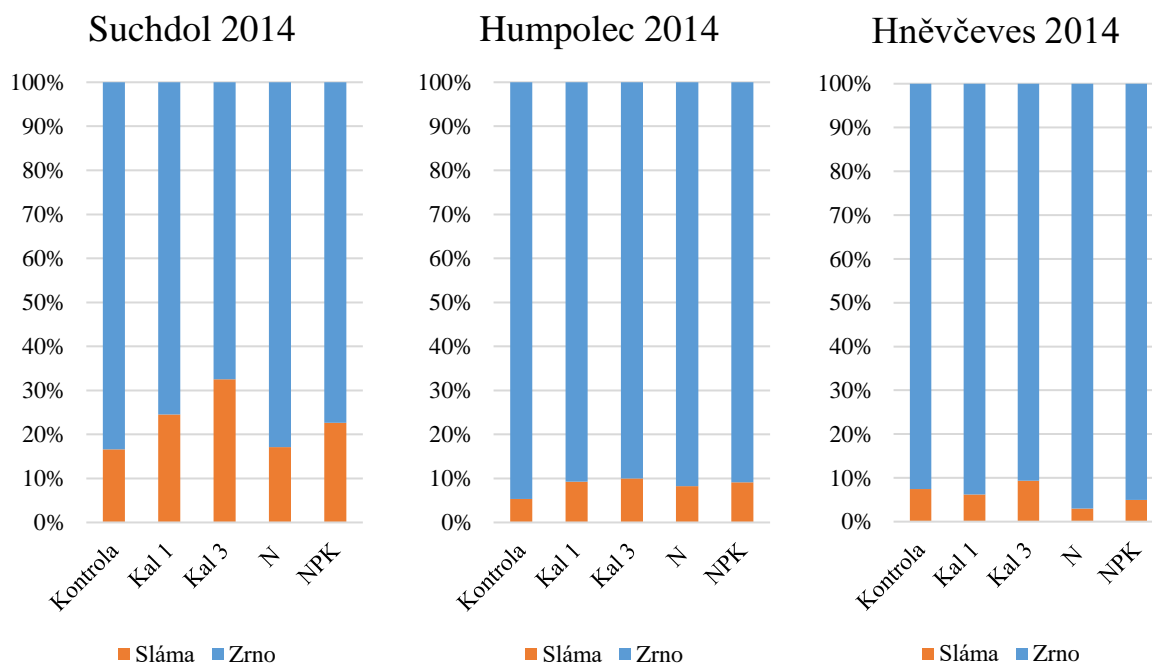
Yaseen et al., 2009 ve své studii zkoumali hodnotu odběru P zrnem pšenice při adekvátních podmínkách hnojení (120 kg N/ha, 52 kg P/ha a 50 kg K/ha) a pak stresových podmínkách hnojení (120 kg N/ha a 50 kg K/ha). Při adekvátních podmínkách hnojení byly průměrné hodnoty odběru P zrnem pšenice 9,4 – 14,1 kg/ha. Při stresových podmínkách byly průměrné hodnoty nižší a pohybovaly se od 8,1 do 12,3 kg/ha. Autor však dále upozorňuje, že rozdílnost hodnot odběru P byla při stresových podmínkách větší než při adekvátních. Dodává také, že hodnoty odběru P zrnem pšenice při adekvátních podmínkách hnojení jsou přímo závislé na výnosu zrna, avšak hodnoty odběru P zrnem pšenice při stresových podmínkách nejsou přímo závislé na výnosu zrna pšenice a pšenice může při vysokém odběru P vykazovat podprůměrné výnosy.

V **Grafu 20** je možné porovnat rozdíly mezi stanovišti a jednotlivými variantami hnojení v roce 2013. Je patrné, že velké rozdíly v odběru fosforu slámou pšenicí jsou vypočteny pro stanoviště Humpolec. Pro všechny varianty hnojení, vyjma varianty NPK, byl u tohoto stanoviště zaznamenán větší procentuální podíl odběru slámou v porovnání se stanovišti v Hněvčevsi a Suchdole. Zajímavé je, že pro stanoviště Humpolec má největší relativní odběr fosforu sláma pro variantu Kontrola. U tohoto stanoviště byl vysoký relativní odběr fosforu slámou pšenice rovněž i pro hnojené varianty Kal 1 a Kal 3, vyšší odběr fosforu slámou byl zaznamenán pro tyto dvě hnojené varianty i na stanovišti Hněvčeves. Největší podíl na odběru P má sláma u stanovišť Suchdol u té varianty, která není hnojena fosforem, a to u varianty N.

Na **Grafu 21** je možné porovnat rozdíly mezi stanovišti a jednotlivými variantami hnojení v roce 2014. Je patrné, že velké rozdíly v odběru fosforu slámou pšenicí jsou vypočteny pro stanoviště Suchdol. Pro všechny varianty hnojení byl u tohoto stanoviště zaznamenán větší procentuální podíl odběru slámou v porovnání se stanovišti v Hněvčevsi a Humpolci. Pro všechny tři stanoviště má relativně největší podíl na odběru P sláma u varianty hnojení Kal 3. Velmi malý podíl na odběru P má sláma u stanovišť Humpolec a Hněvčeves u těch variant, které nejsou hnojeny fosforem, a to u varianty Kontrola a N.



Graf 20 Porovnání odběru P slámou a zrnem pšenice [%] v roce 2013



Graf 21 Porovnání odběru P slámou a zrnem pšenice [%] v roce 2014

Jak uvádí Veneklaas et al. (2012), většina nárůstu obsahu fosforu v zrna je synchronní se snížením hodnot obsahu fosforu v listech a stoncích v monokarpických rostlinách, ačkoli může docházet k určitému zvýšení obsahu fosforu v celých rostlinách (tj. čistého odběru P) během fáze tvorby zrna. Koncentrace fosforu jsou typicky mnohem vyšší u zrna než u vegetativních částí rostliny při plné zralosti. Pokud je zvýšený obsah fosforu i ve vegetativních částech rostliny při sklizni, znamená to ovlivnění fáze tvorby zrna klimatickými podmínkami, avšak v zásadě se jedná vždy o komplex faktorů, které výnosy, a tedy i odběry fosforu ovlivňují, jak ve své práci zmiňuje Kunzová (2010).

6.3 Výnos zrna a slámy pšenice ozimé

Při nízké i vyhovující zásobě fosforu v půdě ovlivňuje aplikace fosforečných hnojiv pozitivně hmotnost sušiny, tedy výnos rostlin. Zvýšená produkce sušiny se v zásadě vždy odráží na intenzivním odběru P (až o 71 %), ale i N, K, Ca a Mg zmiňuje ve své práci Richter et al. (2006). V námi naměřených hodnotách platí při vyšším výnosu i vyšší odběr P především pro varianty hnojení Kal 1 a Kal 3.

Nedostatek P má velký vliv na výnos, jak je možné posoudit z vypočtených hodnot v této práci. Pro nehnojenou variantu Kontrola je výše výnosu nižší i o 100 % u všech tří sledovaných stanovišť. Nedostatek P vede k redukci odnožování, stébla jsou krátká a slabě vyvinutá, snižuje se počet zrna v klasu a je narušen energetický metabolismus rostlin, jak ve své práci zmiňuje Hřivna (2012).

Kępka et al. (2016) ve svém výzkumu hodnotili vliv hnojení čistírenskými kaly v množství 5,34 t sušiny/ha na výnos ječmene. Výnos zrna ječmene byl o 14,2 % vyšší v porovnání s kontrolní variantou hnojenou minerálním hnojivem NPK, výnos slámy ječmene byl vyšší o 12,9 % v porovnání s kontrolní variantou hnojenou minerálním hnojivem NPK.

Eichler-Löbermann et al. (2007) uvádí ve své studii hodnoty výnosu při hnojení minerálním hnojivem TSP (21,8 kg P/ha), hnojem a kompostem z bioodpadu. Pokus probíhal šest let, a hnojeno organickými hnojivy bylo dvakrát za tuto dobu. Hnojení minerálním hnojivem TSP probíhalo každý rok. Na kontrolní nehnojené variantě byl výnos pšenice ozimé 8,84 t/ha, varianta hnojená NPK 9,05 t/ha, varianta hnojená hnojem 9,00 t/ha a varianta hnojená kompostem 8,99 t/ha.

Mantovi et al. (2005) se ve své práci zabývali porovnáním variant hnojených čistírenským kalem a nehnojenou kontrolní variantou. Hnojení čistírenskými kaly probíhalo ročně v množství 5 t/ha sušiny. Kontrolní nehnojená varianta měla výnos zrna pšenice 5,34 t/ha a varianta hnojená kaly 6,12 t/ha. Výsledky jsou průměrem z dvanácti let po které se každoročně hnojilo čistírenským kalem.

Otto et Kilian (2001) ve své studii uvádí, že fosfor odebraný obilím souvisí s úrovní výnosu a hnojením fosforem. Obecně však obsah P v zrnu i slámě obilí vzrůstá se zvyšujícím se příjmem fosforu. Tyto závěry potvrzují i výsledky této práce.

6.4 Bilance příjmu a odběru fosforu

Bilance fosforu je vypočtena pro období odběru fosforu jednou plodinou za tři roky. Běžně se však pěstují plodiny ve tříletém cyklu, a to v pořadí brambory, pšenice, ječmen. Pokusná stanoviště jsou čistírenským kalem hnojena vždy jednou za tři roky před pěstováním brambor. Minerální hnojiva jsou aplikována každý rok.

Bilance fosforu byla vypočtena pro porovnávané varianty hnojení. Na všech stanovištích bylo hnojeno stejným množstvím čistírenského kalu i hnojivy NPK a N. U variant, kde nebyl hnojením dodán fosfor, byly vypočteny záporné bilance. Vyšší záporné bilance byly zjištěny u všech tří stanovišť u varianty hnojené pouze dusíkem, tedy varianty N. Jak uvádí Güsewell (2004) rostliny s větším deficitem fosforu v poměru N:P mají vyšší odběr fosforu, a naopak. Proto je u této varianty záporná bilance vyšší než u nehnojené kontrolní varianty. U nehnojené kontrolní varianty byly rovněž u všech stanovišť vypočteny záporné bilance fosforu.

Eichler-Löbermann et al. (2007) uvádí ve své studii hodnoty pro bilanci u nehnojené kontrolní varianty, a to -132 kg P/ha pro šestiletý pěstební cyklus. Pokud by se zjištěné výsledky v této práci (průměrná bilance pro nehnojenou variantu je -15 kg P/ha) byly vynásobeny šesti lety, bilance by vycházela - 90 kg P/ha. Avšak různé pěstované plodiny mají různé hodnoty odběru P, proto je možný rozdíl při výpočtu pouze pro odběr P pouze pšenicí.

Velmi vysoká byla hodnota bilance pro variantu Kal 3, kdy je na pole pro účely experimentu aplikováno v průměru 603 kg P/ha. Avšak jedná se o nadměrné množství fosforu, které je na pole aplikováno, neboť výnos pro tuto variantu hnojení není u všech stanovišť vyšší než výnosy u ostatních hnojených variant. Toto odpovídá i studii autorů Otto et Kilian (2001),

kde je porovnáván vliv aplikace zvýšených dávek fosforu. Výnos se však při zvýšení dávek P nezvyšoval. Porovnání možného příjmu u experimentálních dávek kalu na pole a u dávky, která je uvedena ve vyhlášce č. 437/2016 Sb., tedy 5 t čistírenského kalu na ha půdy je zobrazeno v **Tab. 5**.

Tab. 5 Porovnání možného příjmu fosforu u experimentu a dle vyhlášky č. 437/2016 Sb. pro rok 2012

	2012				
	dávka [t/ha]	sušina [%]	sušina [t/ha]	obsah P [mg/kg suš.]	dávka P [kg/ha]
Experiment Kal 3	88,5	28	24,78	26578	658,60
Experiment Kal 1	29,5	28	8,26	26578	219,53
Vyhláška č. 437/2016 Sb.	17,9	28	5,00	26578	132,89

Hodnota dávky P pro možné množství aplikovaného čistírenského kalu dle vyhlášky č. 437/2016 Sb. byla vypočtena na hodnotu 132,89 kg P/ha. To je při porovnání s variantou hnojení NPK, která za 3 roky období dodá na ha půdy 90 kg P o téměř polovinu více. Pokud bychom uvažovali možný odběr jako pro hnojenou variantu Kal 1, stále by bilance vstupu a odběru v půdě byla kladná.

Vyšší než v roce 2013 byla hodnota bilance pro variantu Kal 3, kdy je na pole pro účely experimentu aplikováno v průměru 603 kg P/ha. V roce 2013, tedy o rok dříve, než na tomto poli byla pěstována pšenice, bylo na pole u varianty Kal 3 aplikováno 920,1 kg P/ha. Toto je nadměrné množství fosforu, které je na pole aplikováno, neboť výnos pro tuto variantu hnojení není u všech stanovišť vyšší než výnosy u ostatních hnojených variant. Porovnání možného příjmu u experimentálních dávek kalu na pole a u dávky, která je uvedena ve vyhlášce č. 437/2016 Sb., tedy 5 t čistírenského kalu na ha půdy je zobrazeno v Tab. 6. Hodnota dávky P

pro možné množství aplikovaného čistírenského kalu dle vyhlášky č. 437/2016 Sb. byla vypočtena pro rok 2013 na hodnotu 164,03 kg P/ha, což je při porovnání s variantou hnojení NPK, která za 3 roky období dodá na ha půdy 90 kg P o téměř osm desetín kg P/ha více. Pokud bychom uvažovali možný odběr jako pro hnojenou variantu Kal 1 (průměrný odběr P zrnem a slámou pšenice 27,987 kg/ha), stále by bilance vstupu a odběru v půdě byla kladná, a v tomto případě i vyšší než pro rok 2013.

Tab. 6 Porovnání možného příjmu fosforu u experimentu a dle vyhlášky č. 437/2016 Sb. pro rok 2013

	2013				
	dávka [t/ha]	sušina [%]	sušina [t/ha]	obsah P [mg/kg suš.]	dávka P [kg/ha]
Experiment Kal 3	94,5	29,68	28,05	32805	920,10
Experiment Kal 1	31,5	29,68	9,35	32805	306,70
Vyhláška č. 437/2016 Sb.	16,8	29,68	5,00	32805	164,03

Výsledky v práci autorů (Otto et Kilian, 2001) naznačují, že při hnojení organickým hnojivem byl následný odběr P rostlinami vyšší než při hnojení stejným množstvím minerálního hnojiva, avšak zároveň dodávají, že rozdíly ve fyzikálně-chemických vlastnostech půdy, klimatu a dostupnosti dalších hlavních živin, mají vliv na účinnost hnojení fosforem a jeho rovnováhu v půdě. Autoři dále popisují, že písčitohlinité půdy mohou mít větší schopnost sorbovat P v orniční vrstvě ve formách, které se mohou stát dostupnými rostlinami, ale jsou snadněji vyplavovány, a také více dostupné, než u jílovitohlinitých půd. Velkou roli v přístupnosti fosforu rostlinám a jeho možného odběru hraje i množství organické hmoty v půdě, což je jedním z možných faktorů pro vyrovnanější odběr u stanoviště Suchdol. Ve studii je dále popsáno, že při hnojení organickými hnojivy se zvýší nejen přístupnost P, ale rovněž i jeho odběr

rostlinami, avšak vždy záleželo na porovnávaném stanovišti, neboť u stanoviště s písčitohlinitou půdou s nižším obsahem organické hmoty docházelo naopak k větším odběrům fosforu u varianty hnojené superfosfátem. Tyto výsledky by mohli vysvětlovat i odlišné odběry fosforu, které byly vypočteny v této práci. Selles et al. (2011) uvádí ve své práci, která se zabývá rozdílností bilancí při hnojení a nehnojení dusíkem, hodnoty obsahu fosforu v zrna pšenici od 3,4 g P/kg do 4,2 g P/kg, kdy vyšší hodnoty odpovídaly hnojeným variantám dusíkem.

7 ZÁVĚR

Z porovnání tří stanovišť vyplývá příznivý vliv hnojení čistírenskými kaly na bilanci fosforu v půdě a na zlepšení půdní úrodnosti, které lze nepřímo odvodit dle zvýšení výnosu. Aplikace čistírenských kalů má pozitivní vliv i na odběr P rostlinami.

Variety hnojení Kal 1 a Kal 3 mají v porovnání s ostatními variantami hnojení nejvyšší výslednou vypočtenou bilanci P na jednotlivých sledovaných stanovištích.

V porovnání s variantami hnojenými N a NPK mají hnojené varianty Kal 1 a Kal 3 vyrovnanější hodnoty bilance odběru P.

Obsah fosforu v pšenici je vyšší pro varianty, které jsou hnojené, u stanoviště Suchdol jsou nejvyšší u pšenice na variantách hnojených kalem (Kal 1 a Kal 3), u stanovišť v Hněvčevsi a v Humpolci byly výsledky obsahu fosforu pro různé varianty hnojení různé. Nejméně vyrovnané odběry P byly vypočteny pro hnojenou variantu N, kdy byly zároveň nejnižší a nejvyšší odběry P.

Z porovnání výnosů pšenice ozimé, odběrů P, obsahů P v znu a slámy pšenice ozimé v letech 2013 a 2014 vyplynulo, že na tyto ukazatele mají velký vliv klimatické podmínky.

Množství přijatého fosforu rostlinami, tedy obsah P v rostlinách, závisí na hodnotě pH půdy. I přesto, že obsah P v půdě je dostatečný nebo vysoký, může hodnota pH snižovat přístupnost P pro rostliny.

Vzhledem k pozitivnímu vlivu hnojení čistírenskými kaly na půdní bilanci P, je do budoucna vhodné využití tohoto typu hnojení pro zachování kvality a obsahu živin v půdách. Z důvodu klesající zásoby fosforu ve formě fosfátových hornin je vhodné využití alternativních způsobů hnojení. Mezi tyto způsoby nepatří pouze čistírenské kaly, ale například i statková hnojiva. Pro udržitelné zemědělství a zajištění potravinové bezpečnosti je dle mého názoru aplikace i těchto alternativních zdrojů do budoucna nezbytná.

8 LITERATURA

Blackshaw, R., Brandt, R., Henry Janzen, H., Entz, T. 2004. Weed species response to phosphorus fertilization. *Weed Science* [online]. 52 (3). 406-412. [cit. 2018-03-15]. DOI: 10.1614/WS-03-122R. ISSN: 0043-1745. Dostupné z: <https://www.cambridge.org/core/product/identifier/S0043174500022190/type/journal_article>

Blöcher, C., Niewersch, C., Melin, T. 2012. Phosphorus recovery from sewage sludge with a hybrid process of low pressure wet oxidation and nanofiltration. *Water Research*. 46 (6). 2009-2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.01.022>.

Borkovich, K., Ebbole, D. 2010. *Cellular and Molecular Biology of Filamentous Fungi: Acquisition of Phosphorus: Phosphorus Sources* [online]. 1st. American Society for Microbiology (ASM). Washington, DC. [cit. 2017-11-01]. ISBN: 978-1-61344-263-0. Dostupné z: <<http://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kt0092KGC1/cellular-molecular-biology/acquisition-phosphorus>>

Brady, N., Weil, R. 2008. *The nature and properties of soils*. 14th. Pearson Education, Inc. New Jersey. ISBN: 013227938X.

Brinch-Pedersen, H., Sørensen, L., Holm, P. 2002. Engineering crop plants: getting a handle on phosphate. *Trends in Plant Science* [online]. 7 (3). 118-125. [cit. 2017-11-13]. DOI: 10.1016/S1360-1385(01)02222-1. ISSN: 13601385. Dostupné z: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1360138501022221>>

Bünemann, E., Oberson, A., Liebisch, F., Keller, F., Annaheim, K., Huguenin-Elie, O., Frossard, E. 2012. Rapid microbial phosphorus immobilization dominates gross phosphorus fluxes in a grassland soil with low inorganic phosphorus availability. *Soil Biology & Biochemistry*. 51. 84-95. DOI: 10.1016/j.soilbio.2012.04.012.

Cordell, D., Drangert, J., White, S. 2009. The story of phosphorus: Global food security and food for thought: Global food security and food for thought. *Global Environmental Change*. 19. 292–305. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2008.10.009.

Council, N. 1996. *Use of Reclaimed Water and Sludge in Food Crop Production*. The National Academies Press. Washington, DC. 192 s. DOI: doi:10.17226/5175. ISBN:

9780309054799. Dostępne także z: <<https://www.nap.edu/catalog/5175/use-of-reclaimed-water-and-sludge-in-food-crop-production>>

Day, A., Thompson, R., Swingle, R. 1987. Effects of Sewage Sludge on Yield and Quality of Wheat Grain and Straw in an Arid Environment. *Desert Plants*. 8 (3). 104-144. ISSN: 0734-3434.

Disposal and recycling routes for sewage sludge: Part 2 - Regulatory report. 2001. 1. Office for Official Publications of the European Communities. Luxembourg. ISBN: 92-894-1799-4.

Dz.U. 2013 poz. 21: Ustawa z dnia 14 grudnia 2012 r. o odpadach. 2017. ISAP – Internetowy System Aktów Prawnych [online]. Strona główna Sejmu Rzeczypospolitej Polskiej. Warszawa. [cit. 2017-11-12]. Dostępne z: <<http://prawo.sejm.gov.pl/isap.nsf/DocDetails.xsp?id=WDU20130000021>>

Dz.U. 2015 poz. 257: Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 6 lutego 2015 r. w sprawie komunalnych osadów ściekowych. 2017. ISAP – Internetowy System Aktów Prawnych [online]. Strona główna Sejmu Rzeczypospolitej Polskiej. Warszawa. [cit. 2017-11-12]. Dostępne z: <<http://prawo.sejm.gov.pl/isap.nsf/DocDetails.xsp?id=WDU20150000257>>

Eichler-Löbermann, B., Köhne, S., Köppen, D. 2007. Effect of organic, inorganic, and combined organic and inorganic P fertilization on plant P uptake and soil P pools. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* [online]. 170 (5). 623-628. [cit. 2018-03-15]. DOI: 10.1002/jpln.200620645. ISSN: 14368730. Dostępne z: <<http://doi.wiley.com/10.1002/jpln.200620645>>

Environmental, economic and social impacts of the use of sewage sludge on land: Consultation Report on Options and Impacts, Report by RPA, Milieu Ltd and WRc for the European Commission. 2009. 4.

Frossard, E., Sinaj, S., Zhang, L., Morel, J. 1996. The Fate of Sludge Phosphorus in Soil-Plant Systems. *Soil Science Society of America Journal* [online]. 60 (4). 1248-. [cit. 2017-11-15]. DOI: 10.2136/sssaj1996.03615995006000040041x. ISSN: 0361-5995. Dostępne z: <<https://www.soils.org/publications/sssaj/abstracts/60/4/SS0600041248>>

Fytli, D., Zabaniotou, A. 2008. Utilization of sewage sludge in EU application of old and new methods—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 12 (1). 116-140. DOI: 10.1016/j.rser.2006.05.014. ISSN: 13640321. Dostępne także z: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032106000827>>

- Gichangi, E., Mnkeni, P., Brookes, P. 2009. Effects of goat manure and inorganic phosphate addition on soil inorganic and microbial biomass phosphorus fractions under laboratory incubation conditions. *Soil Science and Plant Nutrition*. 55. 764–771. DOI: 10.1111/j.1747-0765.2009.00415.x.
- Halecki, W., Gašiorek, M. 2015. Seasonal variability of microbial biomass phosphorus in urban soils. *Science of The Total Environment*. 502. 42-47. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.09.009>.
- Hamner, K., Weih, M., Eriksson, J., Kirchmann, H. 2017. Influence of nitrogen supply on macro- and micronutrient accumulation during growth of winter wheat. *Field Crops Research* [online]. 213. 118-129. [cit. 2018-03-15]. DOI: 10.1016/j.fcr.2017.08.002. ISSN: 03784290. Dostupné z: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378429017304008>>
- Hanserud, O., Brod, E., Øgaard, A., Müller, D., Brattebø, H. 2016. A multi-regional soil phosphorus balance for exploring secondary fertilizer potential: the case of Norway. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* [online]. 104 (3). 307-320. [cit. 2017-11-14]. DOI: 10.1007/s10705-015-9721-6. ISSN: 1385-1314. Dostupné z: <<http://link.springer.com/10.1007/s10705-015-9721-6>>
- Haygarth, P., Bardgett, R., Condon, L. 2013. Nitrogen and phosphorus cycles and their management. *Soil Conditions and Plant Growth*. Blackwell Publishing Ltd. 132–159. DOI: 10.1002/9781118337295. ISBN: 9781405197700.
- Hřivna, L. b.r. Výživa a hnojení porostů pšenice ozimé a kvalita produkce.
- Cheesman, A., Turner, B., Reddy, K. 2014. Forms of organic phosphorus in wetland soils. *Biogeosciences*. 11. 6697-6710. DOI: 10.5194/bg-11-6697-2014.
- Keřka, W., Antonkiewicz, J., Jasiewicz, C., Gambuř, F., Witkiewicz, R. 2016. The effect of municipal sewage sludge on the chemical composition of spring barley. *Soil Science Annual*. 67 (3). -. DOI: 10.1515/ssa-2016-0015. ISSN: 2300-4975. Dostupné také z: <<https://www.degruyter.com/view/j/ssa.2016.67.issue-3/ssa-2016-0015/ssa-2016-0015.xml>>
- Kim, B., Gautier, M., Simidoff, A., Sanglar, C., Chatain, V., Michel, P., Gourdon, R. 2016. PH and Eh effects on phosphorus fate in constructed wetland's sludge surface deposit. *Journal of Environmental Management*. 183 (1). 175-181. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/jan.2016.08.064>.

- Kruse, J., Abraham, M., Amelung, W., Baum, C., Bol, R., Kühn, O., Lewandowski, H., Niederberger, J., Oelmann, Y., Rieger, C., Santner, J., Siebers, M., Siebers, N., Spohn, M., Vestergren, J., Vogts, A., Leinweber, P. 2015. Innovative methods in soil phosphorus research: A review: A review. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 178. 43-88. DOI: 0.1002/jpln.201400327.
- Mbagwu, J., Piccolo, A., Spallacci, P. 1991. Effects of Field Applications of Organic Wastes from Different Sources on Chemical, Rheological and Structural Properties of Some Italian Surface Soils. *Bioresource Technology.* 37. 71-78.
- McLaughlin, M. 1984. Land application of sewage sludge: Phosphorus considerations. *South African Journal of Plant and Soil* [online]. 1 (1). 21-29. [cit. 2017-11-14]. DOI: 10.1080/02571862.1984.10634104. ISSN: 0257-1862. Dostupné z: <<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/02571862.1984.10634104>>
- Melese, A., Gebrekidan, H., Yli-Halla, M., Yitaferu, B. 2015. Phosphorus Status, Inorganic Phosphorus Forms, and Other Physicochemical Properties of Acid Soils of Farta District, Northwestern Highlands of Ethiopia. *Applied and Environmental Soil Science.* 2015. 1-11. DOI: [dx.doi.org/10.1155/2015/748390](https://doi.org/10.1155/2015/748390).
- Menezes-Blackburn, D., Zhang, H., Stutter, M., Giles, C., Darch, T., George, T., Shand, C., Lumsdon, D., Blackwell, M., Wearing, C., Cooper, P., Wendler, R., Brown, L., Haygarth, P. 2016. A Holistic Approach to Understanding the Desorption of Phosphorus in Soils. *Environ. Sci. Technol.* 50. 33713381. DOI: 10.1021/acs.est.5b05395.
- Nash, D., Haygarth, P., Turner, B., Condon, L., McDowell, R., Richardson, A., Watkins, M., Heaven, M. 2014. Using organic phosphorus to sustain pasture productivity: A perspective: A perspective. *Geoderma.* 221-222. 11-19. DOI: doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.12.004.
- NĚMECKO. 2017. Verordnung zur Neuordnung der Klärschlammverwertung. In: Bundesgesetzblatt. Bundesanzeiger Verlag GmbH. Köln. ročník 2017. částka 65. BGBl. I S. 3465. Dostupné také z: <https://www.bgbl.de/xaver/bgbl/text.xav?SID=&tf=xaver.component.Text_0&toctf=&qmf=&hlf=xaver.component.Hitlist_0&bk=bgbl&start=%2F%2F*%5B%40node_id%3D%27263520%27%5D&skin=pdf&tlevel=-2&nohist=1>

Neset, T., Cordell, D. 2012. Global phosphorus scarcity: identifying synergies for a sustainable future: identifying synergies for a sustainable future. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 92 (1). 2-6. DOI: 10.1002/jsfa.4650.

Ociepa, E., Mrowiec, M., Lach, J. 2017. Influence of fertilisation with sewage sludge-derived preparation on selected soil properties and prairie cordgrass yield. *Environmental Research*. 156. 775–780.

Oliva, J., Bernhardt, A., Reisinger, H., Domenig, M., Krammer, H. 2009. Klärschlamm: Materialien zur Abfallwirtschaft [online]. In: . Umweltbundesamt GmbH. Klagenfurt. s. 37 - 49. [cit. 2017-11-13]. ISBN: 978-3-99004-019-5.

Otto, W., Kilian, W. 2001. Response of soil phosphorus content, growth and yield of wheat to long-term phosphorus fertilization in a conventional cropping system. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* [online]. 61 (3). 283-292. [cit. 2018-03-11]. DOI: 10.1023/A:1013725207016. ISSN: 13851314. Dostupné z: <<http://link.springer.com/10.1023/A:1013725207016>>

Plassard, C., Louche, J., Ali, M., Duchemin, M., Legname, E., Cloutier-Hurteau, B. 2011. Diversity in phosphorus mobilisation and uptake in ectomycorrhizal fungi. *Annals of Forest Science*. 68 (1). 33-43. DOI: 10.1007/s13595-010-0005-7.

RAKOUSKO. 2002. Abfallwirtschaftsgesetz 2002: Bundesgesetz über eine nachhaltige Abfallwirtschaft (Abfallwirtschaftsgesetz 2002). In: . Právní informační systém Republiky Rakousko. Wien. ročník 2017. číslo 102. Dostupné také z: <<http://www.ris.bka.gv.at/Dokumente/Bundesnormen/NOR40075964/NOR40075964.html>>

Richter, R., Škarpa, P., Lošák, T. 2006. Vliv hnojení fosforem na výnos semene máku a kvalitní makoviny. In: Sborník z konference "Prosperující olejnin". s. 92-95.

Rückschloss, L., Hanková, A., Matúšková, K. 2010. Vplyv výživy na úrodu zrna pšenice letnej f. ozimnej ve stacionárnom pokuse. In: Sekerková, Mária, Ľubica Malovcová a Mária Babulicová. Pestovateľské technológie a ich význam pre prax. Centrum výskumu rastlinnej výroby Piešťany. Piešťany. s. 149 - 152. ISBN: 978-80-89417-24-7.

Sattari, S., Bouwman, A., Giller, K., Ittersum, M. 2012. Residual soil phosphorus as the missing piece in the global phosphorus crisis puzzle. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 109 (16). 6348–6353. DOI: 10.1073/pnas.1113675109.

- Selles, F., Campbell, C., Zentner, R., Curtin, D., James, D., Basnyat, P. 2011. Phosphorus use efficiency and long-term trends in soil available phosphorus in wheat production systems with and without nitrogen fertilizer. *Canadian Journal of Soil Science* [online]. 91 (1). 39-52. [cit. 2018-03-10]. DOI: 10.4141/cjss10049. ISSN: 0008-4271. Dostupné z: <<http://www.nrcresearchpress.com/doi/10.4141/cjss10049>>
- Sharma, N., Starnes, D., Sahi, S. 2007. Phytoextraction of excess soil phosphorus. *Environmental Pollution*. 146. 120-127. DOI: 10.1016/j.envpol.2006.06.006.
- Schachtman, D., Reid, R., Ayling, S. 1998. Phosphorus Uptake by Plants: From Soil to Cell: From Soil to Cell. *Plant Physiology*. 116 (2). 447-453. DOI: <http://dx.doi.org/10.1104/pp.116.2.447>.
- Schjonning, P., Elmholt, S., Christensen, B. 2004. *Managing Soil Quality* [online]. CABI. 352 s.. [cit. 2017-08-20]. ISBN: 9780851998503.
- Schoumans, O., Bouraoui, F., Kabbe, C., Oenema, O., van Dijk, K. 2015. Phosphorus management in Europe in a changing world. *AMBIO* [online]. 44 (2). 180-192. [cit. 2017-11-14]. DOI: 10.1007/s13280-014-0613-9. ISSN: 0044-7447. Dostupné z: <<http://link.springer.com/10.1007/s13280-014-0613-9>>
- Singh, R., Agrawal, M. 2008. Potential benefits and risks of land application of sewage sludge. *Waste Management*. 28 (2). 347-358. DOI: 10.1016/j.wasman.2006.12.010. ISSN: 0956053x. Dostupné také z: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0956053X07000141>>
- SLOVENSKO. 2017. Zákon č. 188/2003 Z. z.: Zákon o aplikácii čistiarenskeho kalu a dnových sedimentov do pôdy a o doplnení zákona č. 223/2001 Z. z. o odpadoch a o zmene a doplnení niektorých zákonov v znení neskorších predpisov. In: Zbierka zákonov. Wolters Kluwer s. r. o. ročník 2003. časťka 91. číslo 188. Dostupné také z: <<http://www.noveaspi.sk/products/lawText/1/55816/1/2>>
- Stevenson, F., Cole, M. 1999. *Cycles of Soils: Carbon, Nitrogen, Phosphorus, Sulfur, Micronutrients: Carbon, Nitrogen, Phosphorus, Sulfur, Micronutrients*. 2nd. John Wiley & Sons. 448 s. ISBN: 9780471320715.
- Stigter, K., Plaxton, W. 2015. Molecular Mechanisms of Phosphorus Metabolism and Transport during Leaf Senescence. *Plants* [online]. 4 (4). 773-798. [cit. 2017-11-05]. DOI:

10.3390/plants4040773. ISSN: 2223-7747. Dostupné z: <<http://www.mdpi.com/2223-7747/4/4/773>>

Sun, H., Wu, Y., Yu, D., Zhou, J. 2008. Altitudinal Gradient of Microbial Biomass Phosphorus and Its Relationship with Microbial Biomass Carbon, Nitrogen, and Rhizosphere Soil Phosphorus on the Eastern Slope of Gongga Mountain, SW China. PLOS ONE. 8 (9). 1-10.

Šyc, M., Kameníková, P., Kruml, M., Sobek, J., Pohořelý, M., Svoboda, K., Punčochář, M. 2015. Možnosti recyklace fosforu z čistírenských kalů. In: Odpadové fórum 2015. Hustopeče u Brna. ISBN: 9788085990263.

Turner, B., Frossard, E., Baldwin, D. 2005. Organic Phosphorus in the Environment. CABI. 414 s. ISBN: 9780851998220.

Turner, B., Richardson, A., Mullaney, E. 2006. Inositol Phosphates [online]. CABI. 300 s.. [cit. 2017-08-20]. ISBN: 9781845931537.

Turner, B., Cade-Menunb, B., Condronc, L., Newmand, S. 2005. Extraction of soil organic phosphorus. Talanta. 66. 294–306. DOI: 10.1016/j.talanta.2004.11.012.

Vance, C. 2011. Phosphorus as a Critical Macronutrient. Hawkesford, Malcolm J. (ed.) a Peter Barraclough (ed.), Malcolm Hawkesford, Peter Barraclough. The Molecular and Physiological Basis of Nutrient Use Efficiency in Crops [online]. Wiley-Blackwell. Oxford, UK. s. 227-264. [cit. 2017-11-05]. DOI: 10.1002/9780470960707.ch12. ISBN: 9780470960707. Dostupné z: <<http://doi.wiley.com/10.1002/9780470960707.ch12>>

Vašák, F. 2016. Bilance fosforu a draslíku při různých systémech hnojení. Doktorská disertační práce. Praha. Česká zemědělská univerzita.

Veneklaas, E., Lambers, H., Bragg, J., Finnegan, P., Lovelock, C., Plaxton, W., Price, C., Scheible, W., Shane, M., White, P., Raven, J. 2012. Opportunities for improving phosphorus-use efficiency in crop plants. New Phytologist [online]. 195 (2). 306-320. [cit. 2018-03-11]. DOI: 10.1111/j.1469-8137.2012.04190.x. ISSN: 0028646X. Dostupné z: <<http://doi.wiley.com/10.1111/j.1469-8137.2012.04190.x>>

Vogel, T., Nelles, M., Eichler-Löbermann, B. 2015. Phosphorus application with recycled products from municipal waste water to different crop species. Ecological Engineering. 83. 466-475. DOI: doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.06.044.

von Tucher, S., Hörndl, D., Schmidhalter, U. 2018. Interaction of soil pH and phosphorus efficacy: Long-term effects of P fertilizer and lime applications on wheat, barley, and sugar beet. *Ambio* [online]. 47 (1). 41-49. [cit. 2018-03-11]. DOI: 10.1007/s13280-017-0970-2. ISSN: 0044-7447. Dostupné z: <<http://link.springer.com/10.1007/s13280-017-0970-2>>

Vyhláška č. 377/2013 Sb. o skladování a způsobu používání hnojiv. 2013. In: Sbíрка zákonů. MORAVIAPRESS, a.s. částka 149.

Xin, X., Qin, S., Zhang, J., Zhu, A., Yang, W., Zhang, X. 2017. Yield, phosphorus use efficiency and balance response to substituting long-term chemical fertilizer use with organic manure in a wheat-maize system. *Field Crops Research* [online]. 208. 27-33. [cit. 2018-03-15]. DOI: 10.1016/j.fcr.2017.03.011. ISSN: 03784290. Dostupné z: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378429017301053>>

Yaseen, M., Malhi, S. 2009. Variation in Yield, Phosphorus Uptake, and Physiological Efficiency of Wheat Genotypes at Adequate and Stress Phosphorus Levels in Soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* [online]. 40 (19-20). 3104-3120. [cit. 2018-03-15]. DOI: 10.1080/00103620903261643. ISSN: 0010-3624. Dostupné z: <<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00103620903261643>>

Zákon č. 156/1998 Sb., o hnojivech, pomocných půdních látkách, pomocných rostlinných přípravcích a substrátech a o agrochemickém zkoušení zemědělských půd. 1998. In: Sbíрка zákonů. MORAVIAPRESS, a.s. ročník 1998. částka 54. číslo 156.

Zákon č. 185/2001 Sb., o odpadech a o změně některých dalších zákonů. 2001. In: Sbíрка zákonů. MORAVIAPRESS, a.s. ročník 2001. částka 71.

Zemědělství 2014. 2015. Ministerstvo zemědělství České republiky. Praha. 2014. ISBN: 978-80-7434-219-6.