

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů

Katedra agroenvironmentální chemie a výživy rostlin



**Čistírenské kaly jako zdroj přístupného fosforu pro jarní
ječnem**

Diplomová práce

Autor práce: Bc. Zuzana Jablonická

Obor studia: Technologie zpracování a využití odpadů

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

© 2018 ČZU v Praze

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na tému čistírenské kaly jako zdroj přístupného fosforu pro jarní ječnem zpracovala samostatně pod vedením Ing. Martina Kulhánka, Ph. D., a že jsem uvedla všechny použité publikace a literárne prameny, z kterých jsem čerpala potřebné informace. Dále prohlašuji, že mi byl udělen souhlas s psáním práce v slovenštině, a proto byl souhrn v češtině rozšířen. Souhlasím, aby byla moje diplomová práce zveřejněná v suladě s §47b podle zákona 111/1998 Sb., o vysokých školách v platném znění, a uložena v knihovně České zemědělské univerzity, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Praze dne 13.4.2018

.....

Bc. Zuzana Jablonická

Poděkování

Touhle cestou bych chtěla srděčně poděkovat hlavně mojmu vedúcemu diplomovej práce Ing. Martinovi Kulhánkovi Ph. D., za odborné vedení a poskytnutí vlastných archivních dat, které mi pomohli líp popsát problematiku témy. Velký vděk je také za ochotu ke konzultacím, za cenné připomínky a inspirativní rady, pomocí kterých jsem se vždy mohla posunout dál. V neposlední řadě můj vděk patří také mojí rodině, která mi poskytla vhodné podmínky ke studiu a za jejich nikdy nekončící podporu a víru ve mně.

V Praze dne 13.4.2018

.....

Bc. Zuzana Jablonická

Čistírenské kaly jako zdroj přístupného fosforu pro jarní ječnem

Souhrn

Hlavním objektem zkoumání této diplomové práce jsou čistírenské kaly a jejich přínos fosforu do půdy, jako alternativní hnojivo pro ječmen jarní. Cílem práce je analyzovat vliv dlouhodobé aplikace čistírenského kalu na obsah okamžitě a potenciálně přístupných forem fosforu v půdě. Následně jsou sledovány vztahy mezi biologicky dostupným fosforem v půdě a výnosem jarního ječmene.

Fosfor patřící mezi základní biogenní prvky je ze všech nejméně hojný. Hlavní zásobník představují horniny a oceánské sedimenty v zemské kůře, kde je obsaženo asi 10^{15} kg fosforu. Z tohoto množství je přibližně jenom 0,1% (1012 kg) zapojeno do globálního cyklu fosforu na Zemi. Agronomicky nejvýznamnějším přirozeným zdrojem fosforu v půdě je minerál apatit, který se vyskytuje ve všech magmatických horninách rozptýlený v různých formách (fluor-, chlor-, hydroxylapatit). Dále známe a využívané minerály jsou pyromorfit, wavellit a vivianit. Intenzivní těžba přírodních surových fosfátů k produkci minerálních hnojiv vede nevyhnutelně k postupnému vyčerpání jejich světových nalezišť.

Další významná část celkového P představuje fosfor organicky vázaný, protože se vyskytuje ve všech živých organizmech. Ve většině půd připadá na fosfor vázaný organicky kolem 30 - 50 % celkového fosforu v půdě, avšak může to být i méně než 5 % a více než 90 %. Zdrojem organických sloučenin fosforu v půdě jsou zejména odumřelé buňky a zbytky mikroorganismů, rostlin i půdních živočichů, dále kořenové exsudáty a další látky uvolňované organismy do půdy. Fosfor je složkou důležitých organických molekul jako DNA a RNA, energetických přenašečů (ADP, ATP) a také je součástí buněčné membrány ve fosfolipidech, z čeho je patrné, že je nenahraditelným elementem veškerého života na Zemi. Vzduch a voda v přirozeném stavu obsahují velice málo fosforu. Ve srovnání s jinými živinami dusíkem nebo draslíkem je fosforu v půdě také jen velmi malé množství, a to většinou ve formách nedostupných pro rostliny a organismy. Proto se fosfor často stává limitujícím prvkem při výživě a růstu rostlin.

Rostlinami je fosfor přijímán, stejně jako ostatní minerální látky, z vody, a to ve formě aniontu H_2PO_4^- a jeho příjem je energeticky velmi náročný. Opatřit rostlinám dostatečnou výživu fosforem znamená zajistit hnojařským opatřením vysokou hladinu fosforu v půdě právě ve formě rostlinám přístupné. Fosfor vnesený do půdy ve formě minerálních hnojiv značnou měrou (v některých případech až z 90 %) podléhá fixaci, resp. přeměně na obtížně rozpustné a rostlinám málo dostupné (až prakticky nedostupné) formy fosfátů. To je způsobené imobilizací, tj. přechod do termodynamicky stabilnějších forem v důsledku krystalizačních, dehydratačních a aglomeračních procesů v půdě. Při porovnání koeficientů využití jednotlivých makrobiogenních prvků (dusík 40 – 90 %, draslík 45 – 70 %) dosahuje fosfor se svými 10 – 25 % jen zlomku využitelnosti ostatních živin. Cílevědomá regulace přeměn fosforu v půdě má přímý vliv na zefektivnění fosforečného hnojení. Fosforečné ionty přicházející hnojením do půdy se fixují především účinkem půdních kationtů, takže dochází ke změnám tzv. frakčního složení půdního fosforu. Jde o změny vzájemného poměru Al-fosfátů, Ca-fosfátů, Fe-fosfátů – v závislosti na půdních faktorech a taktéž na typu i dávce hnojiva. Transformační procesy jsou kromě toho výsledkem působení půdní reakce, typu a podílu jílových minerálů, množství a kvality půdní organické hmoty, stavu nasycení půdního sorpčního komplexu dvojmocnými kationty, přítomnosti uhličitánů a dalších faktorů. Na zvýšení účinnosti byl prokázán v řadě prací velice příznivý účinek vápnění kyselé půdy. Úpravou půdní reakce je možné dosáhnout příznivého ovlivnění způsobu vazby fosforu v půdě. V kyselé oblasti je aktivita iontů železa a hliníku vysoká a také i jejich adsorpce na jílech intenzivní, co způsobuje fixaci a omezení příjmu fosforu pro rostliny. Naopak v oblasti neutrální půdní reakce se nachází maximum rozpustnosti Ca – fosfátů, ze kterých se za vhodných podmínek může fosfor uvolnit, a tím se stát přístupný pro rostliny.

V cyklu fosforu mají významnou úlohu půdní mikroorganismy. Podstatně se podílejí na solubilizaci (rozpuštění) anorganických sloučenin P a na mineralizaci (rozkladu) organických sloučenin. Vzhledem k poměrně rychlým životním cyklům půdních mikroorganismů, kterých může být až několik desítek za rok, se po odumření mikrobiálních buněk relativně mnoho fosforu průběžně uvolňuje a tento fosfor může být přijat rostlinami. Doplnění zásoby rozpuštěného P probíhá v zásadě ze dvou hlavních zásobníků: z organicky vázaného P a z minerálních sloučenin P. Tyto přesuny zahrnují jak biologické procesy, tak fyzikálně-chemické děje, avšak podíl mikroorganismů často převažuje. Rozpuštění anorganických sloučenin fosforu a uvolňování P do půdního roztoku ovlivňují kromě půdních mikroorganismů i kořeny rostlin. Základní enzymy zajišťující rozklad organických fosforečných látek jsou fytasy a fosfatasy. Některé fosfatasy jsou extracelulární - jsou uvolňovány kořeny rostlin a

mikroorganismy do půdního prostředí, kde potom probíhá jimi zprostředkovaná mineralizace organických sloučenin.

Aplikace kalů z čistíren odpadních vod na zemědělské půdě je tradiční technologií, jak zlepšovat kvalitu půdy. V naší zemi se tak dělo již od počátku minulého století, a také v současné době postupně roste zájem zemědělců o hygienizované kaly, které lze ukládat na zemědělskou půdu. Kal je podle základní definice suspenze nerozpuštěných látek ve vodě. Jedná se o bohatý zdroj organické hmoty, základních živin i stopových prvků. Obsah přístupných živin je významný, ale značně variabilní mezi jednotlivými ČOV. Aplikace kalu do půdy vede ke zlepšení půdní úrodnosti, čím je možné částečná náhrada za stále snižující se produkci statkových hnojiv. Dále se jejich použití na půdu vyznačuje zlepšením fyzikálních, chemických a biologických vlastností půd. Zvyšují vododržnost půd, retenční kapacitu, agregaci půdních částic a také zvýšení aerace, a snížení eroze. Organické látky obsažené v čistírenských kálech podléhají rychleji rozkladu po jejich aplikaci do půdy v porovnání s hnojem, čím jsou živiny v nich obsáhlé přístupnější pro rostliny.

Celkový výživný potenciál půdy, pokud jde o fosfor, je dán obsahem tzv. přijatelných (labilních) forem P. Pro bezprostřední příjem této živiny rostlinami je však rozhodující momentální koncentrace fosforečnanových iontů v půdním roztoku. V převážné většině případů je koncentrace P v půdním roztoku velmi nízká, zpravidla se pohybuje v rozmezí od 0,02 do 0,2 mg P na litr. Rostlina je tudíž odkázána na neustálé doplňování půdního roztoku v aktivní kořenové zóně fosfátovými ionty. Jestliže je fosfor z roztoku odčerpán rostlinami, musí být doplněn z tuhé fáze labilním P. Obsah fosforu v půdním roztoku je potřeba doplňovat co nejrychleji, aby jeho nedostatek neomezoval výživu rostlin.

V této práci zkoumaný jarní ječmen reaguje v porovnání s jinými obilovinami nejcitlivěji na hnojení, což souvisí se mělce rozloženým kořenovým systémem, který si vyžaduje dostatek pohotových živin v půdě. Takto málo aktivní kořenový systém je důvodem, že ječmen velmi závisí i na klimatických podmínkách okolí. Zásadou pro úspěšné pěstování ječmene je vyváženost veškerých vstupů a jejich přísun v optimálním množství. Kratší vegetační období (110 – 125 dní) je doba za kdy musí přijmout poměrně velké množství živin, aby dosáhl požadované kvality a výnosu. Fosfor zkracuje dobu zrání, ovlivňuje zdravotní stav rostlin, zvyšuje odolnost proti poléhání, zlepšuje sladovnickou kvalitu zrna, působí příznivě na obsah škrobu a extraktu, zvyšuje podíl předního zrna a ovlivňuje klíčivost obilek. Ječmen si vyžaduje zvýšenou potřebu fosforu již v raných fázích růstu a na začátku odnožování, kdy fosfor zabezpečuje intenzivnější dýchání. Při nedostatku fosforu v období počátečního růstu se vytváří nevhodný poměr mezi N a P v nadzemní části rostliny a přijatý N nemůže rostlina

hospodárně využít. Největší nárok na živiny má však ve fázi sloupkování - období velké periody růstu, kdy ječmen přijímá až 46 % fosforu. Protože ječmen poměrně slabě resorbuje kyselinu fosforečnou, je potřebné, aby byla ve své nejpřístupnější formě.

Hlavním cílem zkoumání této diplomové práce jsou čistírenské kaly a jejich přínos fosforu do půdy. Cílem práce je analyzovat vliv dlouhodobé aplikace čistírenského kalu na obsah okamžitě a potenciálně přístupných forem fosforu v půdě. Následně jsou sledovány vztahy mezi biologicky dostupným fosforem v půdě a výnosem jarního ječmene.

Přístupná forma fosforu pro rostliny je v práci analyzována dvěma extrakčními metodami - vodným výluhem a metodou Mehlich 3, které byly navzájem porovnané pomocí korelační a regresní analýzy. Maloparcelkový přesný polní pokus byl založen na pokusných stanicích ČZU a VÚRV v.v.i. Ruzyně v roce 1996. Jako hlavní hodnocení jsou sledovány časové řady, tj. vývoj obsahů přístupného fosforu od založení pokusu po rok 2017. Na parcelách (1 varianta – 60 m²) byly pěstovány v tříhonném osevním sledu tyto plodiny: brambory, ozimá pšenice a jarní ječmen. V pokusech byli porovnávány tři varianty hnojení, s nehnojenou kontrolní variantou. Jako zdroje přístupného fosforu byly testovány čistírenské kaly, hnůj a minerální hnojivo NPK. Po každé sklizni pokusů jsou vždy zaznamenány hektarové výnosy pěstovaných plodin.

Čistírenské kaly byly v práci vyhodnoceny jako nejlepší zdroj přístupného fosforu v půdě. Tyto výsledky byly potvrzeny na všech zkoumaných lokalitách, za pomoci obou extrakčních metod, jejichž výsledky těsně vzájemně korelovaly. Lokalita Hněvčeves vykazovala po aplikaci kalu největší obsahy přístupného fosforu v půdě, jako i nejvyšší průměrné výnosy ječmene jarního v porovnání s ostatními sledovanými lokalitami. Avšak po aplikaci minerálního hnojiva NPK bylo dosaženo celkově největšího výnosu od nehnojené kontroly. Nižších průměrných výnosů ve srovnání s kaly bylo dosaženo po aplikaci hnoje, čímž bylo dokázáno, že čistírenské kaly jsou za tohoto hlediska lepším hnojivem.

Klíčové slová: čistírenské kaly, fosfor, půda, hnojení, ječmen jarní

Sewage sludge as a source of bioavailable phosphorus for summer barley

Summary

Phosphorus (P) is one of the most important nutrient element limiting agricultural production in the most regions of the world. It is extremely chemically reactive, and in all its natural forms, including organic forms, P is very stable or insoluble. Only a very small proportion exists in the soil solution, from where phosphorous is available for plants as a nutrition.

The main aim of this thesis was to evaluate the influence of long-term application of sewage sludge into the soil as a fertilizer for spring barley, focused on the changes of bioavailable phosphorus in soil after sewage sludge application in comparison to farmyard manure, mineral NPK application and control non-fertilized treatment. Relations between bioavailable phosphorous in soil and the yield of spring barley were determined.

The experiment was established at Hněvčeves, Humpolec and Suchdol sites with different soil - climatic conditions. Three different crops were grown in rotation - potatoes, wheat and barley on small plots (60 m²). Archive soil samples from the beginning of the experiment (1996) and from the end of each year's crop rotation (1999, 2002, 2005, 2008, 2011, 2014, 2017) were analyzed. Two different extraction methods were used (the water extraction and method Mehlich 3), to investigate the effect of sewage sludge application on soil.

Even though the results of these methods were calculated in significantly different amounts of bioavailable P, strong correlations between were observed. Sewage sludge appeared to be the best source of bioavailable soil phosphorus compared to the farmyard manure and NPK on all experimental locations. Application of sewage sludge have shown positive effect on the yield of barley and the average yield was higher by 15 – 45 % than control, depending on the location. In treatments with mineral fertilizers NPK the increment of spring barley grain yield was the highest from all experimented fertilizers. No significant differences were recorded between sewage sludge and farmyard manure treatment, however the yield of barley after sewage sludge application was in average a bit higher.

Keywords: sewage sludge, phosphorous, soil, fertilizer, spring barley

Obsah

1. Úvod	1
2. Ciele práce a hypotézy	2
2.1. Ciele.....	2
2.2. Hypotézy	2
3. Literárna rešerž	3
3.1 Výskyt a kolobeh fosforu.....	3
3.1.1 Cyklus fosforu v prírode.....	3
3.1.2 Osud fosforu v pôde	4
3.2 Zložky fosforu v pôde	7
3.2.1 Minerálne formy fosforu	7
3.2.2 Organické formy fosforu	8
3.3. Fosfor v rastlinách - jeho význam a prijateľnosť	9
3.3.1 Fosfor v rastline.....	9
3.3.2 Prístupnosť fosforu pre rastliny.....	11
3.4. Zdroje fosforu	13
3.4.1 Minerálne (priemyslové) hnojivá	13
3.4.2 Organické hnojivá	15
3.4.3 Odpady - čistiarenské kaly	20
3.5 Jačmeň jarný - jeho výživa a hnojenie.....	23
3.5.1 Hnojenie jarného jačmeňa fosforom	24
4. Metodika práce	26
4.1. Charakteristika záujmových lokalít a pestovaných odrôd	26
4.2. Aplikácie hnojív	27
4.3 Odber vzoriek.....	28
4.4 Analytické stanovenia.....	29
4.5 Štatistické hodnotenie.....	30
5. Výsledky.....	31
5.1 Obsah fosforu v pôde stanovený vodným výluhom	31
5.2 Obsah fosforu v pôde stanovený metódou Mehlich 3	34
5.3 Výnos Jačmeňa jarného	39
6. Diskusia.....	43
6.1. Čistiarensky kal ako zdroj prístupného fosforu	43
6.2. Výnos jačmeňa jarného	44
7. Záver	46
8. Zoznam literatúry a použitých zdrojov	47

1. Úvod

Súčasná poľnohospodárska veľkovýroba sa nemôže obísť bez ďalšieho zvyšovania úrod všetkých dôležitých hospodárskych plodín, vzhľadom k neustálemu ubúdaniu pôdneho fondu a zvyšujúcemu sa počtu obyvateľov. Táto potreba udržania vysokých a kvalitných výnosov má však za následok stále väčší export fosforu z pôdy a je bezpodmienečne nutné starať sa o náhradu tejto živiny novými vkladmi do kolobehu živín. Fosfor (P) je považovaný za najdôležitejší živinový prvok (po dusíku), ktorý obmedzuje poľnohospodársku produkciu vo väčšine regiónov sveta. Hrá kľúčovú rolu v rastlinnom metabolizme, štruktúre i v premene energie, čím je nezastupiteľný pre rast a vývoj rastlín. Pri jeho nedostatku je obmedzená tvorba plodov a semien, čím je znížená produkcia potravy i pre nás ľudí. Práve u obilnín, ktoré sú základnou ľudskou potravinou, patriacou k najhlavnejším pestovaným plodinám na celom svete, je zrno dôležitou súčasťou pri príprave rôznych, ľahko stráviteľných pokrmov. Jačmeň (*Hordeum*) patrí k najstarším kultúrnym rastlinám pestovaným už tisícročia, využívaný na výrobu chleba a piva. Jeho krátke vegetačné obdobie si pri pestovaní vyžaduje vhodné klimatické podmienky, dostatok vody a vzduchu. Avšak k najdôležitejším intenzifikačným prvkom patrí hlavne jeho výživa a hnojenie, vyžadujúca dostatok prijateľných živín v pôde, vzhľadom na jeho slabý koreňový systém. Cieľom hnojenia je zabezpečiť dostatočne veľkú úrodu, ale aj udržanie, či ideálne zvýšenie pôdnej úrodnosti. V súčasnej dobe je zvyšujúci sa záujem v poľnohospodárstve o aplikáciu čistiarenských kalov ako výživy pre rastliny, vďaka možnosti recyklácie cenných komponentov, ako je organická hmota, fosfor, dusík a ďalšie živiny pre rastliny. Čistiarenské kaly aplikované na ornú pôdu majú z dlhodobého pohľadu priaznivý vplyv na obsah a prijateľnosť živín v pôde, obsah organických látok, tvorbu humusu a biochemických a fyzikálnych vlastností pôdy.

2. Ciele práce a hypotézy

2.1. Ciele

Cieľom tejto diplomovej práce je zhodnotenie vplyvu dlhodobej aplikácie čistiarenských kalov na poľnohospodársku pôdu. Analyzovaný je vplyv aplikácie kalu na obsah okamžite a potenciálne prístupných foriem fosforu v pôde a následné vyhodnotenie vplyvu aplikácie kalov na výnos jarného jačmeňa. V rešeržnej časti je snahou zhromaždiť čo najväčšie množstvo dostupných informácií, potrebných k bližšiemu popísaniu potreby využitia kalov, ako alternatívneho druhu hnojiva.

2.2. Hypotézy

Čistiarenské kaly sú známym zdrojom fosforu a ich aplikácia povedie k zvýšeniu obsahu pre rastliny prístupného fosforu do pôdy.

V prípade, ak je fosfor limitujúcou živinou v pôde, bude aplikácia predstavovať i zvýšenie výnosov.

Predpokladá sa zvýšený vplyv pôdne - klimatických podmienok na vyššie uvedené parametre.

3. Literárna rešerž

3.1 Výskyt a kolobeh fosforu

3.1.1 Cyklus fosforu v prírode

Fosfor (P), radený medzi základné biogénne prvky, má relatívne vysoké zastúpenie v zemskej kôre. Množstvom je to približne 10^{15} ton, čo predstavuje 0,12 hmot. %. Celkové množstvo fosforu na Zemi je odhadované rádovo na 10^{19} ton (Ivanič et al., 1984). Fosfor je jediným prvkom, ktorý bol prvý krát izolovaný a pripravený z živočíšneho materiálu roku 1669 alymistom Hennigom Brandtom. K objavu zhromažďoval, odparoval a následne destiloval zlatavú tekutinu - ľudský moč, ktorá sa po kondenzácii vyznačovala vnútorným svetlom (Aldersey - Williams, 2012). Následne bol získaný z rastlín a až o storočie neskôr bol objavený v minerály (Greenwood a Earnshaw, 1993). Bolo identifikovaných viac ako 170 fosfátových minerálov. Fosfor je extrémne chemicky reaktívny, a preto sa v prírode vyskytuje jedine v zlúčeninách. Vo všetkých svojich prírodných formách, vrátane organických foriem, je fosfor veľmi stabilný, alebo nerozpustný. Práve preto existuje len veľmi malý podiel z celkového množstva fosforu v pôdnom roztoku, odkiaľ je prístupný ako živina pre rastliny a pôdne mikroorganizmy (Holford, 1997).

Z hornín na pevnine je fosfor vyplavovaný a vytvára zásoby fosforu v pôdnej vode, riekach, jazerách, oceánoch a v morských sedimentoch. Cyklus fosforu je označovaný ako sedimentačný, pretože uvoľnený minerálny fosfor je transformovaný vodou do oceánov, kde následne dochádza k jeho akumulácií. Begon et al. (2006) uvádzajú, že v oceáne fosfor podlieha v priemere 100 obehom medzi povrchovými vodami a hĺbinou, pričom jeden obeh trvá približne 1000 rokov. Uvoľnený fosfor je v povrchovej eufotickej vrstve asimilovaný organizmami. Po odumretí týchto organizmov fosfor klesá ku dnu zabudovaný do zbytkov ich tiel. Po približne 100 takýchto obehoch, kedy je fosfor súčasťou oceánu už asi 10 miliónov rokov, sa však už neuvolní ako rozpustený, ale ostáva v sedimente na dne. Greenwood a Earnshaw (1993) tvrdia, že pohyb fosforu prostredím sa odlišuje od ostatných nekovov dôležitých pre život (H, C, O, N, S), pretože fosfor netvorí tekavé zlúčeniny. Taktiež nemá plynnú fázu, ani nevytvára stabilné plynné zlúčeniny a teda nemôže byť odparený. Atmosféra tým pádom neobsahuje žiadne zlúčeniny fosforu, jedine v podobe tuhých prachových častíc.

Pokiaľ povrchová voda neodplavila fosfor uvoľnený z hornín do vodného toku, môže vstupovať do suchozemského spoločenstva. Fosfor je extrahovaný z pôdnej vody a zabudovaný

do tiel rastlín a živočíchov. Keď sa rastlinná a živočíšna biomasa a jej odpady recyklujú a rozložia, fosfor sa navráti do pôdy (Nash et al., 2014). V biosfére môže ostať kolovať celé roky, desiatky, či dokonca stovky rokov (Townsend et al., 2010). Terestrický cyklus fosforu je v modernej dobe výrazne ovplyvnený ľudskou činnosťou. V poľnohospodárstve dominuje aplikácia minerálnych hnojív, z ktorých sa dostáva fosfor do riek vo svojej rozloženej forme, a to i viacnásobne oproti prirodzeným podmienkam (Filippelli, 2008).

3.1.2 Osud fosforu v pôde

Obsah celkového množstva fosforu v pôde sa pohybuje od 0,01 do 0,15 % (Ivanič et al., 1984). Baier a Baierová (1985) uvádzajú, že v ornici pôd Českej republiky býva obsah fosforu väčšinou nízky - približne 0,07 % P. Fosfor sa v prírode vyskytuje najčastejšie vo svojom najvyššom oxidačnom stupni, tzn. päťmocný, ako anión kyseliny ortofosforečnej PO_4^{3-} . Len v menšej miere sú základom rôznych foriem fosforu v pôde väzby kyseliny pyrofosforečnej ($\text{H}_4\text{P}_2\text{O}_7$). Väčšinová časť celkového fosforu zastúpeného v pôde je však pre rastliny neprijateľná (Vaněk et al., 2012). Anorganický ortofosforečnan prijateľný rastlinami sa vyskytuje v pôde iba v nízkych koncentráciách. Na vysokom obsahu celkového fosforu sa hlavne podieľa fosfor ako nerozpustný minerálny, alebo organický fosfor (Plassard et al., 2011). Pôdy s vyšším obsahom organickej hmoty vykazujú vyšší obsah fosforu, než ľahké pôdy s malým obsahom organickej hmoty (Vaněk et al., 2007). V pôdnom profile je rozmiestnenie fosforu ovplyvňované genézou pôd. Napríklad u černozeí je vertikálne rozloženie fosforu skoro vyrovnané. Naopak pri pôdach s vyšším stupňom vyluhovateľnosti sa najväčší podiel fosforu nachádza v iluviálnej časti a v ornici. Všeobecne platí, že v povrchových pôdach sa nachádza viac organickej hmoty, tým pádom i organofosfátov. Z toho vyplýva vyšší obsah fosforu v pôdach vo vrchnejších než spodnejších vrstvách a v pôdotvornom substráte (Ivanič et al., 1984). Molekulárne zlúčeniny pôdneho fosforu, významné ako potenciálne zdroje užitočného fosforu pre rastliny i pôdne mikroorganizmy, sú podľa Ivanič et al. (1984):

- 1) primárne fosforečné minerály - hlavne apatity
- 2) sekundárne vyzrážané a absorbované fosfáty
- 3) organické zlúčeniny fosforu
- 4) fosforečné hnojivá - zatiaľ nezreagované.

Z primárnych fosfátových minerálov sa pri zvetrávaní uvoľňujú anióny kyseliny ortofosforečnej. V dôsledku sorpčnej schopnosti pôdy prechádzajú tieto anióny do iných sekundárnych foriem, ktoré sú veľmi rozmanité. Ivanič et al. (1984) uvádzajú, že všetky premeny fosforu v pôde sú podmienené nasledujúcimi tromi druhmi sorpcie:

1) Chemická sorpcia

- vznikajú ťažko rozpustné sekundárne fosfáty pri zrážaní fosfátových iónov z pôdneho roztoku dvojmocnými a trojmocnými kationmi

2) Fyzikálne-chemická, tzv. výmenná adsorpcia

- naviazanie fosfátových iónov na povrchu ílových minerálov a iných koloidov

3) Biologická sorpcia

- imobilizácia fosforu prostredníctvom činnosti pôdných mikroorganizmov a rastlín.

Na premenu rôznych foriem organického a anorganického fosforu na ortofosfát, čo je hlavná forma P používaná rastlinami a mikróbmi, sú potrebné špecifické enzýmy fosfatázy. Je zrejmé, že aktivita tohto enzýmu je silno citlivá na hodnotu pH pôdy a vyžaduje svoje špecifické optimum (Deiss et al., 2017). Fyzikálne chemické vlastnosti a biologické činnosti pôdy majú rozhodujúcu úlohu pri rovnováhe medzi zabudovaním fosforu a jeho uvoľňovaním. Nerozpustné zlúčeniny s väzbou fosforu na Fe^{3+} a Al^{3+} , ktoré nie sú využiteľné jačmeňom, vznikajú v pôdach málo zásobených humusom, kyslých a neprevzdušnených. Naopak v pôdach s drobtovitou štruktúrou, bohatých na humus, pravidelne hnojených statkovými hnojivami, priaznivou reakciou a dobrým pomerom vzduchu a vlhkosti, prebiehajú tieto pochody smerom k uvoľňovaniu fosforu. Pre jačmeň jarný je prístupná forma uvoľneného fosforu naviazaná na Ca^{2+} (Lekeš et al., 1985).

Dynamika fosforu v pôde je charakterizovaná radou komplikovaných procesov, pri ktorých je tento prvok v pôde pútaný alebo uvoľňovaný. Pre vyjadrenie týchto procesov a stavov prístupnosti fosforu je možné použiť nasledujúce faktory (Baier, Baierová, 1985):

1) Faktor intenzity (I)

- udáva koncentráciu P v pôdnom roztoku - vyjadruje stupeň mobility pôdnych fosforečnanov

2) Faktor kapacity (Q)

- udáva celkový výživný potenciál pôdy - vyjadruje množstvo prijateľných (labilných) foriem fosforu

3) Faktor kinetiky (R)

- určuje rýchlosť prechodu fosforu z pevnej fázy do pôdneho roztoku.

Veľmi dôležitým ukazovateľom výživných podmienok je práve schopnosť pôdy dopĺňať pôdny roztok fosforom (Baier, Baierová, 1985). Obsah fosforu v pôdnom roztoku je potrebné doplniť čo najrýchlejšie, aby nebola obmedzená výživa rastlín jeho nedostatkom. Dôležitý je i pohyb fosfátových iónov v pôdnom roztoku tak, aby sa ióny živín dostali do tesnej blízkosti koreňov. Ivanič et al. (1984) uvádzajú, že existujú tri druhy pohybov, ktorými sú difúzia iónov, transport iónov hmotovým tokom vody a aktívny pohyb koreňov k živinám.

3.2 Zložky fosforu v pôde

3.2.1 Minerálne formy fosforu

Medzi typické anorganické zlúčeniny fosforu patria ortofosfáty, polyfosfáty a pyrofosfáty (Deiss et al., 2017). Baier a Baierová (1985) uvádzajú, že anorganické väzby fosforu tvoria 35 -75 %. Prítomnosť fosforu v minerály bola prvý krát objavená v roku 1779 a to v pyromorfite a fosforečnane olovnatom (Greenwood a Earnshaw, 1993). Neskôr i v apatitu, ktorý je agronomicky najvýznamnejším prírodným zdrojom fosforu v prírode. Vyskytuje sa vo všetkých magmatických horninách, rozptýlený v rôznych formách (Ivanič et al., 1984). Jedná sa o vápenaté zlúčeniny, ktoré sa skladajú z troch molekúl $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ a jednej molekuly chloridu, fluoridu či hydroxidu vápenatého. Podľa sprievodnej zlúčeniny sa odvodzuje ich názov - chlórapatit, fluórapatit atď. (Vaněk et al., 2007). Ďalšie primárne minerály nachádzajúce sa v pôdach sú tripity. Jedná sa o fosforečnany železa s prímiesou mangánu. Ďalej sú to napríklad vodnaté fosforečnany hliníka wawelity. Taktiež sa môže vyskytovať fosforečnan železnatý - vivianit $\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$, ale len v zamokrených a málo prevzdušnených pôdach (Ivanič et al., 1984).

Ďalšia minerálna forma fosforu v pôde je tvorená sekundárnymi vyzrážanými a absorbovanými fosforečnanmi (Vaněk et al., 2012). Ivanič et al. (1984) uvádzajú, že tvorba sekundárnych fosfátových minerálov závisí na stupni zvetrania pôdy, obsahu organickej substancie v pôde, ílových minerálov, CaCO_3 , výmenného vápniku a voľných oxidov železa a hliníka. Pôdna reakcia - pH zohráva značnú úlohu vo vzájomnom pomere a rovnovážnom stave jednotlivých foriem minerálnych fosforečnanov. Ivanič et al. (1984) konštatoval, že obecné v kyslých pôdach prevládajú fosforečnany železa a hliníka, v neutrálnych a zásaditých pôdach vznikajú hlavne fosforečnany vápenaté. Vaněk et al. (2007) uvádzajú, že za priaznivých podmienok môžu minerálne vápenaté zlúčeniny fosforu postupne uvoľňovať P do pôdneho roztoku, a tým zaistiť výživu rastlinám.

3.2.2 Organické formy fosforu

Organicky viazaný fosfor pochádza z minerálneho fosforu, ktorý bol imobilizovaný biologickou sorpciou rastlinami a pôdnymi mikroorganizmami do organických väzieb. Z celkového obsahu fosforu v pôde tvorí obvykle podstatnú časť v podobe humusu a zvyškov rastlinných a živočíšnych organizmov. Ivanič et al. (1984) tvrdia, že podiel organicky viazaného fosforu sa značne odlišuje medzi pôdami rôznych stanovišť od 10 do 80 %. Vaněk et al. (2012) tvrdí, že väčšinou však organický viazaný P činí 30 - 50 %. Veľká časť organického fosforu je imobilizovaná zabudovaním do tiel pôdných mikroorganizmov. Takto viazaný fosfor môže byť po odumretí mikróbov a pomocou následných procesov mineralizácie uvoľnený, a tým i sprístupnený pre rastliny (Vaněk et al., 2007).

Nash et al. (2014) uvádzajú, že typické organické zlúčeniny fosforu zahŕňajú

- 1) fosfomonoestery - zlúčeniny s jednou esterovou väzbou na ortofosfát
 - napr. inositol - fosfáty
- 2) fosfodiesterly - zlúčeniny s dvomi esterovými väzbami na ortofosfát
 - ribonukleová kyselina (RNA), kyselina deoxyribonukleová (DNA), kyselina lipoteichoová, fosfolipidové mastné kyseliny (napríklad lecitín)
- 3) organické polyfosfáty
 - napríklad adenosín trifosfát (ATP).

Najväčší podiel organicky viazaného fosforu v pôde tvorí inositol - fosfáty (fytin) a jeho soli fytáty. V kyslých pôdach prevládajú fytáty železa a hliníka a v pôdach zásaditých fytát vápniku (Ivanič et al., 1984). Vaněk et al. (2007) uvádza, že fytin tvorí až 50 % organického fosforu. Fytin je chemicky málo reaktívny a pôdou skoro nemigruje. Je považovaný za potencionálny zdroj živín využiteľného fosforu pre rastliny. Najreaktívnejšie a biochemicky najvýznamnejšie organické zlúčeniny fosforu v pôde sú fosforylované glycidy (hlavne triózy a hexózy) a fosforylované pyrimidinové zlúčeniny. Pretože sú nositeľmi veľkého množstva biochemicky využiteľnej energie na väzbe medzi organickou zložkou a fosfátom, je táto väzba málo stabilná. Fosfátový ión sa z týchto látok ľahko uvoľňuje a stáva sa dobre využiteľným pre rastliny. Pohyblivosť organofosfátov je v pôde niekoľko krát vyššia než minerálnych fosfátov. Tým pádom umožňujú distribúciu fosforu v pôdnom profile (Ivanič et al., 1984).

3.3. Fosfor v rastlinách - jeho význam a prijateľnosť

3.3.1 Fosfor v rastline

Fosfor je makrobiogénny prvok, ktorý je pre rast a vývoj rastlín nenahraditeľný. Greenwood a Earnshaw (1993) uvádzajú, že prvý krát bol v rastlinnej ríši zistený v roku 1688. Jeho obsah v kultúrnych rastlinách je približne 0,1 - 0,5 % P v sušine (Ivanič et al., 1984). Prijatý minerálny fosfor je rýchlo zabudovaný do organických zlúčenín a transportovaný do miest jeho najväčšej potreby. Najviac zásobené časti rastliny fosforom sú generatívne orgány a semená (Vaněk et al., 2012). U jednoročných rastlín môže byť až 50 % celkového prijatého fosforu obsiahnutého v semenách. To, ako je fosfor v rastline prerozdelený, záleží na veku a funkcii jednotlivých orgánov. Najbohatšie zásobené sú mladé delivé pletivá rastliny. Naopak pletivá už vyvinuté, alebo zostarnuté majú obsah fosforu nižší (Ivanič et al., 1984).

Kritickým obdobím príjmu fosforu býva často počiatok vegetácie, kedy rastlina prechádza na autonómnu výživu. Zásoby fosforu zo semena sú vyčerpané, takže je vytvorenie bohatej koreňovej sústavy dôležitým predpokladom pre príjem fosforu. Ďalej na príjem fosforu priaznivo pôsobí dostatočná pôdna vlhkosť a vhodná hodnota pH pôdy, ktorá by sa mala v závislosti od pôdneho druhu pohybovať od 5,5 do 7. Ďalším významným faktorom, ktorý pôsobí priaznivo na príjem fosforu je dostatok organických látok v pôde s dobrou biologickou činnosťou a samozrejme primeraný obsah prijateľného P v pôde, t.j. 40 - 80 mg/kg (Vaněk et al., 2007). Baier et al. (1988) uvádzajú, že významným činiteľom príjmu fosforu sú zrážky. Pri ich nedostatku dochádza k preschnutiu pôdneho profilu a zníženiu príjmu fosforu, často i veľmi výrazne. Z priemyselných hnojív je príjem fosforu viac obmedzený než z pôdnej zásoby. Táto závislosť na dostatočnej pôdnej vlhkosti sa prejavuje najmä u rastlín, ktoré majú zníženú schopnosť príjmu fosforu v dôsledku slabého koreňového systému.

Zabudovanie anorganického fosforu prijatého rastlinou do organických väzieb prebieha veľmi rýchlo a prijatý fosfor je prevádzaný do energeticky bohatých väzieb. Najväčší podiel fosforu v koreňoch, stonkách a listoch má však anorganickú formu, ktorej podiel pri nedostatočnej výžive silno klesá. Avšak organicky viazaný fosfor v nukleovej kyseline, fosfolipide a fytine sa prakticky nemení. Z toho vyplýva, že funkcia fosforu v rastline je jednak ako stavebný prvok, a aj prenášač energie. Je priamym účastníkom na procesoch fotosyntézy spojennej s tvorbou primárnych organických látok a zásobnej energie, tiež pri procesoch

dýchania a syntézy zložitých dusíkatých organických látok a tvorbe zásobných organických látok sekundárneho pôvodu (Baier, 1988).

Dôsledky nedokonalej výživy rastlín fosforom

Nedostatočný príjem fosforu u rastlín sa neobjavuje okamžite. Do istej miery je rastlina schopná regulovať nedostatok fosforu tým, že ho uvoľní z organických rezerv, aby bol zachovaný optimálny priebeh metabolických pochodov. Začiatkové štádium nedostatku P je typické zvýšenou aktivitou enzýmu fosfatázy. Tá uvoľní fosfor z rezerv, tým zaistí minimálnu výživu pre chod fotosyntézy a dýchania, avšak dochádza k zabrzdzeniu rastu (Baier et al., 1988). Vaněk et al. (2007) uvádzajú, že sa väčšinou jedná o latentný nedostatok, kedy ešte nie sú viditeľné žiadne zreteľné príznaky nedostatku tejto živiny, avšak obsah fosforu v rastline je nízky na pokrytie všetkých potrebných biochemických funkcií. Výrazné, okom viditeľné príznaky, sa prejavujú až po dlhotrvajúcom nedostatku fosforu. Okrem zakrslého vzrastu sa rastliny, trpiace nedostatkom fosforu, vyznačujú sýto - zelenou až šedo - zelenou farbou, často s červeným nádychom a to hlavne na stebľách a stonkách. U obilnín sa znižuje intenzita odnožovania a počet zŕn v klasoch, v ktorých dochádza k obmedzeniu ukladania škrobu, a tým k zníženiu pekárskej kvality múky (Baier et al., 1988). Tvorba koreňov je tiež obmedzená pri nedostatku fosforu (Vaněk et al., 2007).

Nadbytok fosforu je veľmi zriedkavý a na území Českej republiky sa takmer nevyskytuje. Dôvodom je veľmi dobrá schopnosť pôdy sorbovať fosfor, ktorá zaručí, že v pôdnom roztoku jeho obsah nedosiahne kritických hodnôt (Vaněk et al., 2012). Prejavy sú vyvolané skôr indukciou nedostatku mikroelementov (B, Cu, Mn). Prísun fosforu v nadbytočnej miere vedie k tvorbe nekróz na listoch, ich postupnému odumieraniu a k predčasnej zrelosti rastlín (Baier et al., 1988).

3.3.2 Prístupnosť fosforu pre rastliny

Hoci je fosfor v poradí jedenásty najhojnejší prvok v litosfére, jedná sa o limitný zdroj (Oelkers et al. 2008). Stutter (2015) tvrdí, že v mnohých pôdach sa i časť fosforu, pridaného do pôdy ako hnojivo, v dôsledku pôdnej sorpcie "zafixuje" na minerálnej fáze a premení sa na zlúčeninu s obmedzenou biologickou dostupnosťou. Michalík (1985) cituje výsledky dvoch štúdií, ktoré udávajú, že využiteľnosť fosforu z aplikovaného hnojiva neprekračuje 10 %, resp. 15 - 20 %. Proces sorpcie je sprevádzaný zrážaním rozpustných fosforečnanov cez radu nestabilných zlúčenín, ktoré sú vyzrážané vo forme koloidných hydratovaných častíc. Tie sú však pre rastliny prijateľné len do doby, kým nastane ich dehydratácia a postupná kryštalizácia. Starnutie zlúčením totiž spôsobuje znižovanie ich rozpustnosti, a tým aj prijateľnosti pre rastliny (Vaněk et al., 2007). Anorganické fosfáty v pôde sa vždy premieňajú od menej stabilných foriem k najstabilnejším, teda ťažko rozpustným zlúčeninám (Ivanič et al., 1984). Chemická sorpcia fosforu prebieha rýchlo, hlavne s hliníkom a železom v kyslých pôdach. Tieto zlúčeniny majú veľmi malú rozpustnosť a hlavne zlúčeniny s Fe sú pre väčšinu rastlín neprijateľné (Vaněk et al., 2007). Fosfor je viazaný hlavne vo forme dihydroxyl - dihydrogen fosforečnanov Al a Fe, čo sú stabilné kryštalické minerály variscit $\text{Al}(\text{OH})_2 \cdot \text{H}_2\text{PO}_4$ a stregnit $\text{Fe}(\text{OH})_2 \cdot \text{H}_2\text{PO}_4$ (Ivanič et al., 1984).

Z celkového hľadiska sú pôdy príliš chudobné na prijateľný fosfor z dôvodu nízkej rozpustnosti fosforečných zlúčenín a vysokej adsorpčnej účinnosti pôd. Najmä u ílovitých pôdach, ktoré sú schopné až na 98 - 99 % pevne naviazať anorganický fosfát do kryštalickej mriežky ílového materiálu, odkiaľ už nie je extrahovateľný soľnými roztokmi. Vysoká adsorpčná schopnosť taktiež spôsobuje minimálnu difúziu fosforu v pôdnom profile. Nízka pohyblivosť fosfátov v prostredí limituje prísun fosforu do miest lokalizácie koreňov, a tým i rozhoduje o zabezpečení fosforečnej výživy. Ak je vzdialenosť fosfátového iónu od koreňa väčšia ako 1 mm, stáva sa pre rastlinu nedostupným (Michalík, 1985).

Špecifické enzýmy fosfatázy sú potrebné na premenu rôznych foriem minerálneho, či organicky viazaného fosforu na jeho sprístupnenie. Akonáhle sa fosfor rozpustí ako voľný ortofosfát z primárnych minerálov, rastliny a mikroorganizmy získajú prístup k nemu z pôdneho roztoku. (Deiss et al., 2017). Rastliny absorbujú fosfor v dvoch hlavných formách - primárnych a sekundárnych ortofosfátoch. Napriek jeho rozhodujúcej úlohe v organizme rastlín je dostupnosť fosforu pre rastliny veľmi obmedzená (Holford, 1997). Príjem fosforu rastlinami je možný jedine vo forme aniónu kyseliny trihydrogénfosforečnej. Najjednoduchšie vo forme $\text{H}_2\text{PO}_4^{1-}$, potom pomerne často i HPO_4^{2-} (Vaněk et al., 2012). Príjem fosforu sa deje výmenou

za iné anióny OH^- alebo HCO_3^- (Baier et al. 1988). Obsah vodorozpustných zlúčenín je veľmi malý a predstavuje len približne 0,8 až 8 mg P na 1 kg na vzduchu vysušenej pôdy. Z celkového obsahu fosforu v pôde tvorí podiel prijateľného fosforu pre rastliny iba približne 1 - 8 % (Ivanič et al., 1984).

V pôdnom roztoku je obsah prijateľného fosforu nízky, avšak rastliny sú schopné jeho príjmu i pri veľmi nízkych koncentráciách (Vaněk et al., 2007). Michalík (1985) uvádza, že výsledky jasne ukazujú, že príjem fosfátov sa uskutočňuje oproti elektrochemickému i koncentračnému gradientu. V cytoplazme koreňových buniek je roztok 2 - 20 tisíc a v xylémovom exudáte 20 - 100 násobne koncentrovanejší ako pôdny roztok. Príjem fosforu je teda aktívny proces, ktorý si vyžaduje dostatok energie (Vaněk et al., 2012).

Dostupnosť fosforu a jeho využitie rastlinami nie je funkciou jeho koncentrácie v pôde, ale skôr mierou jeho uvoľnenia z povrchu pôdy do pôdneho roztoku (Zheng, Zhang, 2012). Obsah fosforu v pôdach, prijateľného pre rastliny, môže byť vytvorený ako dôsledok prirodzených pôdnych procesov. Avšak prirodzená zásoba prístupného fosforu v pôde by bola nedostatočná pre potreby intenzívnej výživy rastlín a ich trvalého vysokého výnosu (Ivanič et al., 1984).

3.4. Zdroje fosforu

3.4.1 Minerálne (priemyslové) hnojivá

Ivanič et al. (1984) uvádzajú, že používanie priemyselne vyrábaných fosforečných hnojív ako zdroja fosforu pre výživu rastlín sa datuje už od druhej polovice 18. storočia. Zapravenie fosforečných hnojív do systému pôda - roztok - rastlina všeobecne zvyšuje koncentráciu fosfátových iónov v pôdnom roztoku, čím je zvýšený i príjem fosforu rastlinami. Predovšetkým však dochádza k akumulácii podstatného množstva fosforu v pevnej fáze pôdy. Baier, Baierová (1985) uvádzajú, že využitie fosforu rastlinami, teda podiel ktorý rastliny prijali z priemyslových hnojív je pomerne malé (najčastejšie 10 - 20 %) v roku aplikácie. Využitie u obilnín je nižšie ako u okopanín. Prístupnosť fosforu v hnojivách je veľmi závislá na rozpustnosti obsiahnutého fosforu.

Rozdelenie fosforečných hnojív podľa rozpustnosti fosforu (Ivanič et al., 1984):

- 1) Fosforečné hnojivá s fosforom rozpustným vo vode
 - superfosfát jednoduchý, superfosfát koncentrovaný (dvojitý, trojitý), fosforečnan amónny (amofos)
- 2) Fosforečné hnojivá s fosforom rozpustným v citrane amónnom
 - dikalciumfosfát, metafosfáty, termofosfát (v ČR sa nevyrábajú a nepoužívajú)
- 3) Fosforečné hnojivá s fosforom rozpustným v 2 % kyseline citrónovej
 - Thomasova múčka, hyperfosfát, hyperkorn
- 4) Mleté prírodné fosfáty, ktoré sú úplne rozpustné jedine v silných minerálnych kyselinách.

Fosforečné hnojivá teda dodávajú živinu fosfor do pôdy priamo vo forme rastlinám prístupnej, alebo ju poskytujú až po svojom rozklade (Richter, Hlušek, 1996). Fosfor využívaný v ďalších rokoch, v tzv. následnom pôsobení, sa počíta s ročným príjmom ešte 1 - 2 % po dobu 20 až 50 rokov. Tieto hnojivá majú však i ďalšie početné, zväčša pozitívne účinky. Jedná sa predovšetkým o prívod ďalších živín (S, Ca, Mg, Mn, Na, Si), prívod látok zlepšujúcich štruktúru pôdy (vápnik, sadra) a imobilizáciu ťažkých kovov pri ich extrémnych vysokých dávkach. Taktiež vplývajú na pôdnu reakciu, to však nemusí mať vždy pozitívny účinok (Baier, Baierová, 1985).

Fosforečné hnojivá

- Superfosfát jednoduchý (SP) obsahuje 7,5 - 8,5 % fosforu (prevažnú časť vo vodorozpustnej forme $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ (Richter, Hlušek, 1996)), 20 % vápniku a 10 % síry. Vyznačuje sa kyslým zápachom a vysokým obsahom sadry. Superfosfáty by nemali prísť na pôdu z výrazne kyslou hodnotou pH (<5,5), pretože vodorozpustný fosfor z hnojiva tu rýchlo prechádza na formy pre rastliny neprístupné (Vaněk et al., 2007). Superfosfáty boli prvými priemyslovo vyrábanými hnojivami vôbec a obsah fosforu je mierne rozdielny podľa miesta náleziska použitej suroviny. V Českej republike sú na výrobu používané kolské apatiti a africké fosfority (Richter, Hlušek, 1996).
- Superfosfát trojitý (TSP) obsahuje 20 -21 % fosforu (takmer všetok P vo vodorozpustnej forme). Vyrába sa rozkladom surových fosfátov kyselinou fosforečnou a pri procese nevzniká sadra, takže TSP už neobsahuje síru. Superfosfáty patria medzi univerzálne hnojivo pri príprave pôdy ešte pred siatím pre všetky plodiny (Vaněk et al., 2012). Podľa štruktúry vyrobeného hnojiva sú superfosfáty dostupné v granulovanej či práškovej forme a podľa nej sa obsah fosforu mierne odlišuje (Ivanič et al., 1984).
- Hyperkorn + magnezium (HFP) (Hyperkorn 26 + 3) obsahuje 11,5 % fosforu, 1,8 % horčíku, min. 36 % vápniku a celú radu sprievodných balastných prvkov (Zn, B, Mo, Mn). Sú obsiahnuté v mäkkých prírodných fosfátoch, z ktorých sa mletím a následnou granuláciou toto hnojivo vyrába. Je vhodné do veľmi kyslých pôd (hodnota pH < 5,5), pretože obsahuje len veľmi malý podiel ľahko rozpustného fosforu a jeho uvoľňovanie, tým i sprístupnenie pre rastliny, je pozvolné (Richter, Hlušek, 1996).
- Hyperphosphat mehlfein (HP) (Hyperphosphat F 29 + 3) obsahuje 12,8 % fosforu a 1,8 % horčíka a ostatné prvky sú rovnaké ako u hnojiva Hyperkorn. Vyrába sa tiež mletím mäkkých fosfátov a jeho účinnosť je daná jemnosťou namletia (čím jemnejší, tým účinnejší). Avšak vysoká jemnosť prispieva k náročnosti jeho aplikácie. Jedná sa o ťažko rozpustnú formu, ktorú je možné využiť pri zásobnom hnojení vytrvalých kultúr či u rastlín s dobrou osvojovacou schopnosťou napr. d'ateliny a strukoviny (Vaněk et al., 2007).
- Thomasova múčka obsahuje cca 7 % fosofru, 32 - 35 % vápniku, < 2,5 % horčíku, 5 - 6 % kremíku a ďalšie mikroelementy (Mn, Cu, B, Mn). Vzniká ako vedľajší produkt pri odstraňovaní fosforu zo železných rúd, tzn. struska, ktorá je následne mletá na jemno.

Pôsobenie tohto hnojiva je pozvoľnejšie a vďaka vysokému obsahu vápnika pôsobí fyziologicky alkalicky (Baier, Baierová, 1985).

- Sortiment zahŕňa i rôzne kombinované hnojivá, najvýznamnejším zdrojom fosforu je Amfos (AF), kde účinnou zložkou je $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$. Obsahuje 22 % fosforu a 12 % dusíku, má veľmi dobré fyzikálne vlastnosti a univerzálne použitie. V zahraničí je používaný Diamfos (DAF) s účinnou zložkou $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ s približným obsahom 22 % fosforu a 21 % dusíku. Ďalej sú vo veľkej miere využívané viaczložkové NPK hnojivá (Vaněk et al., 2012).

3.4.2 Organické hnojivá

Používanie fosforečných hnojív má v poľnohospodárstve bohatú históriu, napríklad guano (stuhnutý trus morských vtákov) bolo známe už približne pre 2000 rokmi pred našim letopočtom, využívané Inkami v Peru (Richter, Hlušek, 1996). U nás od druhej polovice 18. storočia bol prvým zdrojom fosforu pre poľnohospodársku výrobu využívaný popol z kostí alebo priamo namleté kosti (Ivanič et al., 1984). V rámci hospodárskeho podniku hrajú dôležitú úlohu v kolobehu živín tzn. statkové hnojivá. Radia sa sem hnojné organické hmoty a materiály, ktoré majú biologický pôvod a sú získané, alebo vyrobené v hospodárskej prvovýrobe. Tieto hnojivá sú objemové a používané vo veľkých množstvách na jednotku plochy (tony až desiatky ton na 1 hektár), pretože obsahujú nízku koncentráciu živín. Avšak okrem zdroju živín sú ďalej dodávateľom humusotvorných látok, pôdných mikroorganizmov, rastových a hormonálnych látok a taktiež rezistenčných látok, zvyšujúcich odolnosť rastlín voči bakteriálnym chorobám. Delíme ich na hnojivá vzniknuté v maštaliach, hnojivá z rastlinných materiálov a hnojivá zo zelených rastlín (Baier, Baierová, 1985).

Hnojivá vzniknuté v maštaliach

- Maštalný hnoj vzniká na hnojisku rozkladnými procesmi mrvy, ktorá je zmesou výkalov hospodárskych zvierat, steliva a popripade zbytkov krmiva. Biologicky - chemické procesy dozrievania mrvy predstavujú kvasenie, tlenie a hnitie, pri ktorých sa komponenty transformujú na látky iného kvalitatívneho zloženia. Pri rozklade organickej hmoty dochádza k stratám organických látok ako i živín. Vaněk et al. (2007) uvádzajú, že u fosforu straty činia asi 5 % a Baier, Baierová (1985) uvádzajú dokonca 10 %. Hnoj je bohatým zdrojom živín, obzvlášť dusíka a fosforu, už dlhé roky

aplikovaný na pôdu ako hnojivo. V súčasnej dobe intenzifikácie zvieracej produkcie je však hnoj aplikovaný skôr za účelom jeho likvidácie, než aby podporil pôdnu úrodnosť (Cade - Menun, 2011). To je veľká škoda, pretože pôsobenie hnoja je mnohostranné a viacročné (väčšinou sa počíta 3 - 5 rokov). Z praktického hľadiska sa dá konštatovať, že v prvom roku po aplikácii sa využije asi 50 % hnoja a v ďalších rokoch zvyšných 50 %, teda 50 %, 25 %, 12 % atd. Záleží však na druhu pôdy, zrnitostnému zloženiu a v neposlednom rade na intenzite mineralizácie hnoja (Vaněk et al., 2012). U maštalného hnoja sa uvádza, že zlepšuje rozpustnosť vo vode striedmo rozpustných zlúčenín fosforu a taktiež zvyšuje využitie fosforu dodaného do pôdy minerálnymi hnojivami (Zeidan, 2007).

- Močovka je v podstate rozložený moč ustajnených zvierat zriedená vodou. Radí sa skôr medzi dusíkato - draselné hnojivá, pretože obsah organických látok ako i fosforu je zanedbateľný (Vaněk et al., 2007).
- Kejda je zmes pevných a tekutých výkalov hospodárskych zvierat, zriedený vodou, ktorá sa získava z prevádzok bez steliva. Obsah sušiny organických látok ako i živín sa výrazne mení podielom technologickej vody. Živiny obsiahnuté v kejde sú vo forme rastlinám ľahko prístupné (Baier, Baierová, 1985). Kvalitná kejda patrí medzi veľmi hodnotné organicko - minerálne hnojivo, ktoré spája vlastnosti hnoja a živín z priemyselných hnojív. Obohacuje pôdu o organické látky a živiny, ktoré sú vyprodukované z vlastných zdrojov v rámci hospodárstva (Richter, Římovský, 1996).

Dostupnosť fosforu zo všetkých zdrojov živočíšnej výroby hnoja je vysoká (> 70%), pretože väčšina fosforu je anorganická a po aplikácii sa stáva prístupná pre rastliny (Eghball et al., 2002). Využitie živočíšneho odpadu ako hnojiva môže mať pozitívny efekt vo výžive rastlín, ale Ajmone-Marsan et al. (2006) poukazujú na fakt, že pri veľkých dávkach hnoja sa zvyšuje potenciál straty prístupného fosforu z pôdneho roztoku pri odtoku vody.

Hnojivá z rastlinných materiálov

- Slama a jej samotné zapravenie do pôdy nie je moc účinné a je potrebné ju zapravovať do pôdy s ďalšími (najmä dusíkatými) druhmi hnojív (Baier, Baierová, 1985). Obsahuje v priemere 80 % organických látok, ktoré podliehajú mineralizácii - rozkladu a je taktiež cennou surovinou pre vznik trvalého humusu. Chemické zloženie závisí na druhu pestovanej plodiny, úrovni hnojenia a obsahu prístupných živín v pôde. U obilnín sa uvádza obsah fosforu 0,09 %, slama z repky 0,11 % P, u kukurice a strukovín 0,16 % fosforu v sušine (Richter, Římovský, 1996).
- Zelené hnojenie je proces zapravenia celých rastlín alebo ich častí (korene a strnisko) k tomuto účelu pestovaných (medziplodiny či hlavné plodiny) pre zlepšenie pôdnej úrodnosti a podmienok výživy rastlín pre následné plodiny (Baier, Baierová, 1985). Richter a Římovský (1996) popisujú význam v tom, že sa jedná o univerzálne organické hnojivo schopné nahradiť maštalný hnoj z až 50 % a dodať do pôdy značné množstvo ľahko rozložiteľných organických látok.
- Pozberové zbytky majú vplyv na vlastnosti a zložky pôdnej úrodnosti a tiež výrazne ovplyvňujú výživu rastlín. Najviac obohacujú pôdu o organickú hmotu d'ateliny. Stredný objem množstva fosforu v zanechaných zbytkoch je napr. u vojtešky dvojročnej 15 kg/ha a u d'atelino - trávovej zmesky 14 kg/ha (Baier, Baierová, 1985).

Komposty

- Komposty sú charakterizované ako zmes organických látok a zeminy, oživenou užitočnou pôdnou mikroflórou, v ktorej prebehli či stále prebiehajú humusotvorné procesy (Richter, Římovský, 1996). Statkové komposty hrajú dôležitú funkciu v poľnohospodárskom podniku, pretože je možné v nich zužitkovať všetky organické odpady z výroby, a tým i znovunavrátanie živín do kolobehu. Ďalšie odpady, ktoré je možné pridať sú napr. rybníčné bahno, popol z dreva či vápence. Samozrejme je možné namiešať i s hnojivami vzniknutými v maštaliach, ak nie sú priamo aplikované (Baier, Baierová, 1985). O hnojivom a pôdu zúrodňovacom účinku rozhoduje najmä kvalita kompostov, ktorú je možné dosiahnuť správnym dodržovaním zásad tvorby kompostu. Výborná kvalita pre obsah fosforu v sušine sa udáva nad 0,65 % (nevhodná pod 0,2 %). Obsah živín je však veľmi variabilný a mení sa v závislosti na zložení použitých surovín (Richter, Římovský, 1996).

Organické látky predstavujú z tuhej fázy pôdy v priemere 2 - 5 %, avšak ich význam pre zaistenie úrodnosti pôdy niekoľkonásobne prevyšuje ich percentuálne zastúpenie (Richter, Římovský, 1996). Aplikácia organických hnojív sa prejaví priamo vo výžive rastlín zvýšením obsahu živín a zároveň i nepriamo úpravou biologických, fyzikálnych a chemických pomerov v pôde. (Zeidan, 2007). Zvýšený obsah humusu na pôdach hnojených organickými hnojivami umožňuje pôdam lepšie nasávať vodu a sorbovať živiny a tiež byť odolnejšími proti okysleniu. Z fyzikálnych vlastností humusové látky zlepšujú pôdnu štruktúru a prevzdušnenie pôdy, čím zvyšujú i vodnú kapacitu a pôdnu teplotu (Baier, Baierová, 1985).

Obsah živín v jednotlivých organických hnojivách je závislý na druhu a akosti surovín, z ktorých boli jednotlivé druhy hnojív vyrobené. Taktiež je ale potrebné počítať so stratou, ktorá vznikla pri výrobe či uskladnení (Baier, Baierová, 1985). Priemerné obsahy fosforu v jednotlivých organických hnojivách sú zobrazené v tabuľke č. 1. Prívod fosforu v statkových hnojivách je uvedený k termínu ich použitia, teda už po odpočte strát živín v maštaliach a pri skladovaní hnojív. Zdrojom obsahov uvedených v tejto tabuľke je príloha vyhlášky č. 377/2013 Sb., "o skladovaní a spôsobe používání hnojiv", v znení vyhlášky č. 131/2014 Sb., ktorá bola novelizovaná vyhláškou č. 229/2017 Sb.

Tabuľka č. 1 - Priemerný obsah fosforu v organických hnojivách

Hnojivá		Priemerný obsah sušiny [%]	Priemerný prívod P ₂ O ₅ [kg/t]	Prepočet na čistý fosfor [kg/t]
Statkové hnojivá				
Maštalný hnoj dobytky	teľatá, jalovice, býky	22,0	4,0	1,8
	kravy dojené	22,0	4,0	1,8
	dobytok bez tržnej produkcie mlieka	22,0	2,1	0,9
Močovka dobytky a hnojovica		1,3	0,2	0,1
Maštalný hnoj sviň	predvýkrm	24,0	8,8	3,9
	výkrm, prasničky, prasnice	24,0	8,8	3,9
Močovka sviň a hnojovica		1,2	0,5	0,2
Hnoj korský		30,0	3,5	1,5
Hnoj oviec a kôz		32,0	5,4	2,4
Kejda dobytky	teľatá	5,9	1,5	0,7
	jalovice, býky	9,2	1,9	0,8
	kravy dojené	7,2	1,6	0,7
	zmes kejdy od viacerých kategórií dobytky	7,3	1,6	0,7
	tekutá časť po separácii (fugát)	5,8	1,6	0,7
	tuhá časť po separácii (separát)	21,0	1,7	0,7
Kejda sviň	predvýkrm	4,7	2,5	1,1
	výkrm, prasničky	6,0	3,1	1,4
	prasnice	4,6	2,4	1,1
	zmes kejdy od viacerých kategórií sviň	5,3	3,0	1,3
	tekutá časť po separácii (fugát)	3,4	2,4	1,1
	tuhá časť po separácii (separát)	27,0	9,7	4,3
Trus hydiny	Čerstvý	28,0	12,8	5,6
	uležaný	32,0	14,6	6,4
	sušený	73,0	33,3	14,7
	s podstielkou	42,0	18,8	8,3
Hnoj králikov		29,0	6,2	2,7
Kejda králikov		18,0	4,1	1,8
Silážne šťavy riedené		2,1	0,7	0,3
Organické hnojivá				
Kompost zo statkových hnojív		40,0	4,5	2,0
Digestát z poľnohospodárskej bioplynovej stanice		5,8	1,6	0,7
Tekutá časť po separácii digestátu (fugát)		3,9	1,4	0,6
Tuhá časť po separácii digestátu (separát)		23,0	3,0	1,3

3.4.3 Odpady - čistiarenské kaly

Čistiarenské kaly sú jedným z konečných produktov procesu čistenia odpadových vôd a predstavujú približne 1/4 z objemu vôd pritekajúcich do ČOV. Ide o suspenziu pevných látok a agregovaných koloidných látok, obsahujúcu však až 50 - 80 % pôvodného znečistenia. Kal obsahuje veľké množstvo netoxických látok, ktoré predstavujú až 60 % sušiny. Medzi tieto patria organické látky ako cukry, tuky, bielkoviny, vosky, humínové látky a zlúčeniny dusíka a fosforu. Z anorganických látok sú v kaloch prítomné minerály, ktorými sú kremeň, živce, karbonáty, vivianit a oxidy železa. V kale je obsiahnuté i veľké množstvo toxických látok. Sú to rizikové prvky (Zn, Pb, Cu, Ni, Cr, Cd, Hg, As), PCB, PAU, PCDD/F, EOX, uhl'ovodíky C10 - C40, pesticídy, alkylsulfofenoly, polyfenoly. Ďalej sa v organickej zložke kalu, tvorenou mikrobiálnou biomasou, vyskytuje veľké množstvo i patogénnych organizmov. Tými najsledovanejšími sú enterokoky, *Escherichia coli*, *Salmonella* spp. a termotolerantné koliformné baktérie (Raclavská, 2007).

Podľa zákona č. 185/2001 Sb. "o odpadech", v znení neskorších predpisov, je kal kvôli prítomnosti toxických látok a patogénov klasifikovaný ako nebezpečný odpad. Spracovanie odpadových vôd je navrhnuté tak, aby sa v kaloch koncentrovalo čo najväčšie množstvo nežiaducich zložiek z vody. Z tohto dôvodu je vo väčšine prípadov už priamo na ČOV linka na spracovanie kalu. V kalovom hospodárstve je aplikovaná taká technológia úpravy a spracovania kalu, ktorá premení „surový kal“ z nebezpečného odpadu na stabilizovaný materiál. Cieľom úpravy kalu je zabránenie nepriaznivým dopadom na životné prostredie ako aj na zdravie ľudí. Spracovanie kalu obvykle stojí približne viac ako polovicu celkových nákladov na čistenie odpadových vôd (Dohányos, 2006). Charakteristiky čistiarenskeho kalu závisia na spôsobe čistenia odpadnej vody, ako aj na type kalového hospodárstva (Singh, Agrawal, 2008).

V súčasnosti sa čistiarenské kaly môžu po vhodnej úprave používať k priamej aplikácii na poľnohospodársku pôdu ako hnojivo (Raclavská, 2007). Vyhláška č. 437/2016 Sb. "o podmínkach použitia upravených kalů na zemědělské půdě" udeľuje povinnosť osobe, ktorá je zodpovedná za úpravu kalu zaistiť i analýzy a rozborov obsahov jednotlivých živín, toxických látok a patogénov v kale. Táto osoba taktiež vykonáva odbery a analýzy pôd pozemkov, kde budú upravené kaly aplikované. Potreba dodania živín na pôdny blok musí byť vždy podložená výsledkami agrochemických vlastností pôd. Dôvodom potrebných analýz je fakt, že aplikácia kalov na poľnohospodársku pôdu môže mať výhodné ale i škodlivé dopady (Epstein et al., 1976). Avšak Černý (2010) popisuje, že z dlhodobého pohľadu kaly majú priaznivý vplyv na obsah a prijateľnosť živín v pôde, obsah organických látok, tvorbu humusu a biochemických

vlastností pôdy. Singh, Agrawal (2008) uvádzajú, že organická hmota dodaná do pôdy čistiarenským kalom zlepšuje stabilitu pôdných agregátov, pórovitosť a schopnosť pôdy zadržiavať vodu. Taktiež prídanie kalu spôsobuje zvýšenie aktivity pôdných enzýmov, ako aj mikrobiálnu aktivitu, teda i mikrobiálnu biomasu.

I napriek preukázaným pozitívnym vplyvom na pôdu sa opätovné využitie čistiarenského kalu stretáva s radou technických prekážok (Fytili, Zabaniotou, 2008). Tie vznikajú z dôvodu, že kal je produkovaný jak je rok dlhý, avšak jeho využitie na pôdnom bloku je podľa vyhlášky č. 437/2016 Sb. obmedzené na jedenkrát za 3 roky. V dôsledku toho musí byť veľké množstvo kalu skladované. Okrem toho kal obsahuje i nežiadúce rizikové prvky, látky i mikrobiálne patogény, ktorých obsahy musia spĺňať prísne kritéria, ktoré zakazujú používanie veľkého množstva kalu na pôdu. Maximálnym množstvom je 5 ton sušiny kalu (min 18 % suš.) na jeden hektár. Pokiaľ použité kaly obsahujú menej ako polovicu limitného množstva všetkých sledovaných rizikových parametrov, môže množstvo kalu pridaného na pôdu dosahovať 10 t suš. kalu na hektár. Taktiež je potreba poznať hydrologickú situáciu v záujmovom území, kde kaly musia byť aplikované min 50 m od povrchových vôd a 100 m od zdrojov pitnej či liečivej vody. Vzdialenosťným obmedzením umiestnenia kalov je i min 300 m od obytnej zástavby.

Ďalším spôsobom ako je možné využiť kaly, aby bola navrátená organická hmota a živiny v nich obsiahnuté je kompostovanie. Proces aeróbnej degradácie organického materiálu, pri ktorom aktivita mikroorganizmov zvyšuje teplotu a tým zahubí a odstráni nežiadúce patogény. Komposty sú využívané hlavne u plodín s vysokým nárokom na organické látky. Svoje uplatnenie majú i pri obnove trávnych porastov, v lesných škôlkach a pri meliorácií pôd ľahkých, alebo veľmi ťažkých a taktiež pri rekultiváciách. Kompost je potrebné zapraviť do pôdy orbou, aby nedošlo k strate organickej hmoty a živín. Jeho priama účinnosť sa pohybuje v škále 35 - 45 %, následná v rozmedzí 55- 65 %. Taktiež môžu byť čistiarenské kaly využívané ako surovina pre prípravu hnojiva N-viro, alebo surovinou pre spätné získavanie fosforu (Raclavská, 2007).

Výskyt fosforu v kale

Minerálna fáza obsahujúca fosfor v kale (kal z ÚČOV Ostrava), ktorá bola získaná metódou práškovej RTG - difrakcie zistená, je vivianit $\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8 \text{H}_2\text{O}$ resp. vivianit s izomorfnou prímiesou baricitu $(\text{Mg}, \text{Fe})_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8 \text{H}_2\text{O}$. Fosfátová zložka kalu obsahuje ako kation železo, v menšom množstve horčík a prípadne vápnik (Raclavská, 2007).

Obsah fosforu v čistiarenskom kale je jedným z dôležitých agrochemických parametrov kalu. Pomocou metódy atómovej emisnej spektrometrie s iónovo viazaným plazmatom bola zistená značná variabilita v obsahu fosforu v kaloch (4 - 82 g/kg sušiny kalu). Tieto rozdiely sú dané jednak množstvom fosforu v pritekajúcej odpadovej vode, ako aj spôsobom a stupňom jeho odstraňovania v priebehu čistenia odpadových vôd. Pri priemernom obsahu fosforu (25 g/kg sušiny kalu) a legislatívne povolenej aplikácii na poľnohospodársku pôdu (5 t suš. kalu/ha) je možné takto doplniť až 125 kg fosforu na hektár (MŽP, 2015).

Jedným z možných smerov nakladania s kalom je spätné získavanie fosforu, ktoré je uskutočňované tromi spôsobmi (Dohányos, 2006):

- 1) termickým, chemickým alebo mikrobiologickým spôsobom a ich kombináciou
- 2) priame získavanie fosforu pri čistení odpadových vôd (zrážanie v anaeróbnej zóne)
- 3) získavanie fosforu z popola po spálení kalu.

V súčasnej dobe je veľké úsilie zamerané na znovu získavanie fosforu z odpadovej vody. Čistiarenský kal obsahuje značné množstvo fosforu, ktoré môže byť spätne navrátené. Liao et al. (2005) v svojej štúdií popisujú mikrovlnnú technológiu, ktorá už behom 5 min dokáže uvoľniť až 76 % z celkového fosforu obsiahnutého v kale a to bez použitia prídavných chemikálií.

3.5 Jačmeň jarný - jeho výživa a hnojenie

Jačmeň (*Hordeum*) patrí medzi kultúrne plodiny už minimálne 8 tisíc rokov. Petr (2005) uvádza, že už dokonca i stavitelia pyramíd jedli jačmenné bochníky. Na územie Českej republiky sa dostal za obdobia Keltov, kedy mal po pšenici druhé najvýznamnejšie miesto. Bol potrebný na výrobu chleba a piva (Černý et al., 2007). Čo v podstate pre Čechy platí i dnes. Jeho využitie je široké, a to na výrobu sladu a piva, krúp či náhradu za kávu a sladovníckych výťažkov. Zbytočný vytriedený zadný jačmeň a sladovnícke odpady sú využívané ako krmivo pre živočíšnu výrobu (Benda et al., 2001).

Jačmeň sa radí medzi obilniny najviac náchylné na hnojenie, pretože rýchlo a citlivo reaguje na zmeny v obsahu a pomere živín v pôde. Práve preto sa i každá chyba vo výžive a hnojení prejaví nižším výnosom aj zhoršenou kvalitou úrody (Krausko et al., 1980). Najväčší nárok na živiny má vo fáze sloupkování - obdobie veľkej periódy rastu. Baier, Baierová (1983) uvádzajú, že príjem živín je v tomto období u jarného jačmeňa: 46 % P, 54 % N, 63 % K, 50 % Ca a 33 % Mg. Podstatou tejto produktivity je i vysoká rýchlosť fotosyntézy (Benda et al., 2001). Vo výžive jarného jačmeňa je dôležitý dostatok pohotových prístupných živín. Dôvodom ich obrovskej potreby je plytko rozložený koreňový systém rastliny, ktorý využíva živiny iba vo vrchnej časti pôdneho profilu - v ornici (Černý et al., 2007). Hlavný podiel koreňovej sústavy jačmeňa, ktorá sa podieľa na výžive, siaha iba do hĺbky 25 cm (Krausko et al., 1980). Takto málo aktívny koreňový systém je dôvodom, že jačmeň veľmi závisí na klimatických podmienkach okolia. Petr (2005) tvrdí, že sú známe korelácie teplôt aj zrážok k obsahu bielkovín, k porostlosti obiliek, výskytu zahnednutých špičiek a zelených zrn, a v neposlednej rade k napadnutiu obiliek plesňami a hubami. Tejto závislosti napomáha i nízky vzrast jačmeňa, ktorý neudrží mikroklimu, takže celý porast veľmi rýchlo reaguje na prísušky. Na druhej strane, jačmeň rovnako okamžite a spoľahlivo reaguje i na každý vstup hnojenia, kedy je odozva vo výnose skoro vždy istá (Vašák, 2007). Klem et al. (2007) uvádzajú, že zásadou pre úspešné pestovanie jačmeňa je vyváženosť všetkých vstupov a ich prísun v optimálnom množstve. Veľmi úzke optimum u viacerých vstupov spôsobuje, pri nadbytku i nedostatku, straty na výnose. Toto optimum je navyše ovplyvňované pôdou, priebehom počasia i pestovanou predplodinou. Napríklad po obilovinách bol znížený extrakt a zvýšený obsah bielkovín (Petr, 2005). Benda et al. (2001) a Anonym (2017) uvádzajú, že v prípade vysievania po obilnine je do pôdy vhodné dodať organickú hmotu inou formou, napríklad zaoranie slamy či zelené hnojenie.

Jačmeň je často označovaný ako plodina starej pôdnej sily, čo znamená, že pre dosiahnutie kvalitnej produkcie využíva minerálne či organické hnojivá aplikované k predplodine (Černý et al., 2007). Klem et al. (2007) však tvrdí, že v podmienkach dnešnej doby, kedy je výrazne obmedzená živočíšna výroba, a tým pádom aj organické hnojenie, naďalej sa znižujú plochy vhodných predplodín, a celkovo dochádza k veľmi rýchlej degradácii pôdnej úrodnosti, už stará pôdna sila až na výnimky neexistuje. Petr (2005) tvrdí, že v súčasnosti je problémom i nedostatočné vápnenie pôd, pretože je zistená závislosť vo výnose a pôdnej reakcii - pH. Kubinec a Kováč (1998) uvádzajú, že jačmeň vyžaduje mierne kyslú až neutrálnu pôdnu reakciu s optimálnou hodnotou pH 6,2 - 7,2. Kyslé pôdy majú negatívny vplyv na rast i kvalitu jarného jačmeňa, pretože potláčajú tvorbu koreňového systému a znižujú účinnosť živín (Benda et al., 2001).

Jačmeň jarný patrí medzi plodiny s veľmi krátkou vegetačnou dobou, ktorá je 110 až 125 dní. Avšak i za takto krátke obdobie dokáže vytvoriť vysoký biologický a hospodársky výnos za predpokladu vhodných podmienok (Benda et al., 2001). Predĺženie vegetačnej doby o každý deň sa môže priaznivo prejaviť na výnose. Preto je včasné a kvalitné siatie jarného jačmeňa dôležitým predpokladom pre tvorbu konečného vysokého výnosu (Bezdíčková, 2016).

3.5.1 Hnojenie jarného jačmeňa fosforom

Jačmeň má zvýšené nároky na fosfor, draslík, vápnik, horčík (v začiatkových vývojových štádiách aj síru). Nedostatok niektorej zo živín, alebo nevhodný pomer živín môže znížiť výnosový potenciál pestovanej odrody (Černý et al., 2018). Lekeš et al. (1985) uvádzajú, že zvýšené nároky na príjem fosforu u jačmeňa sú už v prvom období rastu, a to od vyklíčenia do začiatku odnožovania. V tomto období je žiadaný rýchly počiatkový rast nadzemnej časti a koreňového systému. Podľa Ivaniča et al. (1984) je obsah fosforu v bunkách mladého jačmeňa, kde dochádza k aktívnemu rastu meristematického pletiva listov a koreňov stokrát až tisíc krát vyšší, než u buniek, ktoré sa už prestali deliť. Na konci odnožovania sa príjem fosforu opäť zvyšuje a pokračuje až do doby kvitnutia, kedy je v podstate ukončený. Príjem potrebného fosforu z pôdy je zabezpečovaný buď to z pôdneho roztoku, alebo priamym stykom koreňov s pôdnymi časticami sorpčného komplexu (Lekeš et al., 1985). Mnohí autori zaoberajúci sa príjmom kyseliny fosforečnej jačmeňom zdôrazňujú, že je potrebné aby bola v najprístupnejšej forme, pretože ju jačmeň pomerne slabo resorbuje (Krausko et al., 1980).

Pre dosiahnutie vysokých a kvalitných úrod jačmeňa má hnojenie fosforom veľký význam, pretože sa uplatňuje predovšetkým pri rovnomernom dozrievaní predného zrna a zvyšuje odolnosť voči poliehaniu (Kubinec, Kováč, 1998). Krausko et al. (1980) uvádza, že pri stupňovaní dávok fosforu sa znižuje obsah bielkovín v zrne a výrazne stúpa podiel zrna prvej triedy. Avšak hnojenie fosforečnými hnojivami sa nie vždy prejavuje rovnakým spôsobom. Vplyv fosforečného hnojenia sa najvýraznejšie prejavuje v daždivých rokoch. To je možné vysvetliť tým, že fosfor do určitej miery eliminuje negatívny dopad vyššieho príjmu dusíku spolu s nadbytkom vody (Kubinec, Kováč, 1998). Pri nedostatku fosforu na začiatku rastu sa vytvorí nevhodný pomer medzi fosforom a dusíkom v nadzemnej časti rastlín. To spôsobuje, že prijatý dusík nemôže rastlina hospodárne využiť (Lekeš et al., 1985).

Hnojenie fosforom sa niekedy posúva na hnojenie ešte pred výsevom, alebo sa tiež využíva hnojenie pod päťou (Černý et al., 2007). Jeden zo spôsobov hnojenia v pásoch, kedy ide o zapravenie hnojiva vedľa a pod osivové lôžko. Takto sú živiny cielene aplikované priamo k vzchádzajúcim rastlinám jačmeňa (Klem, 2007). Často sú používané kombinované hnojivá ako napr. Amofos a NP Lovofert. Toto kombinované hnojenie je jedným z intenzifikačných prvkov pri pestovaní jarného jačmeňa (Černý et al., 2007). Pri určovaní dávok fosforečných hnojív jačmeňa je potrebné sa riadiť podľa zásob prístupného fosforu v pôde. Odporúčané dávky sú len orientačné a každý agronóm je povinný stanoviť optimálnu dávku individuálne (Krausko et al., 1980). Okrem obsahu prístupného fosforu je potrebné zohľadniť jeho potrebu na plánovanú úrodu a jeho využiteľnosť. V prípade ak je zásoba fosforu v pôde vysoká, tak týmto prvkom nehnojíme niekoľko rokov kým neklesne jeho obsah do kategórie dobrej zásoby. Naopak ak je zásoba fosforu v pôde stredná až veľmi malá je potrebné aplikovať o 25 - 50 % viac živín než jačmeň odoberie z pôdy, aby sa obsah fosforu v pôde postupne zvyšoval na dosiahnutie kategórie dobrej zásoby (Kubinec, Kováč, 1998).

4. Metodika práce

4.1. Charakteristika záujmových lokalít a pestovaných odrôd

Maloparcelový presný pokus bol založený na pokusných staniciach ČZU a VÚRV v.v.i. Ruzyně v roku 1996. Jednotlivé pokusné stanovištia, ktoré sa nachádzajú na lokalitách Hněvčeves, Humpolec a Praha - Suchdol sa od seba odlišujú pôdne - klimatickými podmienkami. Konkrétne údaje o rozdielnych podmienkach sú zaznamenané v tabuľke č. 2. Na parcelách, ktorých 1 varianta činila rozlohu 60 m² boli pestované 3 plodiny. Tieto plodiny boli pestované v osevnom slede zemiaky, pšenica ozimná a jačmeň jarný. Konkrétne odrody sú uvedené v tabuľke č. 3.

Tabuľka č. 2 - Základné charakteristiky pokusných stanovišť

Stanovisko	Hněvčeves	Humpolec	Suchdol
Severná šírka	50°18'46"	49°33'15"	50°07'40"
Východná dĺžka	15°43'01"	15°21'02"	14°22'33"
Nadmorská výška [m n. m.]	265	525	286
Priemerná ročná teplota [° C]	8,2	7	9,1
Priemerný ročný úhrn zrážok [mm]	573	665	495
Pôdny typ	hnedozem	kambizem	černoziem
Pôdny druh	ílovitohlinitá	hlinitopiesočnatá	piesočnatohlinitá
pH ¹⁾	5,9	5,1	7,5
P [mg/kg] ²⁾	87 (±11)	77 (±10)	74 (±9)
K [mg/kg] ²⁾	214 (±29)	238 (±47)	209 (±18)
Ca [mg/kg] ²⁾	2156 (±251)	1625 (±187)	7803 (±1760)
Mg [mg/kg] ²⁾	240 (±24)	112 (±14)	209 (±16)

¹⁾ Stanovené 0.01 mol/l CaCl₂, 1:10 navážka/vyluhovadlo

²⁾ Priemerné vstupné hodnoty stanovené metódou Mehlich 3 (rok 1996)

Tabuľka č. 3 - Prehľad odrôd plodín pestovaných v dlhodobých pokusoch

Rok	Humpolec a Suchdol			Hněvčeves		
	Zemiaky	Pšenica	Jačmeň	Zemiaky	Pšenica	Jačmeň
1997	Karin	Samanta	Akcent	Karin	Samanta	Akcent
1998	Karin	Samanta	Akcent	Karin	Samanta	Akcent
1999	Karin	Samanta	Akcent	Karin	Samanta	Akcent
2000	Cordoba	Alana	Akcent	Cordoba	Alana	Akcent
2001	Cordoba	Alana	Akcent	Cordoba	Alana	Akcent
2002	Cordoba	Alana	Akcent	Cordoba	Alana	Akcent
2003	Cordoba	Alana	Akcent	Cordoba	Alana	Akcent
2004	Cordoba	Alana	Akcent	Cordoba	Alana	Akcent
2005	Cordoba	Alana	Calgary	Cordoba	Alana	Akcent
2006	Ditta	Alana	Calgary	Ditta	Alana	Jersey
2007	Ditta	Alana	Calgary	Ditta	Alana	Jersey
2008	Ditta	Alana	Calgary	Ditta	Alana	Jersey
2009	Ditta	Alana	Calgary	Ditta	Alana	Calgary
2010	Ditta	Alana	Calgary	Ditta	Alana	Calgary
2011	Ditta	Alana	Calgary	Ditta	Alana	Calgary
2012	Ditta	Alana	Xanadu	Ditta	Alana	Xanadu
2013	Ditta	Alana	Xanadu	Ditta	Alana	Xanadu
2014	Ditta	Alana	Xanadu	Ditta	Alana	Xanadu
2015	Ditta	Alana	Xanadu	Ditta	Alana	Xanadu
2016	Ditta	Reform	Xanadu	Ditta	Reform	Xanadu
2017	Ditta	Reform	Xanadu	Ditta	Reform	Xanadu

4.2. Aplikácie hnojív

V pokuse boli vytvorené 4 varianty, ktoré sa odlišovali hnojením. Prvá je nehnojená kontrolná varianta, ďalej je varianta hnojená čistiarenským kalom, varianta hnojená hnojom a na poslednú variantu pokusu sú aplikované minerálne hnojivá (NPK).

Organické hnojenie je používané iba pri prvej plodine v osevnom slede, preto je u zemiakov sledované priame pôsobenie aplikácie organických hnojív a u pšenice a jačmeňa pôsobenie následné. Dávkovanie fosforu v hnojivách pre jednotlivé varianty je uvedené v tabuľke č. 4. Pre potreby pokusu sú využívané čistiarenské kaly z ústrednej čistiarne

odpadových vôd Praha Trója. Živiny z priemyselných hnojív sú dodávané v LAV (27,5 %), trojitom superfosfáte (21 % P) a 60 % draselnej soli (50 % K).

Celý systém okrem nehnojenej kontroly bol založený na jednotnej dávke dusíka pre celý oševný postup tak, aby celková dávka N za 3 roky (zemiaky + pšenica ozimná + jačmeň jarný) činila 330 kg N/ha. To platí pre organické i minerálne hnojivá, či ich prípadnú kombináciu.

Tabuľka č. 4 - Varianty hnojenia pokusu

Varianta	Zemiaky	Pšenica ozimná	Jačmeň jarný
kontrola	0	0	0
kal	330 kg N 240 kg P	0	0
hnoj	330 kg N 70 kg P	0	0
NPK¹⁾	120 kg N 30 kg P 100 kg K	140 kg N 30 kg P 100 kg K	70 kg N 30 kg P 100 kg K

¹⁾ * označené živiny (prvky) boli dodávané v minerálnej forme, ak je symbol pri názve varianty, bola celá varianta hnojená iba minerálnymi hnojivami

4.3 Odber vzoriek

Odber vzoriek pôdy sa uskutočňuje každoročne. Na jeseň po zbere obilnín a zemiakov bol vždy vykonaný odber ornice (0 - 30 cm). Tá bola následne usušená a preosiata cez sito s veľkosťou otvorov 2 mm. Pre potreby diplomovej práce boli k analýzam využité archívne vzorky pôdy z roku 1996 (pred založením pokusu) a pôdy odobrané po zbere pšenice ozimnej z každého ukončenia cyklu oševného postupu, tzn. z rokov 1999, 2002, 2005, 2008, 2011, 2014 a 2017.

4.4 Analytické stanovenia

Extrakcia demineralizovanou vodou

Extraktky boli zhotovené podľa Luscombe a kol. (1979). K 5 g vzorky bolo doplnených 50 ml demineralizovanej vody. Jednotlivé vzorky boli trepané 2 hodiny a následne prefiltrované. Vzniknuté extraktky boli následne analyzované. Meranie obsahu fosforu v získaných výluhoch bolo realizované na optickom emisnom spektrometri s indukčne viazaným plazmatom (ICP-OES; Varian VistaPro; Austrálie).

Obsah fosforu stanovený metódou Mehlich 3

K stanoveniu obsahu prístupného fosforu bol použitý extrakčný roztok Mehlich 3 (Mehlich, 1984) zložený z CH_3COOH (0,2 mol/l), NH_4F ($c=0,015$ mol/l), HNO_3 ($c=0,013$ mol/l), NH_4NO_3 ($c=0,25$ mol/l) a EDTA ($c=0,001$ mol/l). Pomer zeminy a vyluhovadla činil 1:10 (10 g zeminy + 100 ml vyluhovadla). Trepanie na trepačke VWR®Advanced 15000 Orbital Shaker trvalo 5 min a následne bol získaný roztok prefiltrovaný (filtračné papiere č. 388). Aby sa predišlo chybám pri meraní, boli extraktky zhotovené v dvoch opakovaniach. Pre určenie obsahu fosforu v získaných výluhoch bol využitý optický emisný spektrometer s indukčne viazaným plazmatom (ICP-OES; Varian VistaPro; Austrálie).

Meranie obsahu fosforu vo výluhu

Zo získaných výluhov pôd, či už demineralizovanou vodou alebo extrakčným roztokom Mehlich 3, boli všetky merania obsahov fosforu analyzované na optickom emisnom spektrometri s indukčne viazaným plazmatom (ICP-OES; Varian VistaPro; Austrálie).

Hodnotenie výnosu jačmeňa jarného

Po každom zbere pokusov sú zaznamenávané hektárové výnosy pestovaných plodín. Pre účely tejto práce bude u sledovaných variant hodnotený výnos jačmeňa jarného od roku 1997 do roku 2016.

4.5 Štatistické hodnotenie

Jednotlivé varianty hnojenia neboli na daných stanovištiach realizované vo viacerých opakovaniach. Z tohto dôvodu nie je možné urobiť analýzu variancie. Možný vznik chyby v dôsledku neopakujúcich sa variant spôsobený napr. lokálnou variabilitou stanovišťa bol kompenzovaný nasledovne:

- 1) odberom vzoriek pred založením pokusu, kedy bolo zistené, že variabilita na pozemkoch je minimálna, a stanovišťa sú tým pádom vhodné k založeniu pokusu
- 2) veľkosťou parciel 60 m², ktoré sú väčšie než je doporučená veľkosť pre pestované plodiny (15 m² pre obilniny a 30 m² pre širokoriadkové plodiny)
- 3) odberom väčšieho množstva vpichov (min. 7) sondovacou tyčou z každej parcely.

Ako hlavné hodnotenie sú teda sledované časové rady, tzn. vývoj obsahu fosforu od založenia pokusu po rok 2017 a korelácia výnosu plodín s obsahmi prístupných foriem fosforu v pôde. Ďalším doplňujúcim štatistickým hodnotením je porovnanie dvoch extrakčných metód pre stanovenie prístupného fosforu - vodného výluhu a metódy Mehlich 3. Toto porovnanie je vyhotovené pomocou korelačnej a regresívnej analýzy.

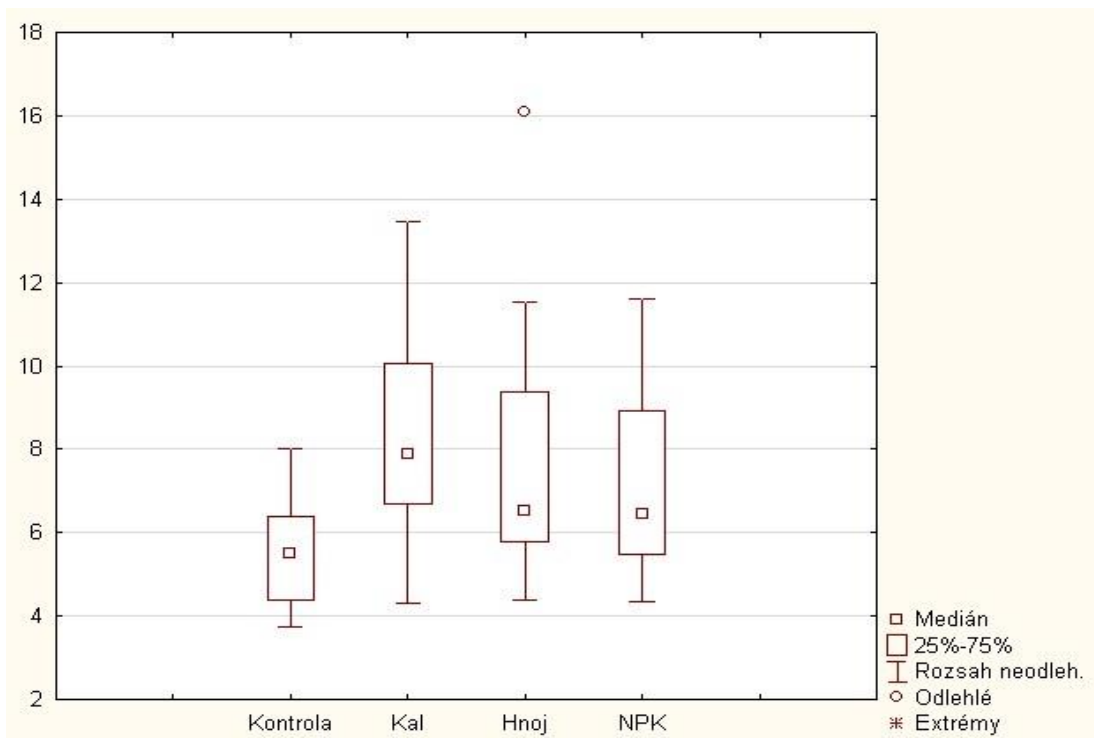
K štatistickému hodnoteniu boli použité programy STATISTICA (2016) a Excel (2016).

5. Výsledky

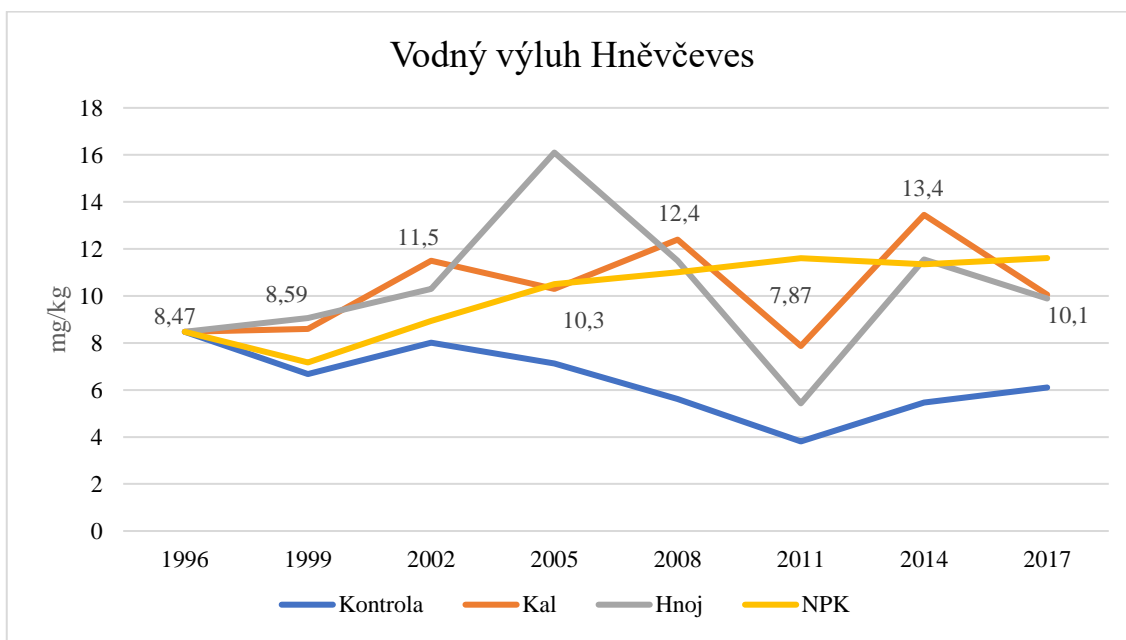
5.1 Obsah fosforu v pôde stanovený vodným výluhom

Na grafe č. 1 je viditeľné, že priemerný obsah prijateľného fosforu (od začiatku pokusu) zisteného vodným výluhom po aplikácii čistiarenského kalu na všetkých skúmaných lokalitách vykazuje najväčší obsah, dosahujúci najvyššej hodnoty 13,4 mg/kg. Medián, teda prostredná hodnota obsahu prijateľného fosforu je najvyššia po aplikácií kalu, skoro 8 mg/kg v porovnaní s hnojom a NPK hnojivom, u ktorých medián dosahoval hodnotu tesne nad 6 mg/kg. Hodnota mediánu bola využitá z dôvodu odľahlej hodnoty, ktorá by mohla skresliť výsledky pri použití aritmetického priemeru. Odľahlá hodnota 16,1 mg/kg bola pozorovaná po aplikácií hnoja. Táto skutočnosť nastala roku 2005 na lokalite Hněvčeves (graf č. 2), kedy bola jediný krát za celú časovú radu pokusu, prevýšená maximálna hodnota obsahu prístupného fosforu, dosiahnutá po aplikácií kalu.

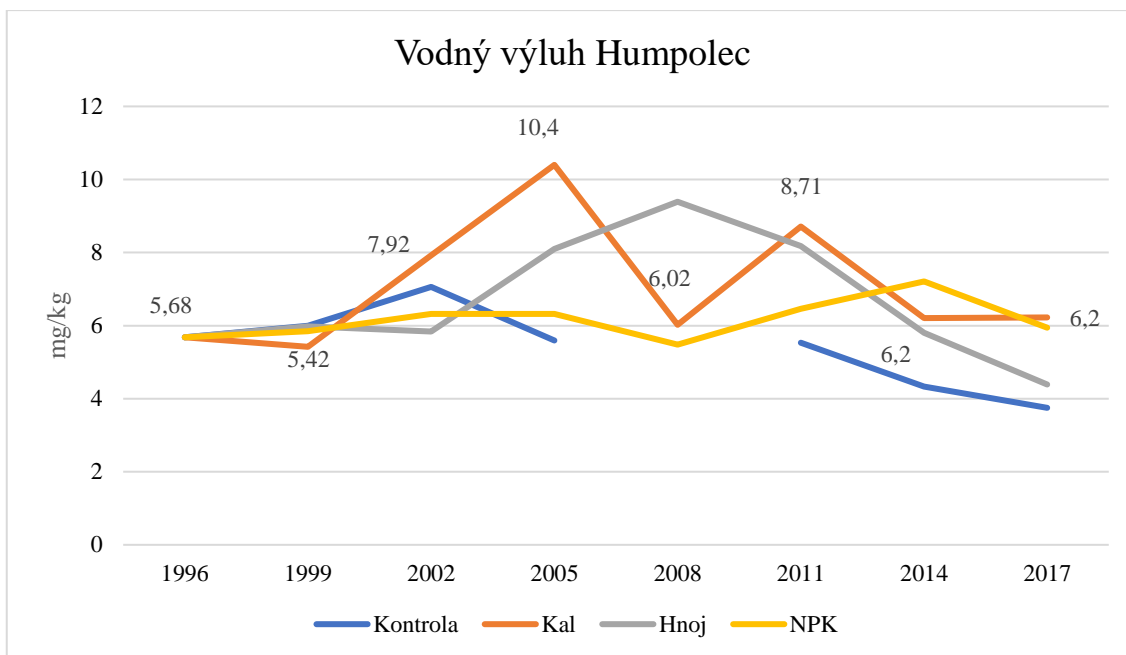
Z výsledkov analýzy vodným výluhom zobrazených na grafoch č: 2, 3 a 4 jasne vyplýva, že aplikácia čistiarenského kalu má kladný prínos prístupného fosforu do pôdy. Najväčší rozdiel v sledovanom období 1996 - 2017 bol zaznamenaný na lokalite Suchdol (graf č. 4), kde hodnota prístupného fosforu vzrástla o takmer dvojnásobok. Podľa výsledkov v poslednom sledovanom roku 2017 na Suchdole dodal čistiarenský kal najviac prístupného fosforu do pôdy v porovnaní s ostatnými aplikovanými hnojivami. Najmenší príbytok prístupného fosforu počas časovej rady pokusu bol zistený na lokalite Humpolec (graf č. 3), kde taktiež, došlo dokonca k jeho miernemu úbytku po prvých troch rokoch aplikácie. Na lokalite Hněvčeves (graf č. 2) taktiež došlo k úbytku množstva prístupného P až pod pôvodnú nameranú hodnotu na začiatku pokusu, a to v roku 2011. Z celkového hľadiska na lokalite Hněvčeves obsah stanoveného prístupného fosforu najviac kolísal v priebehu pokusu. Naopak, ako je možné vidieť na grafe č. 4, na Suchdole obsah prístupného fosforu po aplikácií kalu viac menej po celú dobu plynule narastal.



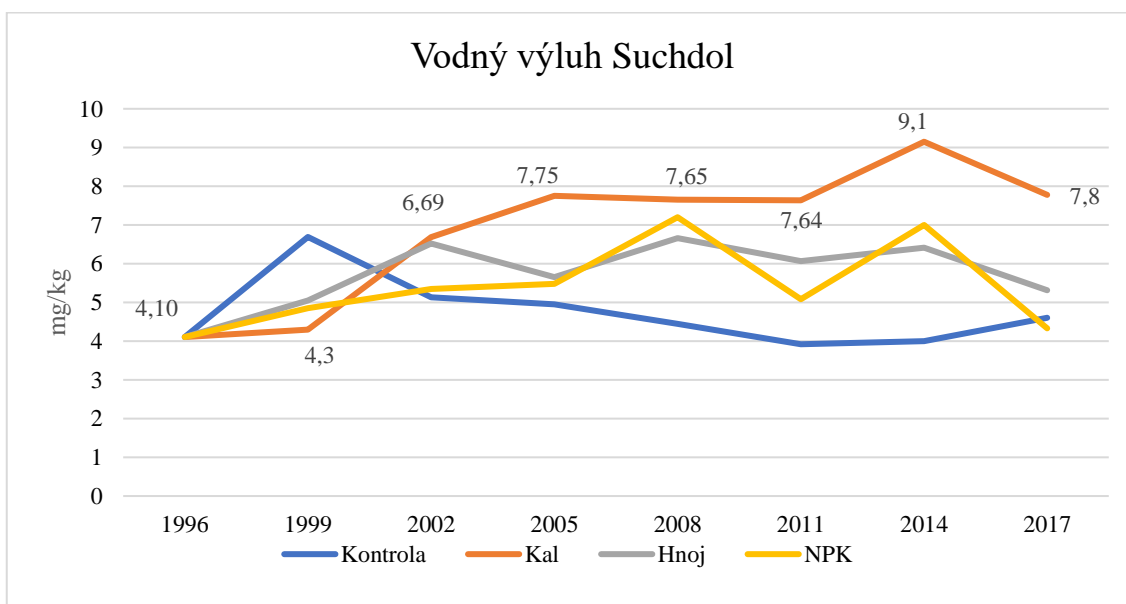
Graf č. 1: Popisná štatistika hromadných dát vodného výluhu (v mg/kg) zo všetkých pokusných lokalít po zbere jačmeňa



Graf č. 2: Obsah prístupného fosforu v pôde stanovený vodným výluhom na lokalite Hněvčeves



Graf č. 3: Obsah prístupného fosforu v pôde stanovený vodným výluhom na lokalite Humpolec

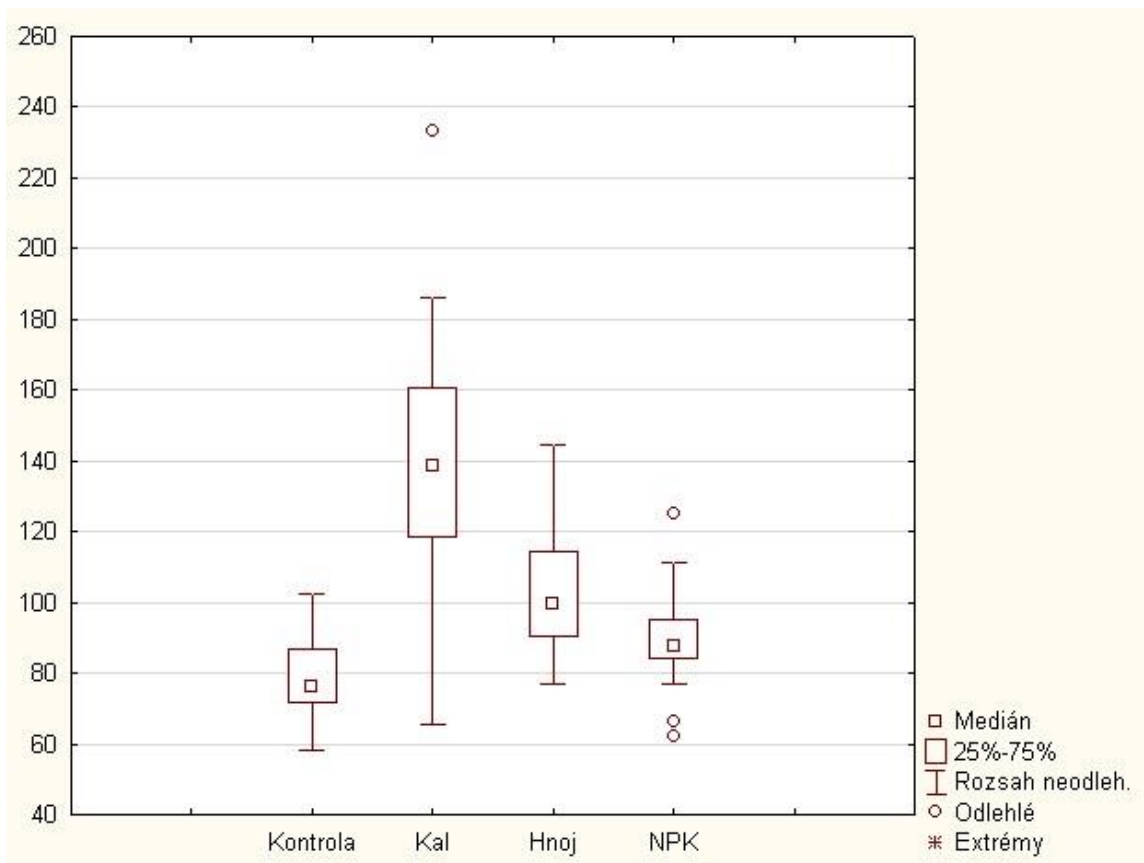


Graf č. 4: Obsah prístupného fosforu v pôde stanovený vodným výluhom na lokalite Suchdol

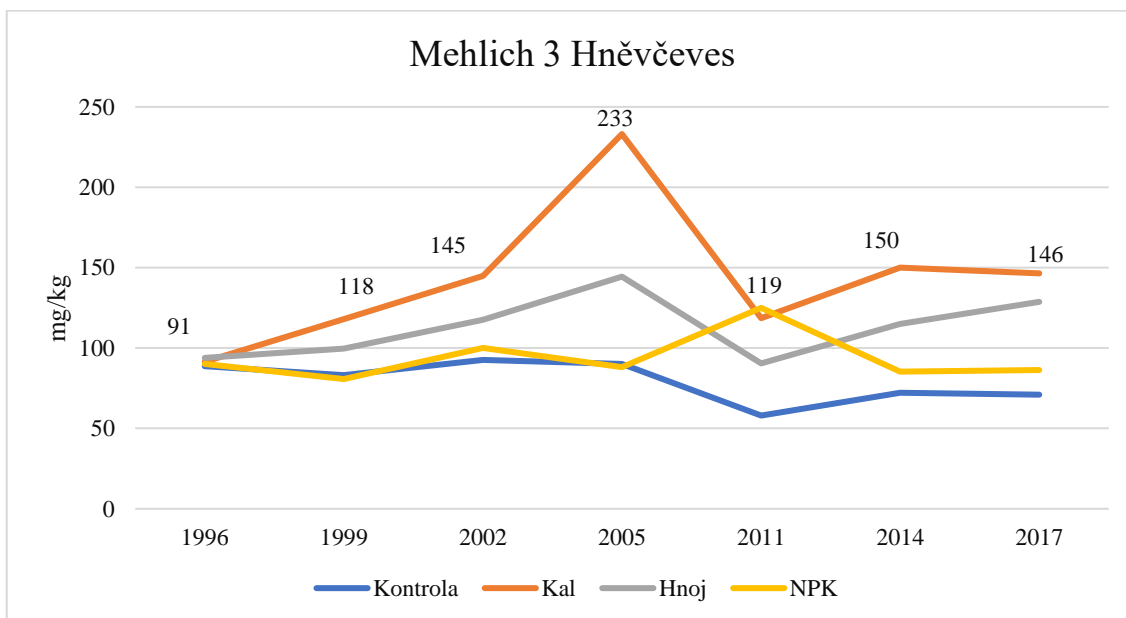
5.2 Obsah fosforu v pôde stanovený metódou Mehlich 3

Graf č. 5 ukazuje skutočnosť, že po aplikácii čistiarenských kalov bol zistený najväčší obsah potenciálne prístupného fosforu získaného pomocou extrakčného roztoku Mehlich 3, kde najvyššia dosiahnutá hodnota bola 186 mg/kg. Najčastejšie vyskytujúce sa obsahy zobrazené v grafe kvantilmi (25 % - 75 %) sú po aplikácii kalu podstatne vyššie (120 - 160 mg/kg) než u ostatných druhoch hnojiva, ktoré nedosahujú ani spodnú hranicu kvantilu 120 mg/kg. Prostredná hodnota - medián obsahu stanoveného prístupného fosforu, taktiež po aplikácii kalu dosahuje najvyšších hodnôt 140 mg/kg, pričom u hnoja vychádza 100 mg/kg a ešte nižšia po použití minerálnych hnojív NPK.

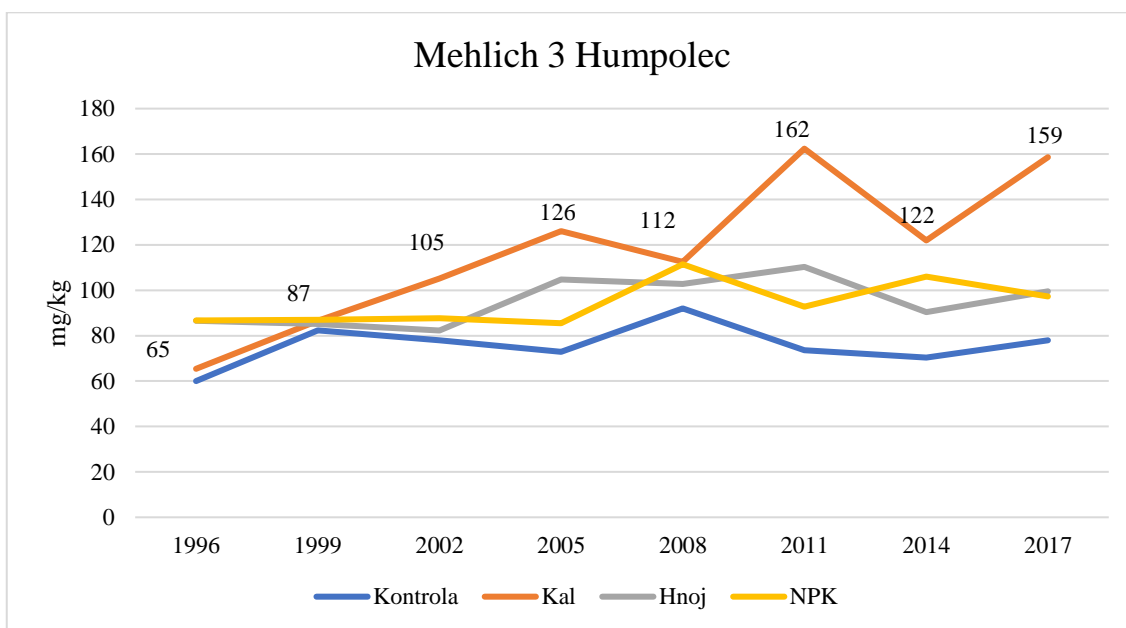
Z grafov č. 6, 7 a 8, zobrazujúcich výsledky analýzy roztokom Mehlich 3 o obsahu potenciálne prístupného (mobilného) fosforu vyplýva, že aplikácia čistiarenského kalu je najlepším zdrojom zo sledovaných variant hnojív. Najväčší rozdiel od ostatných variant hnojenia bol v poslednom roku pokusu zaznamenaný na lokalite Suchdol (graf č. 8), kde dosahoval stanovený obsah prístupného P takmer dvojnásobok. Druhý najväčší rozdiel bol zistený na lokalite Humpolec (graf č. 7). Naopak najviac vyrovnaný prísun mobilného fosforu počas celej časovej rady pokusu zo všetkých druhov hnojív vykazovala lokalita Hněvčeves (graf č. 6), kde sa na druhom mieste po kale umiestnila aplikácia hnoja. Na tejto lokalite bol roku 2005 zaznamenaná odľahlá hodnota najväčšieho stanoveného obsahu prístupného fosforu 233 mg/kg pôdy.



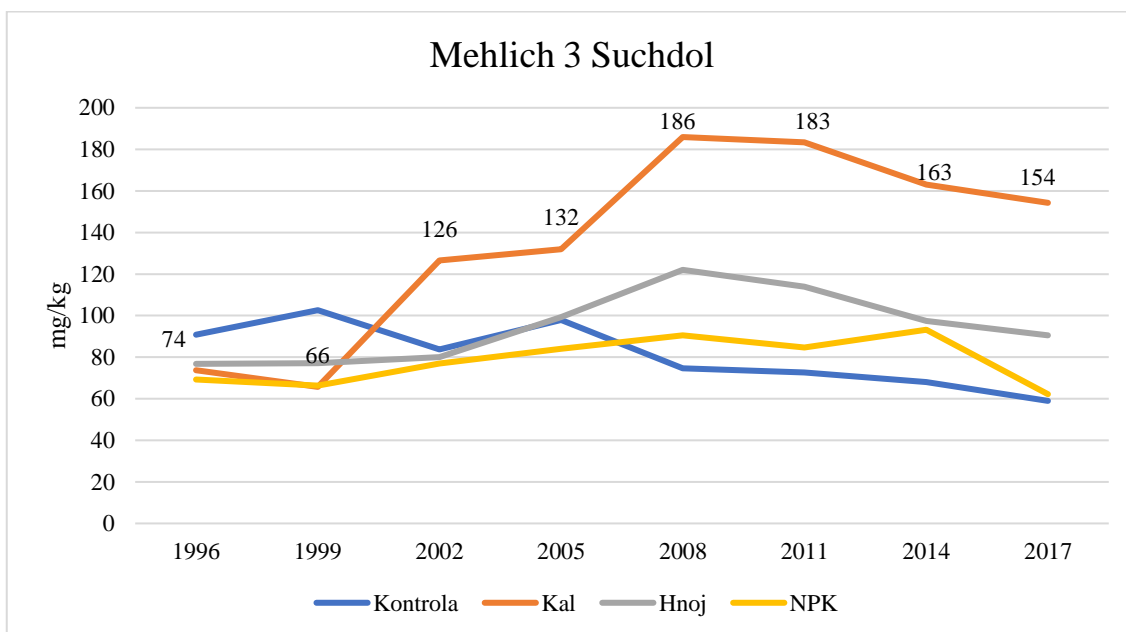
Graf č. 5: Popisná štatistika hromadných dát extrakčného roztoku Mehlich 3 (v mg/kg) zo všetkých pokusných lokalít po zbere jačmeňa



Graf č. 6: Obsah prístupného fosforu v pôde stanovený metódou Mehlich 3 na lokalite Hněvčeves



Graf č. 7: Obsah prístupného fosforu v pôde stanovený metódou Mehlich 3 na lokalite Humpolec



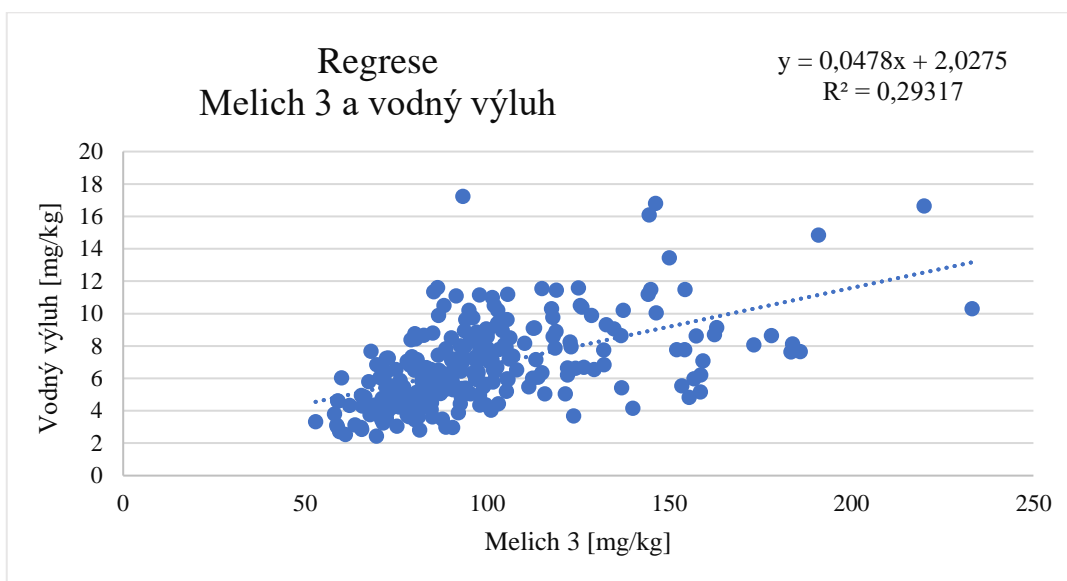
Graf č. 8: Obsah prístupného fosforu v pôde stanovený metódou Mehlich 3 na lokalite Suchdol

Porovnanie dvoch extrakčných metód pre stanovenie prístupného fosforu - vodného výluhu a metódy Mehlich 3

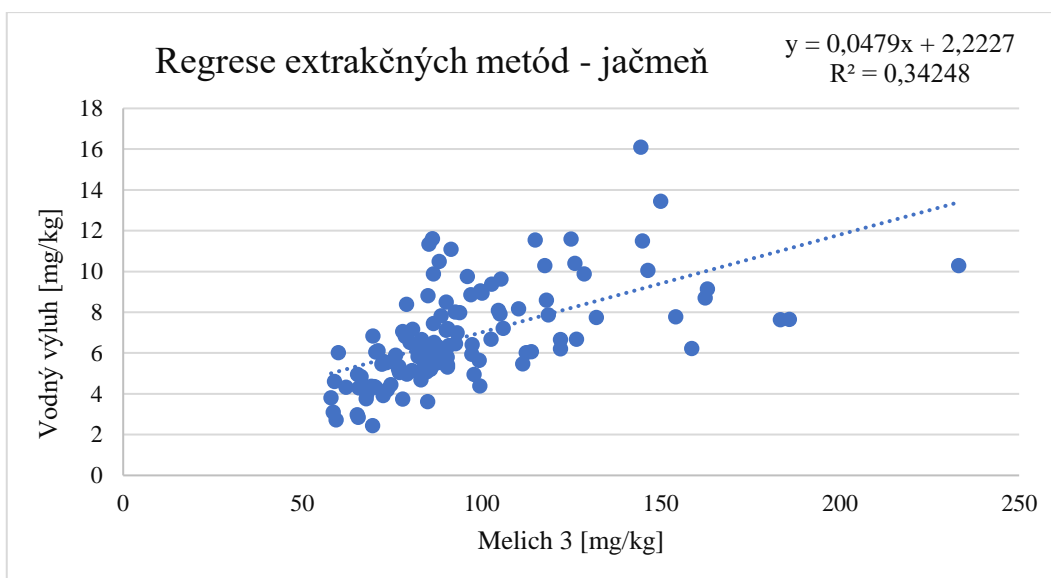
Korelačné a regresívne analýzy boli spočítané na dvoch úrovniach. Z pohľadu prístupného fosforu v časovej rade celého pokusu, ktorý bol nameraný po zbere všetkých pestovaných plodín v osevnom postupe (a). Druhé analýzy extrakčných metód sú zamerané na prístupný fosfor v pôde zisteného po zbere jačmeňa jarného (b).

Výsledky korelačných analýz, kedy určité hodnoty zistené vodným výluhom majú tendenciu sa vyskytovať spoločne s určitými hodnotami získanými metódou Mehlich 3, sa preukázali signifikantné na hladine významnosti $p < 0,001$. V prvom prípade po zbere všetkých pestovaných plodín bola korelačná determinácia, znázorňujúca podiel spoločnej variancie (a) $r^2 = 0,541$. Po zbere jačmeňa spoločná variancia dosiahla o niečo významnejšej korelácie (b) $r^2 = 0,585$.

Z grafu regresnej analýzy (a) č. 9 jasne vyplýva, že obsahy prístupného fosforu zistené metódou Mehlich 3 vysvetľujú z 29,32 % obsahy určených vodným výluhom. Výsledky regresnej analýzy skúmajúcej závislosť dvoch extrakčných metód pre stanovenie prístupného fosforu v pôde po zbere jačmeňa (b) taktiež, ako u korelácií, vychádzajú o niečo signifikantnejšie než u analýzy (a), kde percento spoľahlivosti dosahovalo 34,25 % (graf č. 10).



Graf č. 9: Regresná analýza dvoch extrakčných metód pre stanovenie prístupného fosforu po každej pestovanej rastline v oševnom postupe



Graf č. 10: Regresná analýza dvoch extrakčných metód pre stanovenie prístupného fosforu po zbere jačmeňa

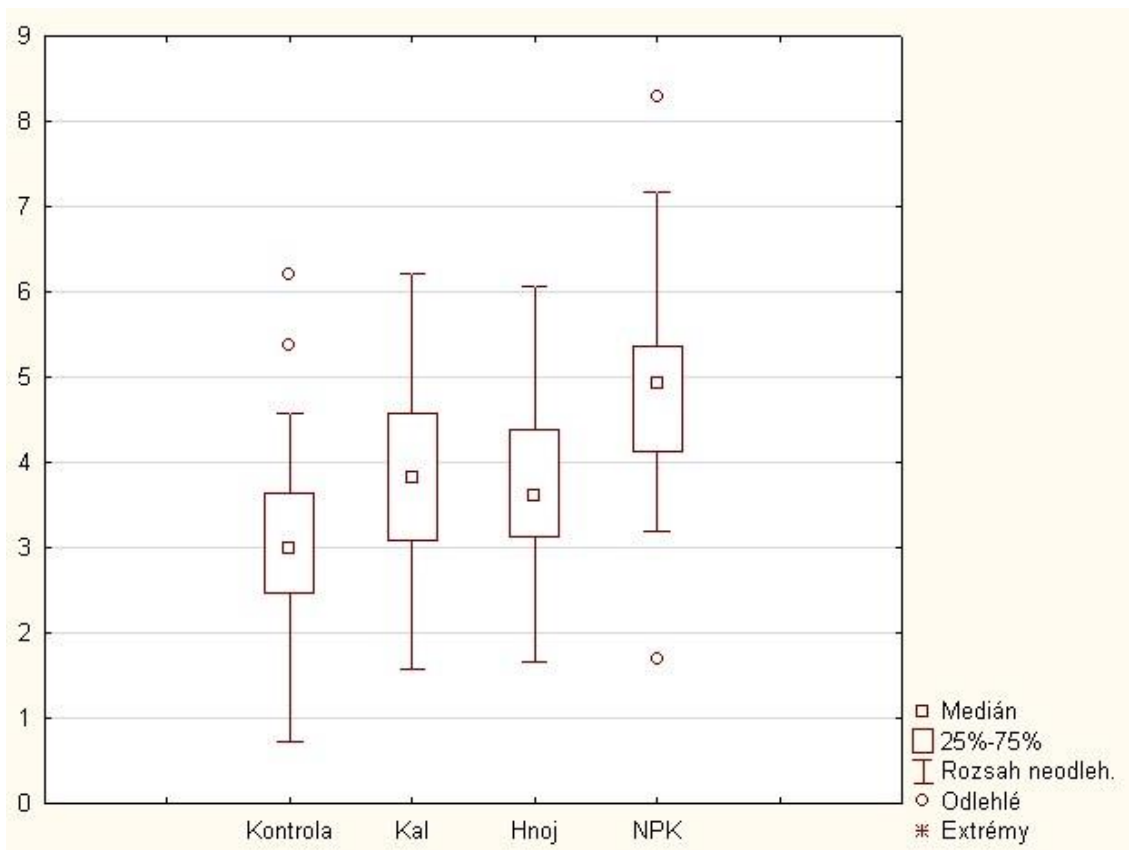
5.3 Výnos Jačmeňa jarného

Pri pohľade na graf č. 11, ktorý znázorňuje spoločný výnos jačmeňa zo všetkých pokusných lokalít je zreteľné, že výnos sa odlišuje v závislosti na použítom druhu hnojiva. Ako najlepšie sa ukázalo minerálne hnojivo NPK s hodnotou mediánu 5 t/ha. Aplikácia čistiarenskeho kalu sa umiestnila na druhom mieste, kde medián dosahoval takmer 4 t/ha, takže výnos dosiahol o niečo vyšších hodnôt ako pri použití samotného maštalného hnoja.

Z grafov č. 12, 13 a 14 je zreteľné, že čistiarenský kal priaznivo pôsobí na výnos jačmeňa jarného. Toto tvrdenie bolo preukázané na všetkých troch pokusných lokalitách. Najvyšší priemerný výnos bol dosiahnutý na parcelách hnojených minerálnym hnojivom NPK. Priemerný výnos jačmeňa hnojeného čistiarenským kalom bol druhý najlepší, a to na všetkých pokusných lokalitách. Najväčšieho rozdielu v priemernom výnose jačmeňa od nehnojenej kontroly dosiahol čistiarenský kal na lokalite Hnevčeves (graf č. 12). Na tejto lokalite bol od kontroly výnos v priemere o 14, 5 % vyšší. Naopak výnos jačmeňa hnojeného kalom sa najmenej odlišoval od kontroly na pokusných plochách na Suchdole (graf č. 14), kde výnos aj tak dosahoval v priemere o 11, 5 % viac na výnose.

Pri pohľade na grafy č. 15, 16 a 17 jasne vyplýva, že výnos jačmeňa sa odlišuje v jednotlivých rokoch, v závislosti na použítom druhu hnojiva. Avšak je viditeľné pôsobenie i iného faktoru, pretože krivky výnosov kolíšu približne rovnako u všetkých variant v časovej rade pokusu. Najvyššie výnosy boli taktiež dosiahnuté na variante, ktorá bola hnojená minerálnym hnojivom NPK, avšak na každej lokalite bol minimálne jeden rok, kedy po aplikáciách čistiarenskeho kalu boli výnosy vyššie. Z celej časovej rady pokusu najvyššieho výnosu po aplikáciách čistiarenskeho kalu bolo dosiahnutého roku 2005 na pokusnej lokalite Hnevčeves. Ako je zobrazené na grafe č. 15, najvyšší výnos dosahoval 6,22 t/ha.

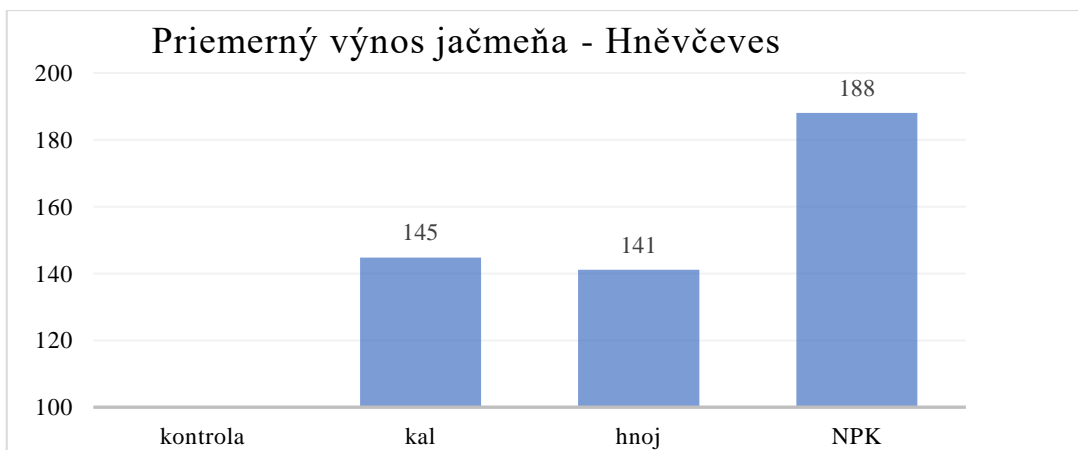
Ako je možné vidieť na tabuľke č. 5, najsilnejšia korelačná závislosť medzi výnosom jačmeňa a obsahom prístupného fosforu v pôde bola dokázaná na lokalite Hnevčeves, za použitia metódy Mehlich 3 pre stanovenie fosforu. Na zvyšných dvoch sledovaných lokalitách bola korelácia výnosu tesnejšia s obsahom prístupného fosforu stanoveného vodným výluhom. Z celkového hľadiska na všetkých skúmaných lokalitách výnos jačmeňa tesnejšie koreloval s výsledkami obsahu prístupného fosforu, ktoré boli stanovené metódou Mehlich 3. Téměř ve všech případech však byly korelace mezi obsahy P v půdě a pozdějším výnosem ječmene neprůkazné.



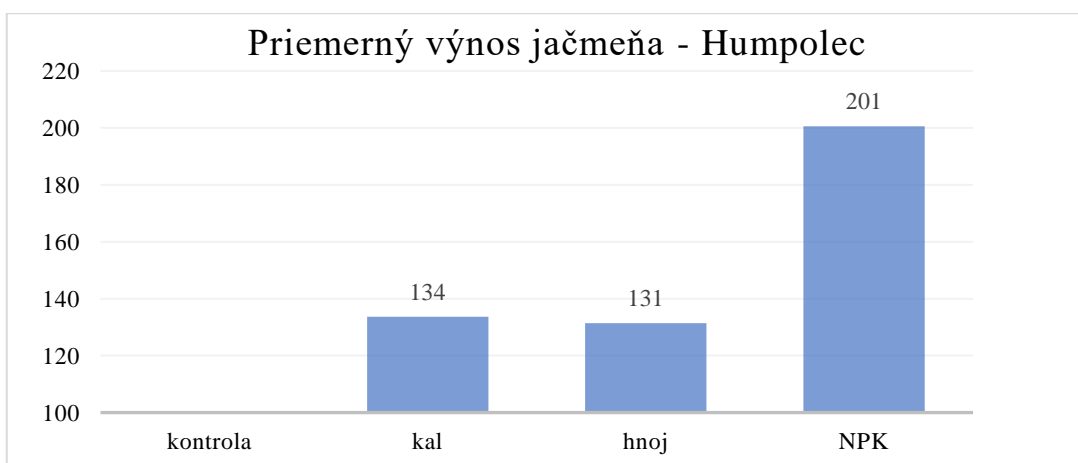
Graf č. 11: Popisná štatistika hromadných dát výnosu (t/ha suš. 100 %) jarného jačmeňa zo všetkých pokusných lokalít

Tabuľka č.5 – Korelačné koeficienty závislosti prístupného fosforu a výnosu jačmeňa

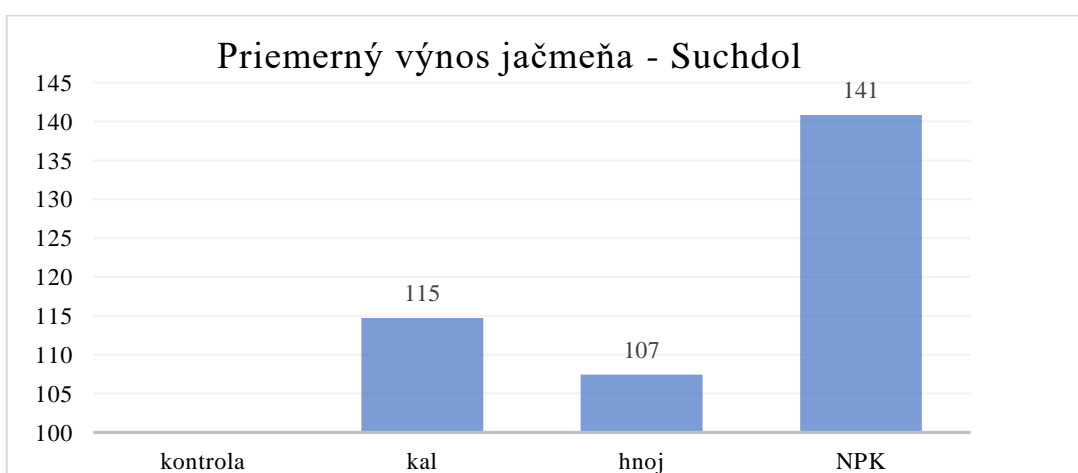
Obsah prístupného P (mg/kg)	Vodný výluh	Výnos (t/ha) suš. 100%			
		Hněvěves	Humpolec	Suchdol	Celkový
	Vodný výluh	0,0421	0,3124	0,3096	0,1308
	Mehlich 3	0,5067	-0,0114	0,23497	0,2091



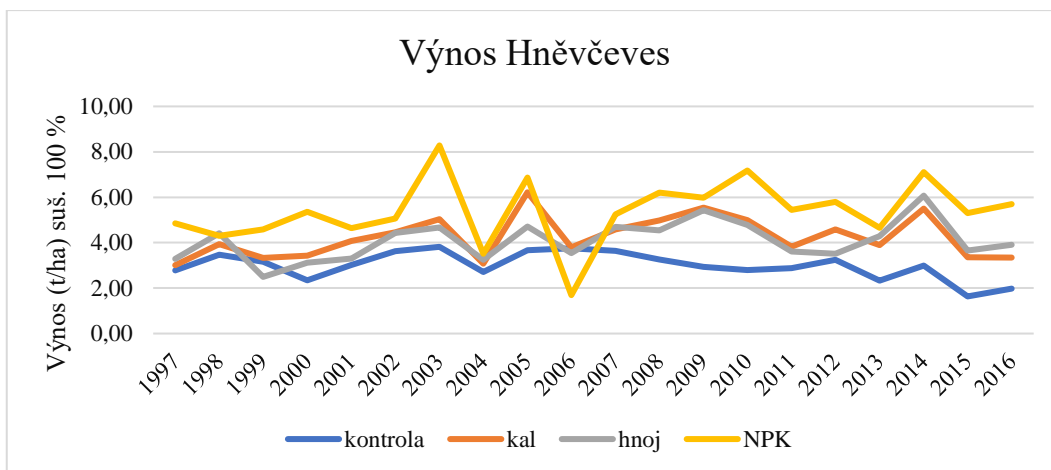
Graf č. 12: Priemerný výnos jačmeňa v % (kontrola = 100 %) na lokalite Hněvčeves v rokoch 1997 - 2016



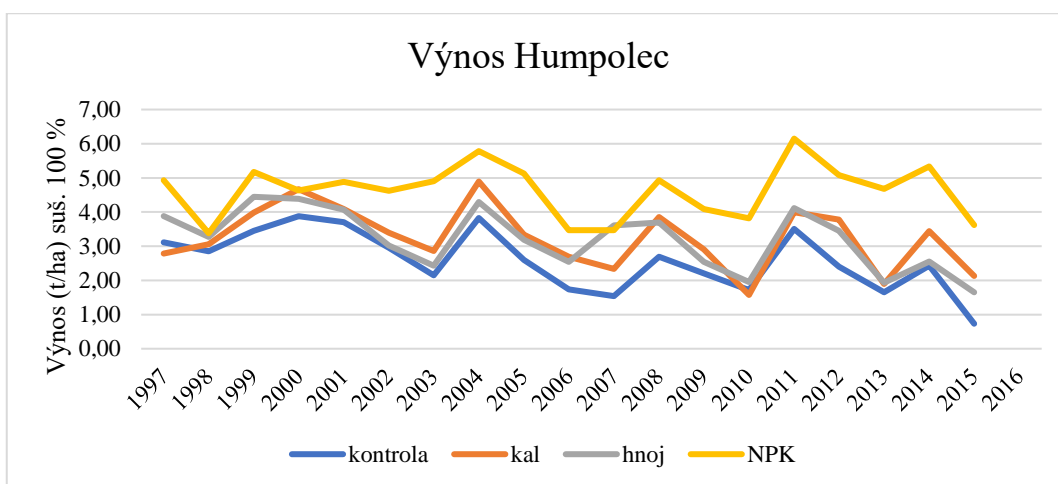
Graf č. 13: Priemerný výnos jačmeňa v % (kontrola = 100 %) na lokalite Humpolec v rokoch 1997 – 2015



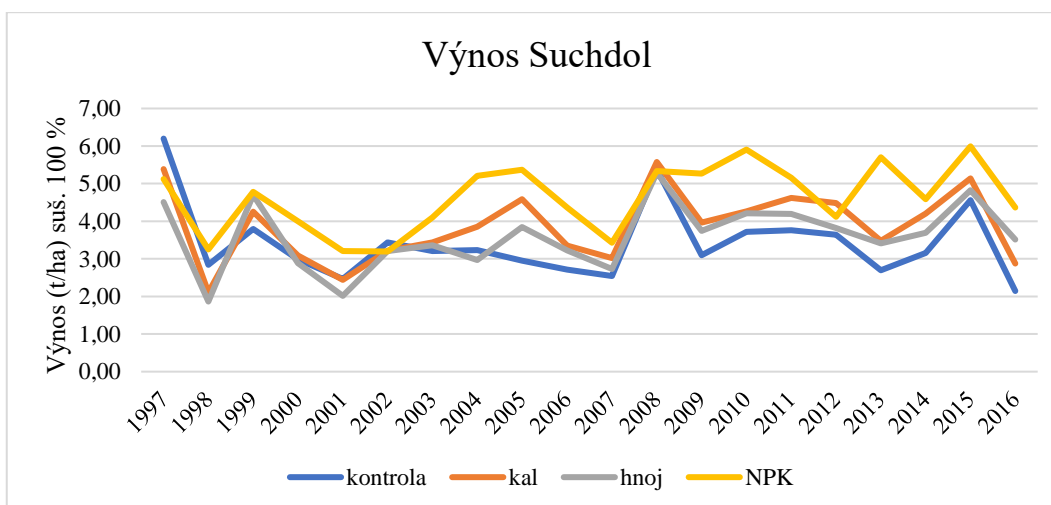
Graf č. 14: Priemerný výnos jačmeňa v % (kontrola = 100 %) na lokalite Suchdol v rokoch 1997 - 2016



Graf č. 15: Výnos jačmeňa jarného v celej časovej rade poľného pokusu na lokalite Hněvčeves



Graf č. 16: Výnos jačmeňa jarného v celej časovej rade poľného pokusu na lokalite Humpolec



Graf č. 17: Výnos jačmeňa jarného v celej časovej rade poľného pokusu na lokalite Suchdol

6. Diskusia

Väčšina vytŕažených prírodných fosfátov sa používa na výrobu minerálnych hnojív. V technologicky vyspelých krajinách na hnojivá pripadá 75 % z celkového vytŕaženého množstva, u ostatných poľnohospodársky orientovaných krajín aj viac ako 90 % ťažby (Greenwood, Ernshaw, 1993). Vzhľadom k tomu, že ložiská prírodných fosfátov sú rozmiestnené veľmi nepravidelne na zemskom povrchu, prichádzajú ďalšie problémy s ich transportom (Ivanič et al., 1984). Bohužiaľ nie vždy je prístup človeka k prírode dostatočne citlivý. Prioritou tejto diplomovej práce bolo zistenie či sú čistiarenské kaly vhodným alternatívnym hnojivom, so zameraním na výživu jačmeňa jarného fosforom. Ako tvrdí Sommers (1977), aplikácia čistiarenskeho kalu do pôdy umožňuje recykláciu potrebných živín, a tým pádom by mohla eliminovať potrebu komerčných hnojív. Hernández et al. (1991) uvádza, že je všeobecne preukázané, že dodanie čistiarenských kalov na poľnohospodársku pôdu zvyšuje produkciu plodín, čo potvrdzujú i výsledky tejto práce.

V rešeržnej časti diplomovej práce bola podchytená teoretická stránka problematiky, aby bolo možné čo najlepšie pochopiť funkciu fosforu, ako dôležitého elementu všetkého živého na Zemi, ako ho popisujú Greenwood, Ernshaw (1993). Taktiež bolo ozrejmené, prečo patrí medzi limitujúce živiny pre rast a vývoj rastlín, ktoré je potrebné dodávať do pôdy, aby bolo možné dosahovať vysokých a kvalitných úrod hospodárskych plodín (Holford, 1997). Účinnosť čistiarenských kalov v pôde bola v práci analyzovaná dvoma extrakčnými metódami ako zdroj prístupného fosforu pre rastliny v porovnaní s minerálnym NPK hnojením a maštalným hnojom. Prezentované výsledky boli získavané po celú dobu pokusu, tzn. 1996 - 2017, vždy po vystriedaní všetkých troch plodín v oševnom postupe. Následne bol vyhodnotený výnos jačmeňa jarného v časovej rade 1997 - 2016 na troch pokusných lokalitách.

6.1. Čistiarensky kal ako zdroj prístupného fosforu

Čistiarenské kaly boli dokázané ako najlepší zdroj prístupného fosforu zo všetkých skúmaných variant hnojenia. To v priebehu časovej rady pokusu preukázali výsledky oboch extrakčných metód na všetkých sledovaných pokusných plochách. Obsah prístupného fosforu po aplikácii kalu, až na pár výnimočných poklesov, kladne pribúdala počas celej časovej doby pokusu.

Rozdielne množstvo prístupného fosforu v pôde bolo extrahované za použitia vodného výluhu a metódy Mehlich 3. Korelácia medzi oboma výsledkami sa preukázala významná. To naznačuje, že rôzne formy fosforu boli rozpustené v rôznych stupňoch pri extrakciách, ako popisujú i Berton et al. (1997). V štúdií Wuenscher et al. (2015) kalkulujú výsledky oboch týchto extrakčných metód v rovnakej škále obsahov prístupného fosforu pre rastliny v pôde, ako boli zistené v tejto práci. Taktiež i tesné korelácie medzi metódou Mehlich 3 a vodným výluhom boli zhodné.

Výsledky nižších obsahov prístupného fosforu, ktoré sa pohybovali v rozmedzí 4 - 14 mg/kg, boli získané za použitia extrakcie vodným výluhom. Koncentrácia prístupného fosforu je najnižšia v pôdnom roztoku, a vodným výluhom sa zisťuje práve rozpustená alebo ľahko rozpustná forma fosforu (Wuenscher et al., 2015). Olsen, Watanabe (1970) vo svojej štúdií uvádzajú, že koncentrácia fosforu vo vodnom extrakte klesá s pribúdajúcimi čiastkami ílu v pôde. Toto tvrdenie nebolo v práci dokázané, pretože na lokalite Hněvčeves s ílovitohlinitou pôdou boli stanovené obsahy prístupného fosforu najvyššie.

Extrakčnou metódou Mehlich 3 boli zistené obsahy prístupného fosforu omnoho vyššie, v škále približne 100 - 200 mg/kg. Mehlich 3 je metóda, pomocou ktorej je možné z pôdy extrahovať viac druhov živín v jednej analýze (Sedlář et al., 2018), ktoré okrem fosforu zahŕňajú draslík, vápnik, horčík, sodík, meď, zinok, mangán a železo. To je v dôsledku toho, že niekoľko extrakčných mechanizmov je v tejto metóde skombinovaných. Ako popisujú Wuenscher et al. (2015), pre uvoľnenie prístupného fosforu kyselina octová podporuje rozpustenie Ca - fosfátov. Prídavok fluoridu amonného uvoľňuje ešte aj fosfor, ktorý je naviazaný v Al - fosfátoch. Keďže metóda Mehlich 3 započítava i potenciálne rýchlo prístupný fosfor zo slabých väzieb je logické, že výsledky sú podstatne vyššie ako u vodného výluhu. Extrakčnou metódou Mehlich 3 je zisťovaná celková biologická prístupnosť, ktorej výsledky v rovnakom rozmedzí boli popísané i v štúdií Kulhánek et al. (2009).

6.2. Výnos jačmeňa jarného

Pri sledovaní vplyvu dlhodobej aplikácii čistiarenského kalu na výnos jačmeňa jarného, boli v tejto práci zistené jeho pozitívne účinky na všetkých pokusných lokalitách. Výnosy boli v závislosti na lokalite v priemerne o 15 - 45 % vyššie v porovnaní s nehnojenou kontrolou. Najväčší priemerný výnos po aplikácii kalu bol zaznamenaný na lokalite Hněvčeves (4,25 t/ha), najnižší na lokalite Humpolec (3,25 t/ha). Avšak v percentách, pri hodnote kontroly rovnej 100

%, sa najmenej odlišoval výnos jačmeňa od nehnojenej kontroly na Suchdole. Celkovo na lokalite Suchdol boli zaznamenané najnižšie výnosy v porovnaní s kontrolou, a to u všetkých skúmaných druhoch hnojiva.

Aplikácia minerálneho hnojiva NPK stimulovala rast jačmeňa lepšie, než aplikácia kalu, rovnako ako v štúdií McCoy et al. (1986). Výnos jačmeňa jarného spoločne na všetkých skúmaných lokalitách dosahoval po aplikácii čistiarenských kalov v priemere približne o 1,1 t/ha menej, ako pri použití minerálneho hnojiva NPK. Naopak aplikácia čistiarenského kalu sa v porovnaní s maštal'ným hnojom preukázala na výnose ako lepší druh hnojiva. Rozdiely neboli síce tak zrejmé, ako v porovnaní s NPK hnojivom, avšak i o niekoľko 100 kilo na hektár viac, je pozitívna odozva pre požadované ciele práce. V priemere na všetkých pokusných lokalitách aplikácia čistiarenského kalu vykazovala o 0,15 t/ha viacej než pri použití hnoja. Výsledky štúdie Černý et al. (2010), na ktorej sa pokusy tejto práce plynule napájajú preukázali, že tendencia stále pokračuje. Taktiež boli najvyššie výnosy namerané na parcelách hnojenými minerálnymi hnojivami, avšak priemerný výnos po aplikácii kalu sa mierne znížil v porovnaní s použitím hnoja, ktorý bol vtedy o 0,22 t/ha vyšší.

Ako ukazujú výsledky zo všetkých skúmaných lokalít v celom časovom priebehu pokusu, výnos jačmeňa bol ovplyvnený i iným faktorom ako sú rôzne druhy hnojiva. Baier, Baierová (1983) poukazujú na ďalšie ekologické faktory, ktoré často výraznejšie ovplyvňujú výživu, teda i výnos rastlín než hnojivá. Sú to napr. poveternostné vplyvy určené súborom meteorologických faktorov, z ktorých najväčší účinok na príjem živín má voda. Petr (2005) popisuje zrážky, ako faktor často ovplyvňujúci výnos jačmeňa jarného. Ďalším faktorom je, že pri nízkych teplotách klesá príjem fosforu ako uvádza Baier, Baierová (1983), čo mohlo viesť k obmedzeniu výnosu, pretože obsah jeho prístupnej formy bol v pôde stanovený ako dostatočný.

Výsledky závislosti výnosu a celkového prístupného fosforu v pôde, stanoveného metódou Mehlich 3, najlepšie korelujú na lokalite Hněvčeves, kde bol zistený najvyšší výnos i prístupný fosfor v pôde. Čiastočky ílu v pôde sú schopné na seba fixovať ľahlo uvoľnitelný fosfor (Olsen, Watanabe, 1970), ktorý sa vďaka tomu z pôdy nestratí, čím môže zabezpečiť potrebnú výživu na dosiahnutie požadovaného výnosu.

7. Záver

Dvoma extrakčnými metódami bol zistený prínos prístupného fosforu pre rastliny do pôdy po aplikácii čistiarenských kalov. Tieto metódy boli navzájom porovnané, aby bolo možné analyzovať podobnosť obsahov fosforu nimi stanovenými. Následne bol vyhodnotený výnos jarného jačmeňa hnojeného čistiarenským kalom na troch pokusných plochách v dlhodobom presnom poľnom pokuse.

Obsah prístupného fosforu v pôde využiteľného rastlinami pridaného po aplikácii čistiarenských kalov sa preukázal ako najvyšší v porovnaní s ostatnými skúmanými variantami. Tieto varianty predstavovali použitie minerálneho hnojiva NPK a maštalného hnoja. Táto skutočnosť bola potvrdená oboma extrakčnými metódami pre stanovenie prístupného fosforu v pôde. Výsledky týchto dvoch metód - vodný výluh a metóda Mehlich 3 vykazovali vzájomnú koreláciu.

Zaujímavým zistením bolo, že i keď prístupný fosfor dodaný čistiarenským kalom vykazoval najvyššie obsahy, na výnose jačmeňa jarného sa ukázalo minerálne hnojivo NPK ako najlepšie. Avšak naopak v porovnaní s maštalným hnojom bol priemerný výnos jačmeňa po aplikácii kalu vyšší. Toto zistenie sa potvrdilo na všetkých skúmaných lokalitách v priebehu časovej rady pokusu.

Táto práca je vhodným podkladom pre problematiku zameranú na výživu a hnojenie fosforom, ktorý nie je získaný z klasických priemyselne vyrábaných minerálnych hnojív. Vzhľadom na nestále ubúdajúce zásoby fosforu v zemskej kôre sa využitie recyklovaného fosforu z odpadového materiálu - čistiarenského kalu javí ako spoľahlivá alternatíva prinášajúca výnosné úrody.

Ďalšou zaujímavou tematikou pri budúcom výskume čistiarenských kalov, by mohli byť analýzy ostatných výživových prvkov v nich obsiahnutých. Alebo práve naopak, podchytenie problematiky spojovanej s rizikovými a nežiadúcimi látkami, ktoré by sa touto cestou mohli dostať do potravinového reťazca, čím by mohli ohrozovať zdravie ľudí a zvierat.

8. Zoznam literatúry a použitých zdrojov

Ajmone-Marsan, F., Côté, D., Simard, R. R., 2006: Phosphorus transformations under reduction in long-term manured soils. Springer, Plant and Soil 282, 239–250. DOI 10.1007/s11104-005-5929-6

Aldersey - Williams, H., 2012: Periodické příběhy - zvláštní životy prvků. Z anglického originálu Periodic Tales. The Curious Lives of the Elements. Dokořán, s.r.o., Praha.

Anonym (2017) Agromanual.cz: *Ječmen jarní*. [online cit. 2017-11-19]. Dostupné z <<https://www.agromanual.cz/cz/atlas/plodiny/plodina/jecmen-jarni>>.

Baier, J., Baierová, V., 1985: Abeceda výživy rostlin a hnojení. Státní zemědělské nakladatelství, Praha.

Baier, J., Smetánková, M., Baierová, V., 1988: Diagnostika výživy rostlin. Institut výchovy a vzdělávání ministerstva zemědělství a výživy v Praze.

Begon, M., Townsend, C. R., Harper, J. L., 2006: Ecology: from Individuals to Ecosystems - fourth edition. Blackwell Publishing Ltd, Oxford, ISBN 978-1-4051-1117-1.

Benda, J., Flašarová, M., Hubík, K., Kryštof, Z., Krofta, S., Křen, J., Macháň, F., Milotová, J., Míša, P., Onderka, M., Pokorný, E., Střalková, R., Tichý, F., Váňová, M., 2001: Metodika pěstování jarních obilín. Zemědělský výzkumný ústav Kroměříš, s.r.o., Kroměříš.

Berton, R. S., Pratt, P. F., Frankenberger Jr, W. T., 1997: Phosphorous availability in soils amended with organic materials, estimated by three chemical methods and two enzyme activities. R. bras. Ci. Solo, Viçosa, 21, 617-624.

Bezdičková, A, 2016: Klimatické změny - Příležitost pro jarní jačmen? In Kompendium ke konferenci: Dobře zasít, dobře sklídit. Spolek pro ječmen a slad. ISBN 978-80-213-2624-8, ČZU, Praha.

Cade - Menun, B. J., 2011: Characterizing phosphorus in animal waste with solution ³¹P-NMR spectroscopy. In: Environmental chemistry of animal waste, Nova Science Publisher, Inc., New York, ISBN 978-1-61209-222-5.

Černý, L., Vašák, J., Křováček, J., Hájek, M., 2007: Jarní sladovnický ječmen - Pěstitelský rádce. Kurent, s.r.o., Praha.

Černý, J., 2010: Využití odpadů z ČOV jako zdroje organických látek a živin. <https://biom.cz/cz/projekty/konference-racionalni-pouziti-hnojiv-2009>. Biom.cz [online cit. 2018-2-7]. Dostupné z <<https://biom.cz/cz/odborne-clanky/vyuziti-odpadu-z-cov-jako-zdroje-organickych-latek-a-zivin>>.

Černý, J., Balík, J., Kulhánek, M., Časová, K., Nedvěd, V., 2010: Mineral and organic fertilization efficiency in long-term stationary experiments. *Plant and soil environ.*, 56, 28–36.

Černý, J., Balík, J., Kulhánek, M., Sedlář, O., 2018: Hnojení jarního ječmene. Česká zemědělská univerzita v Praze. Agromanual. cz. [online cit. 2018-2-27]. Dostupné z <<https://www.agromanual.cz/cz/clanky/vyziva-a-stimulace/hnojeni/hnojeni-jarniho-jecmene>>.

Deiss, L., Anibal de Moraes, B., Maire, V., 2017: Soil phosphorus dynamics on terrestrial natural ecosystems. *Biogeosciences Discuss*, Manuscript under review for journal *Biogeosciences*. <https://doi.org/10.5194/bg-2017-307>, in review.

Dohányos, M., 2006: Efektivní využití a likvidace čistírenských kalů. Biom.cz [online cit. 2017-11-18]. Dostupné z <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/efektivni-vyuziti-a-likvidace-cistirenskych-kalu>>.

Eghball, B., Wienhold, B. J., Gilley, J. E., Eigenberg, R. A., 2002: Mineralization of manure nutrients. In: *Journal of soil and water conservation* 57, 470 - 473.

Epstein, E., Taylor, J. M., Chancy, R. L., 1976: Effects of Sewage Sludge and Sludge Compost Applied to Soil on some Soil Physical and Chemical Properties. *J. Environ, Qual.* Vol. 5, no. 4, 422-426.

Excel, 2016: Microsoft Office Excel. Microsoft office Enterprise, USA, release SP2.

Filippelli, G. M., 2008: The Global Phosphorus Cycle: Past, Present, and Future. *Elements*, Vol. 4, PP. 89 - 95. DOI: 10.2113/GSELEMENTS.4.2.89.

Fytili, D., Zabaniotou, A., 2008: Utilization of sewage sludge in EU application of old and new methods—A review. *Science Direct, Renewable and Sustainable Energy Reviews* 12, 116–140.

Greenwood, N. N., Earnshaw, A., 1993: *Chemie prvků - svazek 1. Informatorium.* Praha.

Hernández, T., Moreno, J. I., Costa, F., 1991: Influence of Sewage Sludge Application on Crop Yields and Heavy Metal Availability. *Soil Science and Plant Nutrition* 37 (2), 201-210.

Holford, I. C. R., 1997: Soil phosphorus: its measurement, and its uptake by plants. *Australian Journal of Soil Research* 35(2).

Ivanič, J., Havelka, B., Knop, K., 1984: *Výživa a hnojenie rastlín. Druhé prepracované a doplnené vydanie. Príroda, Bratislava.*

Klem, K., Babušník, J., Bajerová, E., 2007: Kde jsou rezervy současných pěstitelských technologií sladovnického ječmene pro dosažení vysoké rentability? In: *Kompendum ke konferenci: Jarný ječmen perfektní obilnina pro ČR. Sdružení pro ječmen a slad.* ISBN 978-80-213-1616-4, ČZU, Praha.

Krausko, A., Droba, O., Macek, H., 1980: *Jarný jačmeň. Príroda, Bratislava.*

Kubinec, S., Kováč, K., a kol. 1998: *Progresívne technológie pestovania jarného jačmeňa. Výskumný ústav rastlinnej výroby, Piešťany.*

Kulhánek, M., Balík, J., Černý, J., Vaněk, V., 2009: Evaluation of phosphorus mobility in soil using different extraction methods. *Plant Soil Environ.*, 55, 267–272.

Lekeš, J., Benada, J., Brückner, F., Kopecký, M., Minařík, F., Příkryl, K., Voňka, Z., Zeniščeva, L., 1985: Ječmen. Státní zemědělské nakladatelství, Kroměříš.

Liao, P. H., Wong, W. T., Lo, K. V., 2005: Release of phosphorus from sewage sludge using microwave technology. *J. Environ. Eng. Sci.* Vol. 4, 77-81, doi: 10.1139/S04-056.

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

McCoy, J. L., Sikora, L. J., Weil, R. R., 1986: Plant Availability of Phosphorus in Sewage Sludge Compost. *J. Environ. Qual.*, Vol. 15, no. 4, 403-409.

Mehlich, A., 1984: Mehlich 3 soil test extractant: A modification of Mehlich 2 extractant. *Commun. Soil Sci. Plan.* 15:1409-1416. DOI: 10.1080/00103628409367568.

Michalík, I., 1985: Príjem a metabolismus fosforu v rastlinách. Sária A poľnohospodárstvo. Veda, Bratislava.

MŽP projekt, 2015: Optimalizace nakládání s kaly z komunálních čistíren odpadních vod. zpracovatel' - ECO trend Research centre s.r.o.

Nash, D. M., Haygarth, P. M., Turner, B. L., Condon, L. M., McDowell, R. W., Richardson, A. E., Watkins, M., Heaven, M. W., 2014: Using organic phosphorus to sustain pasture productivity: A perspective. *Elsevier B.V., Geoderma* 221–222, 11–19.

Oelkers, E. H., Valsami -Jones, E., Roncal - Herrero, T., 2008: Phosphate mineral reactivity: from global cycles to sustainable development. In: *Mineralogical Magazine* 72(1), 337–340. DOI: 10.1180/minmag.2008.072.1.337.

Olsen, S.R., Watanabe, F.S., 1970: Diffusive supply of phosphorus in relation to soil textural variations. *Soil Sci.*, Baltimore, 110, 318-327.

Petr, J., 2005: Jarní ječmen je znamenitá, ale náročná plodina. In: Kompendium vybraných poznatků při pěstování jarního sladovnického ječmene. Sdružení pro ječmen a slad. ISBN 80-213-116-3, ČZU, Praha.

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

Raclavská, H., 2007: Technologie zpracování a využití kalů z ČOV. Ostrava. ISBN 978-80-248-1600-5.

Richter, R., Hlušek, J., 1996: Průmyslová hnojiva, jejich vlastnosti a použití. Institut výchovy a vzdělávání Ministerstva zemědělství České republiky, Praha. ISBN 80-7105-121-7.

Richter, R., Římovský, K., 1996: Organická hnojiva, jejich výroba a použití. Institut výchovy a vzdělávání Ministerstva zemědělství České republiky, Praha. ISBN 80-7105-117-9.

Sedlář, O., Balík, J., Kulhánek, M., Černý, J., Kos, M., 2018: Mehlich 3 extractant used for the evaluation of wheat- available phosphorus and zinc in calcareous soils. *Plant Soil Environ.* Vol. 64, No. 2, 53–57, doi: 10.17221/691/2017-PSE.

Singh, R. P., Agrawal, M., 2008: Potential benefits and risks of land application of sewage sludge. *Science Direct, Waste Management* 28, 347–358.

Sommers, L.E., 1977: Chemical composition of sewage sludges and analysis of their potential use as fertilizers. *J. Environ. Qual.* 6, 225– 232.

STATISTICA, 2016: ver. 13.2. Dell software. <https://software.dell.com/products/statistica/>.

Stutter, M. I., Shand, Ch. A., George, T. S., Blackwell, M. S. A., Dixon, L., Bol, R., MacKey, R. L., Richardson, A. E., Condon, L. M., Haygarth, P. M., 2015: Land use and soil factors affecting accumulation of phosphorus species in temperate soils. *Geoderma* 257–259, 29–39.

Townsend, C. R., Begon, M., Harper, J. L., 2010: Základy ekologie. Z anglického originálu *Essentials of Ecology* - 3th edition. Univerzita Paláceho v Olomouci, Olomouc. ISBN 978-80-244-2478-1.

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

Vaněk, V., Balík, J., Černý, J., Pavlík, M., Pavlíková, D., Tlustoš, P., Valtera, J., 2012: Výživa zahradních plodin. Academia Praha, ISBN 978-80-200-2147-2.

Vašek, J., 2007: Sladovnícky ječmen budoucí hlavní obilovina ČR. In: Kompendium ke konferenci: Jarný ječmen perfektní obilnina pro ČR. Sdružení pro ječmen a slad. ISBN 978-80-213-1616-4, ČZU, Praha.

Wuenschel, R., Unterfrauner, H., Peticzka, R., Zehetner, F., 2015: A comparison of 14 soil phosphorus extraction methods applied to 50 agricultural soils from Central Europe. *Plant Soil Environ.*, Vol. 61, No. 2: 86–96. doi: 10.17221/932/2014-PSE

Zákon č. 185/2001 Sb. o odpadech a o změně některých dalších zákonů.

Zeidan, M. S., 2007: Effect of Organic manure and Phosphorus Fertilizers on Growth, Yield and Quality of Lentil Plants in Sandy Soil. *Research Journal of Agriculture and Biological Sciences*, 3(6): 748-752.

Zheng, Z. M., Zhang, T. Q., 2012: Soil Phosphorus Tests and Transformation Analysis to Quantify Plant Availability: A Review, Soil Fertility Improvement and Integrated Nutrient Management - A Global Perspective, Dr. Joann Whalen (Ed.), ISBN: 978-953-307-945-5.